

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)

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

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Рациональное использование сырьевых и энергетических ресурсов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация стадии гранулирования карбамида на предприятии
АО «ТольяттиАзот»

Обучающийся

Д. С. Таликов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к. х. н., доцент кафедры «ХТиР» С.А. Соков

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

Тольятти 2024

Аннотация

Выпускную квалификационную работу выполнил: студент группы ЭРТбп-1901ас: Таликов Дмитрий Сергеевич.

Тема бакалаврской работы: Оптимизация стадии гранулирования карбамида на предприятии АО «ТольяттиАзот».

Научный руководитель выпускной квалификационной работы: Соков Сергей Александрович.

Цель выпускной квалификационной работы – получение карбамида в весенне-летний, летний и летне-весенний период до проектной мощности на предприятии АО «ТольяттиАзот», при этом снизить получение некондиционного карбамида до минимума за счет внедрения технологии абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ).

Выпускная квалификационная работа состоит из 61 страниц, 7 таблиц, 20 иллюстраций. Выполнены чертежи предлагаемой установки, а также осуществлен расчет и подбор следующего вспомогательного оборудования:

- абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина;
- калорифер;
- циркуляционный насос.

Составлено техническое описание применяемого оборудования.

Объектом исследования является стадия гранулирования карбамида цеха №08К на предприятии АО «ТольяттиАзот».

Содержание

Введение	4
1 Теоретическая часть	6
1.1 Физико-химические свойства карбамида	6
1.2 Применение карбамида и промышленные способы его получения	9
1.3 Анализ литературных источников и рассмотрение патентных изобретений	13
2 Технологическая часть	22
2.1 Анализ технологической схемы стадии гранулирования цеха 08К предприятия АО «ТольяттиАзот»	22
2.1.1 Характеристика получаемого карбамида и его физико-химические свойства	22
2.1.2 Технологическая схема и описание стадии гранулирования карбамида	23
2.2 Принцип работы устройства абсорбционно-холодильной машины, ее функции и применение	27
2.3 Преимущества в использовании АБХМ	30
2.4 Предлагаемая схема оптимизации гранулирования карбамида	31
3 Расчетная часть	35
3.1 Расчет абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ)	35
3.2 Расчет калорифера (воздухоохладитель)	41
3.3 Подбор абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины	52
3.4 Подбор циркуляционного насоса	54
Заключение	56
Список используемой литературы	57

Введение

На сегодняшний день, одной из самых главных проблем на стадии гранулирования карбамида, является снижение получения готовой продукции в весенне-летний, летний и летне-осенний период. Следовательно, установки кипящего слоя работают не на всю мощность, как заявлено во многих проектах. Данная проблема возникает из-за нарушения подачи оптимального режима воздуха в грануляционные башни. К оптимальному режиму воздуха относится температура и влажность.

В результате нарушения подачи оптимального режима воздуха в грануляционные башни, на выходе образуется большое количество брака, который не соответствует межгосударственному стандарту ГОСТ 2081-2010 «Карбамид. Технические условия». Это обусловлено тем, что капли кипящего слоя при падении не успевают охладиться полностью. После отгрузки такого карбамида на склад, гранулы со временем начинают склеиваться между собой, образуя некондиционный продукт.

Объект исследования – технологическая схема стадии гранулирования карбамида цеха №08К предприятия АО «ТольяттиАзот».

Предмет исследования – стадия гранулирования карбамида.

Целью исследования выпускной квалификационной работы является получение карбамида в весенне-летний, летний и летне-весенний период до проектной мощности на предприятии АО «ТольяттиАзот», при этом снизить получение некондиционного карбамида до минимума за счет внедрения технологии абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ).

Для достижения поставленной цели исследования в выпускной квалификационной работе будут решаться следующие задачи:

- изучить оборудование (описание конструкций и принцип работы оборудования, схемы аппаратов, машин, сравнительная характеристика) для

охлаждения воздуха, которое применяется на стадии гранулирования карбамида в весенне-летний, летний и летне-весенний период;

- рассмотреть технологическую схему предприятия АО «ТольяттиАзот» по получению карбамида, а также выявить недостатки на стадии гранулирования;

- подбор нового оборудования, согласно цели выпускной квалификационной работы;

- выполнить конструктивные расчеты выбранного оборудования.

Современное научное исследование заключается в рассмотрении решений ряда вопросов по интенсификации стадии гранулирования карбамида.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в увеличении производительности получаемого карбамида в весенне-летний, летний и летне-весенний период до проектной мощности, при этом снизить получение некондиционного карбамида до минимума.

1 Теоретическая часть

1.1 Физико-химические свойства карбамида

Карбамид (диамид угольной кислоты) является химическим соединением, который может быть получен разными способами, путем взаимодействия с различными исходными веществами, имеет форму бесцветных кристаллов, не имеет запаха. Химическая формула карбамида имеет следующий вид:

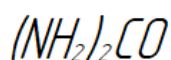


Рисунок 1 – Химическая формула карбамида

На сегодняшний день все ведущие предприятия выпускают карбамид в соответствии с технологическим регламентом, а также на основании межгосударственного стандарта, согласно ГОСТ 2081-2010 «Карбамид. Технические условия».

Рассмотрим структурную формулу карбамида, которая указана на рисунке 2.

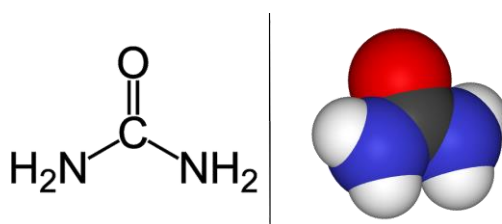


Рисунок 2 – Структурная формула карбамида

«В зависимости от применения карбамида, выпускается под двумя марками:

- марка А (для промышленного применения);

- марка Б (применяется в животноводстве, растениеводстве, а также в розничной торговле).

Карбамид для промышленного применения (марки А) должен соответствовать следующим физико-химическим показателям, согласно межгосударственным стандартам, указанные в таблице 1» [7].

Таблица 1 – Физико-химические показатели карбамида марки А

Наименование показателя	Норма для сорта	
	Высший	1-й
1	2	3
1 Массовая доля азота в пересчете на сухое вещество, % не менее	46,3	46,2
2 Массовая доля биурета, %, не более	0,6	1,4
3 Массовая доля свободного аммиака, %, не более, для карбамида:		
- кристаллического	0,01	0,01
- гранулированного	0,02	0,03
4 Массовая доля воды, %, не более:		
- гигроскопической	0,3	0,3
- общей	0,6	0,6

«Карбамид, который применяется в растениеводстве, а также в розничной торговле (марки Б) должен соответствовать следующим физико-химическим показателям, согласно межгосударственным стандартам, указанные в таблице 2» [7].

Таблица 2 – Физико-химические показатели карбамида марки Б, применяемый в растениеводстве и в розничной торговле

Наименование показателя	Норма для марки Б			
	для растениеводства			для розничной продажи
	Высший сорт	1-й сорт	2-ой сорт	
1	2	3	4	5
1 Внешний вид	Гранулы или кристаллы белого цвета или слегка окрашенные			
2 Массовая доля азота в пересчете на сухое вещество, % не менее	46,2	46,2	46,2	46,2
3 Массовая доля биурета, %, не более	1,4	1,4	1,4	1,5
4 Массовая доля воды, %, не более:				

Продолжение таблицы 2

- гигроскопическая	0,3	0,3	0,3	0,3
- общая	0,5	0,5	0,6	-
5 Рассыпчатость, %	100	100	100	-
6 Гранулометрический состав, %:				
Массовая доля гранул размером, мм				
- от 1 до 4, не менее	94	94	94	-
- от 2 до 4, не менее	70	50	-	-
- менее 1, не более	3	5	5	-
- остаток на сите 6 мм	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	-
7 Статическая прочность гранул, МПа (кг/см ²), не менее	1,4 (14)	1,2 (12)	1,2 (12)	
в пересчете на 1 гранулу, Н, (кгс), не менее	7 (0,7)	1,4 (0,5)	3 (0,3)	

«Карбамид, который применяется в животноводстве (марки Б) должен соответствовать следующим физико-химическим показателям, согласно межгосударственным стандартам, указанные в таблице 3» [7].

Таблица 3 – Физико-химические показатели карбамида марки Б, применяемый в животноводстве

Наименование показателя	Норма
1 Массовая доля азота в пересчете на сухое вещество, %, не менее	46,0
2 Массовая доля биурета, %, не более	3,0
3 Массовая доля свободного аммиака, %, не более	0,03
4 Массовая доля гигроскопической воды, %, не более	0,3

Также к физико-химическим свойствам относится растворимость карбамида. Карбамид растворяется в водной среде на 88% при 100°C. В жидком аммиаке карбамид растворяется лучше, 90% при 100°C. В метаноле, этаноле, изопропаноле, изобутаноле и этилацетате, карбамид растворяется меньше чем на 25% от своей массы.

Рассмотрим применение карбамида во всех сферах деятельности человека, а также разберем, какие промышленные способы получения карбамида существуют.

1.2 Применение карбамида и промышленные способы его получения

Более 90% мирового промышленного производства мочевины предназначено для использования в качестве удобрения с выделением азота [24]. После того как карбамид попадает в почву, он начинает разлагаться, образуя при этом ионы аммония, которые питают корни растений. При образовании ионов аммония, происходит их окисление бактериями до образования нитрата, который также является отличным питательным веществом для всех растений. Также карбамид применяется в качестве кормовой добавки для жвачных животных, который способствует быстрому росту [9].

В нефтяной промышленности карбамид применяется в качестве агента в процессе удаления парафинов [5]. На сегодняшний день парафин является ценным сырьем для химической промышленности.

Карбамид нашел свое применение и в другой промышленности. Он применяется для производства смол на основе формальдегида [22]. Данный состав добавляется для получения ДСП (древесно-стружечные плиты), ДВП (древесно-волоконистые плиты), ОСП (ориентировано-стружечные плиты) и фанеры.

Карбамид также применяется в косметологии, и добавляется в состав кремов. На основании проведенных исследований, удалось получить крем, который имеет антимикробные и антигрибковые свойства [29]. Служит отличной добавкой в дерматологические средства, увлажняющих кремов, кондиционеров для волос и шампуней. Применяется в качестве основного вещества для депиляции волос в таких компаниях как Nair и Veet [30].

Карбамид используется в реакции с азотной кислотой, на основании реакции получается бризантное взрывчатое вещество, которое может быть использовано в горно-строительной промышленности, для подрыва горных и скальных пород [30].

Карбамид в виде раствора применяется в автомобильных системах, а именно в каталитических нейтрализаторах, где протекает реакция превращения вредных и опасных веществ в безвредные и безопасные для человека и окружающего воздуха [31].

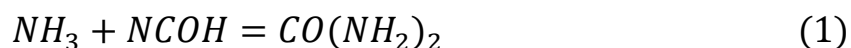
«Применяется карбамид в качестве мочегонного средства. В исследовании 2010 года среди пациентов отделения интенсивной терапии мочевины использовалась для лечения эводемической гипонатриемии и была признана безопасной, недорогой и простой» [4].

Также карбамид широко применяется во многих средствах по отбеливанию зубов, является ингредиентом в мыле для мытья посуды, входит в огнезащитный состав, который используется в сухих химических зарядах для огнетушителей, таких как смесь карбамида и бикарбоната калия. Применяется в нелинейной оптике в качестве оптического параметрического генератора [23].

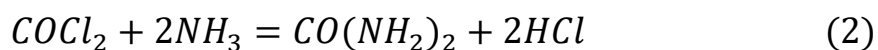
На сегодняшний день синтезировать карбамид промышленным способом возможно с помощью с помощью следующих исходных компонентов:

- путем взаимодействия NH_3 (аммиак) и $NCOH$ (кислота циановая).

Также данный способ получения карбамида называется методом Вёлера:



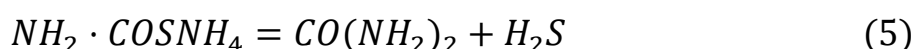
- путем взаимодействия газа $COCl_2$ (фосген) и NH_3 . При получении карбамида по данному способу, образуется побочный продукт в виде хлорида аммония:



- путем взаимодействия NH_3 и COS (оксид-сульфид углерода). По данному способу на первом этапе образуется $NH_2 \cdot COSNH_4$ (тиокарбамат аммония):



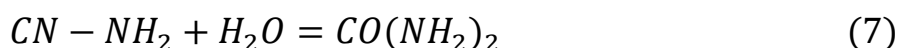
«Полученное соединение тиокарбамат аммония нагревают до температуры в $100^\circ C$. При данной температуре происходит процесс разложения тиокарбамата аммония на карбамид и сероводород»[12]:



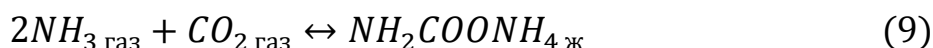
- путем процесса разложение $CaCN_2$ (цианамид кальция) с помощью CO_2 (диоксид углерода). По данному способу на первом этапе образуется CN_2H_2 (цианамид) и $CaCO_3$ (карбонат кальция):



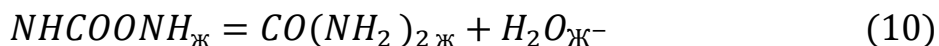
«Полученное соединение CN_2H_2 в кислой среде при постепенном нагревании происходит процесс присоединения цианамид с водой, вследствие чего образуется карбамид»[13]:



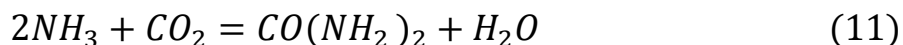
Большинство ведущих предприятий, которые выпускают гранулированный карбамид, применяют другой способ, заключающиеся в прямом синтезе аммиака и диоксида углерода. Данный способ был открыт 1868 году русским химиком Александром Ивановичем Базаровым и применяется по сей день. «Синтез аммиака и диоксида углерода протекает в две стадии. В первой стадии осуществляется образование карбамата аммония по следующей реакции» [14]:



Во второй стадии происходит реакция отщепления воды, образуя при этом карбамид:



Сложив две реакции синтеза карбамида, получаем общий вид уравнения:



Обе реакции являются обратимыми, а их равновесие во многом зависит от давления и температуры проведения процесса синтеза, а также от подачи исходных реагентов. На сегодняшний день, крупные предприятия по выпуску карбамида, такие как ПАО «Уфаоргсинтез», АО «ТольяттиАзот», ПАО «КуйбышевАзот», АО «Апатит» и др., используют следующие оптимальные параметры для проведения процесса синтеза карбамида:

- температура проведения процесса синтеза – 185-200°C;
- давление, не превышающее 200 атм.;
- мольное соотношение исходных реагентов: $NH_3:CO_2:H_2O = (3,2 - 3,6):1:(0,5 - 0,7)$.

Применяя данные оптимальные параметры, большинство предприятий столкнулись с одной из главных проблем на стадии гранулирования карбамида. Данная проблема заключается в температурном режиме воздуха и его влажности, который подается в грануляционные башни в весенне-летний, летний и летне-осенний период. Именно в эти периоды температура воздуха составляет от 18°C до 40°C. Для охлаждения капель и превращения их в гранулы следует подавать атмосферный воздух с температурой не более 15°C.

Был проведен анализ литературных источников, а также выполнен патентный поиск решений, применяемых на стадии гранулирования по подводу охлаждающего воздуха в летний период.

1.3 Анализ литературных источников и рассмотрение патентных изобретений

В таблице 4 указаны патентные изобретения, которые успешно применяются на сегодняшний день на стадии гранулирования.

Таблица 4 – Результаты патентных изобретений

Номер патентного документа, международная патентная классификация	Наименование патентного документа	Владелец патентного документа	Ф.И.О. изобретателя
2	3	4	5
Патент РФ RU 2 788 006 C1 МПК C07C 273/04 (2006.1)	Способ и устройство для получения мочевины	ТОЙО ИНДЖИНИРИНГ КОРПОРЕЙШН (JP)	Сасаки Кейго
Патент РФ RU 2 674 951 C1 МПК B01J 2/00 (2006.1)	Охладитель и способ охлаждения прилл или гранул	Гусев Владимир Иванович	Гусев Владимир Иванович
Патент РФ RU 2 640 779 C2 МПК B01J 2/04 (2006.1) C07C 273/00 (2006.1)	Грануляционная башня и способ получения, в частности, мочевины	САИПЕМ С.П.А. (IT)	БИН Луо ЧЖУНПИН Се ХОЙСЮНЬ Лин КАРЛЕССИ Лино
Патент РФ RU 2015 101 156 C1 МПК B01J 2/04 (2006.1)	Способ и устройство для гранулирования жидкости, в частности для гранулирования мочевины	КАСАЛЕ СА (CH)	БЕДЕТТИ Джанфранко
Патент РФ RU 126962 U1 МПК B01J 2/04 (2006.1)	Грануляционная башня	Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектный институт карбамида и продуктов»	Беседин А. Б. Шнепп Ю. Б. Баклан Г. С. Дунаева О. А. Родионов А. С. Кизищенко В. Л. Прокопьев А. А. Кузнецов Н. М.

Продолжение таблицы 4

<p>Патент РФ RU 2 491 262 C1 МПК C05C 7/02 (2006.1)</p>	<p>Способ и установка для получения гранулированного удобрения</p>	<p>Открытое акционерное общество «Научно- исследовательский и проектный институт карбамида и продуктов»</p>	<p>Беседин А. Б. Шнепп Ю. Б. Баклан Г. С. Дунаева О. А. Родионов А. С. Кизищенко В. Л. Прокопьев А. А. Кузнецов Н. М.</p>
---	--	---	---

В патенте № 1 рассматривается способ и устройство на стадии гранулирования карбамида. Устройство выполнено в виде теплообменника, по которому проходит паровой конденсат. Единственным положительным качеством при использовании теплообменного блока является получение оптимальных влажностных характеристик воздуха, путем его нагревания. Существенным недостатком является нагретый атмосферный воздух и при его применении на стадии гранулирования, получаемые гранулы будут охлаждаться не эффективно.

В патенте № 2 рассматривается способ охлаждения гранул карбамида в башне приллирования или гранулирования. Данный охладитель в основном проектируется из двух горизонтальных ряда трубок, имеющие форсунки, щели или воздушные ножи, направленные для подачи газообразного хладагента. С помощью данного охладителя достигаются улучшенные показатели на стадии гранулирования, а именно повышение прочности получения прилл или гранул, а также равномерное охлаждение продукта в целом. Преимуществом в использовании охладителя является получение улучшенных показателей карбамида по гранулометрическому составу, что позволит уменьшить высоту и сечение грануляционной или приллированной башни. Существенным недостатком в использовании охладителя является проведение модернизации и затраты по уменьшению высоты и сечения гранулированной или приллированной башни. Изменения данных

параметров башен будет зависеть от наличия применяемых ступеней охлаждения.

Патент № 3 применяется на производстве карбамида, а именно на стадии приллирования или гранулирования. Описанная в патенте башня для получения гранул карбамида имеет окна, через которые проходит атмосферный воздух при температуре и влажности окружающей среды и попадает в камеру противотока. Также имеется вспомогательный поток воздуха, который также подается в грануляционную башню или башню приллирования через щели или зазоры. Преимуществом в использовании данного патента является наличие вспомогательного потока, который способен охладить гранулы карбамида. Главным недостатком является то, что основной и вспомогательный поток в весенне-летний, летний и летне-осенний период будет иметь температуру 40°C, что является прямым нарушением оптимального режима атмосферного воздуха перед подачей в грануляционную или приллированную башню.

В патенте № 4 описывается способ и устройство для гранулирования карбамида, который заключается в нескольких вариантах подачи атмосферного воздуха в грануляционную башню, один из которых является поток свежего охлаждающего воздуха (вторичный или дополнительный поток), а второй поток – основной, направленный на отверждение капелек плава карбамида. Два потока разделяют перегородкой или стенкой, которая имеет соответствующие отверстия или прорези. Применяя данное изобретение, отмечаются преимущества и недостатки, заключающиеся в том, что получаемые гранулы, которые проходят вторичный поток воздуха, охлаждаются оптимальным режимом. Гранулы, которые проходят основной поток воздуха, будут охлаждаться не полностью.

В патенте № 5 описывается способ подачи атмосферного воздуха через направляющие пластины, которые монтируются с различными углами наклона, что обеспечивает распределение всего восходящего потока воздуха в нескольких направлениях по всему диаметру грануляционной башни.

Направляющие пластины устанавливаются в окна грануляционной башни. Преимуществом в использовании данного патента является качественное распределение восходящего потока атмосферного воздуха в нескольких направлениях по всему сечению грануляционной башни. Существенным недостатком является нарушение оптимального режима атмосферного воздуха перед подачей в грануляционную башню.

В патенте № 6 описывается способ охлаждения гранул с помощью аппарата псевдожиженного слоя с горизонтальным перемещением гранул. Преимуществом в использовании данного патента является охлаждение воздушного потока с температурой 40°C, за счет тонкого распыления воды, что способствует получить охлаждающий воздух с температурой 33-34°C в грануляционной башне. К недостаткам в использовании данного изобретения стоит отнести влажностный режим охлаждающего воздуха.

Интересным для рассмотрения являются патенты №2 и №6. Используя их на стадии гранулирования можно столкнуться с проблемами в реализации, получив при этом некачественный продукт. Частично проблема с подачей оптимального режима воздуха в грануляционную башню будет решена, но не полностью. Поэтому для дальнейшей работы выполним анализ литературных источников в сравнении с патентным поиском, дабы убедиться в эффективности применения тех или иных изобретений на стадии гранулирования.

Теоретическая основа для составления анализа литературных источников послужила статья из сборника международной научно-практической конференции 2019 г. [21, с. 72], а именно научная статья кандидата технических наук, доцента кафедры КубГТУ Шамарова М. В. и студента 3 курса направления «Холодильная криогенная техника и системы жизнеобеспечения» Сазоненко В. М.

Согласно авторам статьи для качественного охлаждения азотных удобрений применяется абсорбционная холодильная машина (АБХМ). В других литературных источниках АБХМ также называют абсорбционная

бромистолитиевая холодильная машина или абсорбционный чиллер [1]. «Данная машина предназначена для отбора и удаления избыточного тепла и поддержания заданного оптимального температурного и теплового режимов при работе различного рода производственного оборудования, технологических устройств, инструмента, оснастки, а также технологических процессов, связанных с повышенными тепловыми нагрузками. В качестве абсорбента в них используются различные растворы, например, бромида лития (LiBr) в воде» [1].

Рассмотрим практическое применение абсорбционной холодильной машины на примере завода Череповецкого комплекса АО «Апатит». Согласно источнику «в теплый период года, когда температура наружного воздуха повышается, охладить удобрения становится невозможным – попадая на кипящий слой/барабаны, частицы не успевают достаточно охладиться и склеиваются между собой на складе. Та часть удобрений, которая успела остыть и не склеилась, идет на расфасовку, остальное попадает в брак. По этой причине в весеннее и летнее время на заводе приходилось ограничивать выработку продукции – в кипящий слой и барабаны поступало значительно меньше удобрений, чтобы они успевали охлаждаться, но и это не защищало от брака. В результате предприятие в теплое время года несло убытки» [25].

На рисунке 3 показана диаграмма данных стадии гранулирования, на которой указана работа установки до монтажа «абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) на предприятии АО «Апатит» [17].



Рисунок 3 – Диаграмма данных работы установки до монтажа абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) на предприятии АО «Апатит»

Из данной диаграммы видно, что фактическая достигнутая мощность установки отклоняется в худшую сторону от проектных показателей на:

- за май, отклонение на - 271 т/сут;
- за июнь, отклонение на - 406 т/сут;
- за июль, отклонение на - 390 т/сут;
- за август, отклонение на - 318 т/сут;
- за сентябрь, отклонение на - 151 т/сут.

«Чтобы решить данную проблему российский химический холдинг «ФосАгро», который ориентирован на модернизацию и расширение производственных мощностей, встал вопрос о решении проблемы охлаждения производственного цикла гранулирования, с применением абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ)» [15]. На

рисунке 4 изображена абсорбционная холодильная машина, которая применяется на заводе Череповецкого комплекса АО «Апатит».



Рисунок 4 – Абсорбционная холодильная машина (АБХМ)

Поставщиком данного оборудования является промышленная холодильная компания ООО «Энергия холода», а также индийский инженерный конгломерат Thermax Ltd. Именно эти два предприятия выпускают большое количество разноплановых абсорбционных холодильных машин.

«Благодаря эффективной системе холодоснабжения на предприятии смогли запустить производство на полную мощность, а также добились непрерывного круглогодичного цикла производства удобрений, что позволило увеличить выработку продукции и исключить брак изделий, возникающий из-за недостаточной температуры охлаждающего воздуха.

На рисунке 5 показана диаграмма данных стадии гранулирования, на которой указана работа установки с использованием абсорбционной

бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) на предприятии АО «Апатит».



Рисунок 5 – Диаграмма данных работы установки с использованием абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) на предприятии АО «Апатит»

Из данной диаграммы видно, что фактическая достигнутая мощность установки отклоняется в лучшую сторону от проектных показателей на:

- за май, отклонение на + 194 т/сут;
- за июнь, отклонение на + 31 т/сут;
- за июль, отклонение на + 54 т/сут;
- за август, отклонение на + 119 т/сут;
- за сентябрь, отклонение на + 154 т/сут.

Со времени ввода в эксплуатацию система себя окупала уже не один раз. После внедрения системы холодоснабжения на предприятие многие производители минеральных удобрений обратились в компанию «Энергия холода» за подобным решением. На данный момент, компания разрабатывает несколько похожих проектов на предприятиях России, Белоруссии и Казахстана» [2].

Вывод по теоретической части.

Благодаря проведенному анализу литературных источников и выполненному патентному поиску, можно сделать вывод, о том, что на сегодняшний день существует много способов оптимизации стадии гранулирования карбамида, направленные на повышение производительности до проектных мощностей.

Исходя из цели и поставленных задач в рассматриваемой выпускной квалификационной работе, решить проблему с охлаждением гранул возможно с применением абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ).

Для дальнейшей работы выполним анализ технологической схемы цеха 08К предприятия АО «ТольяттиАзот», а также рассмотрим недостатки на стадии гранулирования карбамида.

2 Технологическая часть

2.1 Анализ технологической схемы стадии гранулирования цеха 08К предприятия АО «ТольяттиАзот»

2.1.1 Характеристика получаемого карбамида и его физико-химические свойства

Выпускаемый карбамид в цехе 08К изготавливается в соответствии с требованиями настоящего технологического регламента [19] и по своим физико-химическим показателям соответствует требованиям и нормам, согласно ГОСТ 2081-2010 [7]. В соответствии с нормами и требованиями к предъявляемой готовой продукции, карбамид выпускается под марками А и Б. Также готовый карбамид отвечает всем требованиям по физико-химическим показателям указанные в таблице 1, 2, 3, согласно ГОСТ 2081-2010 [7]. В цехе 08К карбамид выпускается гранулированным способом, а гранулы карбамида имеют белый цвет.

Согласно исследованиям, проведенные лабораторией предприятия, выпускаемый карбамид содержит в своем составе 46,6% азота. Не растворим в хлороформе. Благодаря исследованиям, также было выявлено то, что получаемый карбамид в виде гранул в водной среде хорошо растворяется, а также обладает слабощелочными свойствами. При повышении температуры водной среды от 0 до 120°C, карбамид растворяется от 40 до 95% от своего веса. Также «карбамид хорошо растворим в жидком аммиаке, образуя при этом соединение» [16]:



«Данное соединение содержит в своем составе 71,9 карбамида и 21,1% аммиака. Также как и в воде при нагревании жидкого аммиака от - 30°C до +108,5, карбамид растворяется от 17,9 до 91,9% от своего веса. В метиловом

и этиловом спирте, полученный карбамид в цехе 08К растворяется намного хуже, менее 25% от своего веса» [27].

Также карбамид может и разлагаться, благодаря нагреванию выше 132,7°C при атмосферном давлении, приводя к образованию биурета. При повышенных температурах от 180-190°C происходит процесс разложения на циановую кислоту, аммелида, аммелина, меламина и того же биурета. Если в составе находится избыточный аммиак, то процесс разложения протекает медленнее.

Рассмотрим схему и описание стадии гранулирования карбамида (получение готовой продукции) в цехе 08К на предприятии АО «ТольяттиАзот».

2.1.2 Технологическая схема и описание стадии гранулирования карбамида

С помощью двух насосов 11-Р-8А и 11-Р-8В плава карбамида подается в грануляционные корзины 1-МЕ-8А и 11-МЕ-8В. Грануляционные корзины вращаются в грануляционной башне, а их вращение контролируется дистанционно на ЦПУ. Данное решение позволяет изменять скорость подачи плава в грануляционную башню с помощью электроприводов. Вращающиеся грануляционные корзины способствуют равномерному распределению плава по всему сечению аппарата гранулирования. Полученные капли плава охлаждаются с помощью подачи атмосферного воздуха, после чего кристаллизуются в форме гранул диаметром от 1 до 4 мм.

В жаркие периоды года, когда температура воздуха превышает проектных отметок, используют установку – аэрохладитель, которая выполняет функцию охлаждения гранул. Данное решение позволяет охладить полученные гранулы с температурой от 70-60°C до 40-30 °С. Согласно технологическому регламенту цеха 08К, для охлаждения 1400 тонн готовой продукции карбамида в сутки, в аэрохладитель подается атмосферный воздух в количестве 4056 кг/сутки.

Принцип действия аэроохладителя заключается в следующем. «Гранулированный карбамид от грануляционной башни поступает на транспортер 11-МТ-2 и с помощью него доставляется в течку аэроохладителя, в котором установлен шибер. Далее гранулированный карбамид попадает на перфорированную рабочую решетку с диаметром отверстий 4 мм, а внизу аэроохладителя подается атмосферный воздух с помощью вентиляторов 11-ЕА-8В, 11-ЕА-8D и 11-ЕА-8А типа ВДН 17» [28]. В нижней части аэроохладителя, где проходит атмосферный воздух, также установлена решетка с диаметром отверстий 20 мм. Данное решение позволяет облегчить движение гранул по решетке аэроохладителя, а также дополнительно снять тепло с них. Гранулированный карбамид постепенно начинает охлаждаться, а время проведения гранул в аэроохладителе составляет около 10 минут. После этого полученный гранулированный карбамид направляется на транспортер 51-МТ-1А и 51-МТ-1В и далее на склад или на отгрузку в железнодорожные вагоны.

Для отработки запыленного воздуха, после аэроохладителя, применяется скруббер 11-С-5, имеющий орошающую систему, по которой подается циркуляционный раствор карбамида из сборника 11-V-7 центробежным насосом 11-Н-5. Загрязненный воздух после аэроохладителя имеет содержание пыли не более 1 г/м^3 . Полученный очищенный воздух перекачивается вентилятором 11-ЕА-8С и попадает на свечу. «Раствор, насыщенный пылью карбамида, проходит через отверстия решеток и выводится через сливной штуцер в циркуляционный сборник и возвращается на выпарку» [19].

«Плав от насосов 11-Р-8А, 11-Р-8В при остановке отделения и пуске отделения выпарки направляется через линию циркуляции в сборник 11-V-4В. Согласно рисунку 4 операция перевода плава к корзине гранулятора и на циркуляцию выполняются дистанционно, с помощью системы трехходовых клапанов 11-НС-15. При переводе плава к корзине открывается клапан 11-НС-15АВ на корзину, клапаном 11-НС-15С переключается подача пара с

корзины в линию циркуляции позиция 11-V-4В. Клапан 11-HS-15С выполняет функцию подачи пара к корзине гранулятора» [19].

«Раствор карбамида от насоса 11-Р-9А и 11-Р-9В фильтруется от механических примесей в фильтрах 11-FI-1А и 11-FI-1В и подается в сборник 11-V-4В. В сборнике карбамида 11-V-4В собирается раствор карбамида из колонны дистилляции III ступени (при остановке грануляции) и из бака 11-V-4А. Из сборника раствор карбамида забирается центробежным насосом 11-Р-20А и 11-Р-20В и подается на упаривание в испаритель I ступени выпарки 11/14-Е-14» [19]. На рисунке 6 изображена технологическая схема стадии гранулирования карбамида цеха 08К предприятия АО «ТольяттиАзот».

Недостатки проведения процесса гранулирования карбамида при повышенной температуре атмосферного воздуха в жаркие периоды года:

- снижение получения готовой продукции в весенне-летний, летний и летне-осенний период из-за нарушения подачи оптимального режима воздуха в грануляционные башни;

- образование большого количества брака (около 30%) в весенне-летний, летний и летне-осенний период, который не соответствует межгосударственному стандарту ГОСТ 2081-2010 [7], если выполнять процесс, согласно проектным мощностям;

- некачественное охлаждение гранул в весенне-летний, летний и летне-осенний период;

- с течением времени карбамид на складе и ж/д вагонах после засыпания начинают склеиваться между собой, из-за недостаточного испарения влаги внутри гранул.

На рисунке 7 изображены последствия на стадии гранулирования цеха 08К, связанные с нарушением подачи оптимального режима воздуха в грануляционные башни.

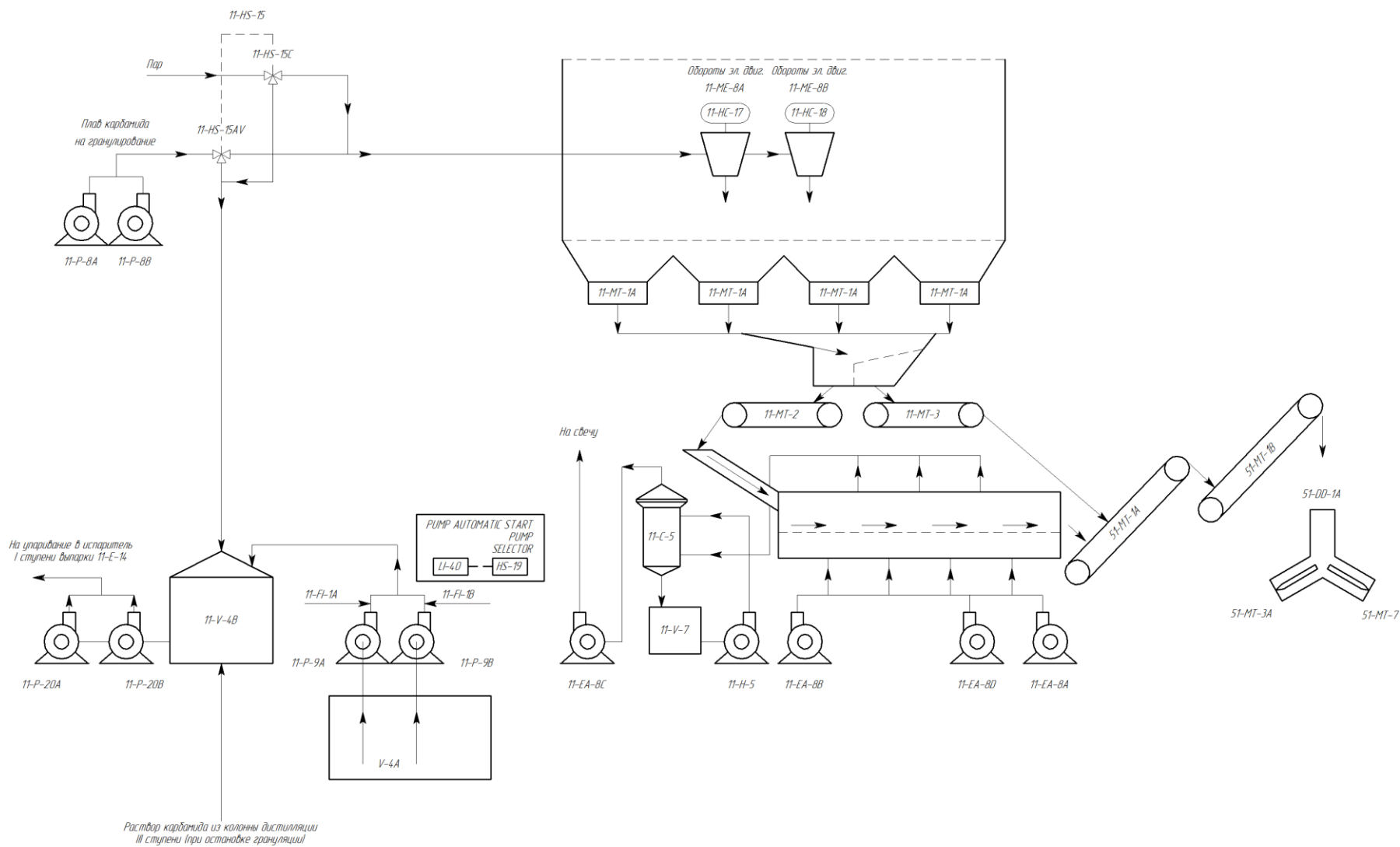


Рисунок 6 – Технологическая схема стадии гранулирования карбамида цеха 08К предприятия АО «ТольяттиАзот»



Рисунок 7 – Недостатки цеха 08К на стадии гранулирования

Для устранения данных недостатков предлагается решение использовать абсорбционную бромистолитиевую холодильную машину (АБХМ). Рассмотрим принцип работы устройства АБХМ, которая используется на заводе Череповецкого комплекса АО «Апатит» на стадии гранулирования, какие функции она выполняет и в каких областях данный аппарат может применяться.

2.2 Принцип работы устройства абсорбционно-холодильной машины, ее функции и применение

«АБХМ представляет собой холодильную установку, работающую за счет тепловой энергии, а не электричества. Источником тепловой энергии может служить горячая вода, выхлопные газы, пар, природный газ и другие виды топлива, в зависимости от типа АБХМ и ее назначения. Принцип действия АБХМ основан на определенных свойствах хладагента и абсорбента, которые обеспечивают отвод тепла, охлаждение и поддержание необходимого температурного режима. В качестве хладагента в АБХМ Thermax используется вода, а в качестве абсорбента – концентрированный

раствор бромида лития LiBr. Эти жидкости не токсичны, что делает АБХМ Thermax безопасной в применении» [1].

«Принцип работы устройства АБХМ представляется следующими действиями.

1. Вода-хладагент поступает в левую часть камеры — «Испаритель». Внутри, в условиях глубокого вакуума при температуре около 3°C, происходит процесс кипения хладагента, который отводит тепло из охлаждаемой воды, циркулирующей по трубкам теплообменника. Этот процесс непосредственно охлаждает воду, циркулирующую в теплообменнике (вода охлажденная) и выполняет главную задачу, стоящую перед АБХМ». На рисунке 8 изображен процесс охлаждения воды [1].

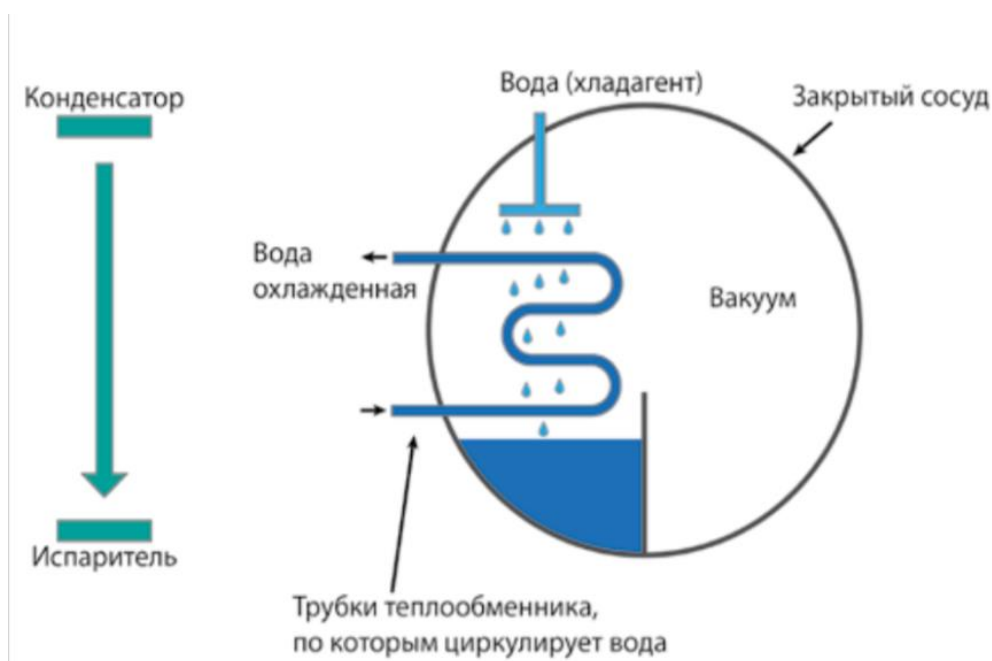


Рисунок 8 – Процесс охлаждения воды

2. «Капли концентрированного раствора бромида лития LiBr попадают в правую часть камеры («Абсорбер») и абсорбируют пары воды-хладагента. Полученный после процесса абсорбции раствор собирается на дне камеры. Этот процесс обуславливает принцип действия АБХМ и дает ей возможность работать без серьезных энергетических затрат. На рисунке 9 изображен процесс абсорбции [25].

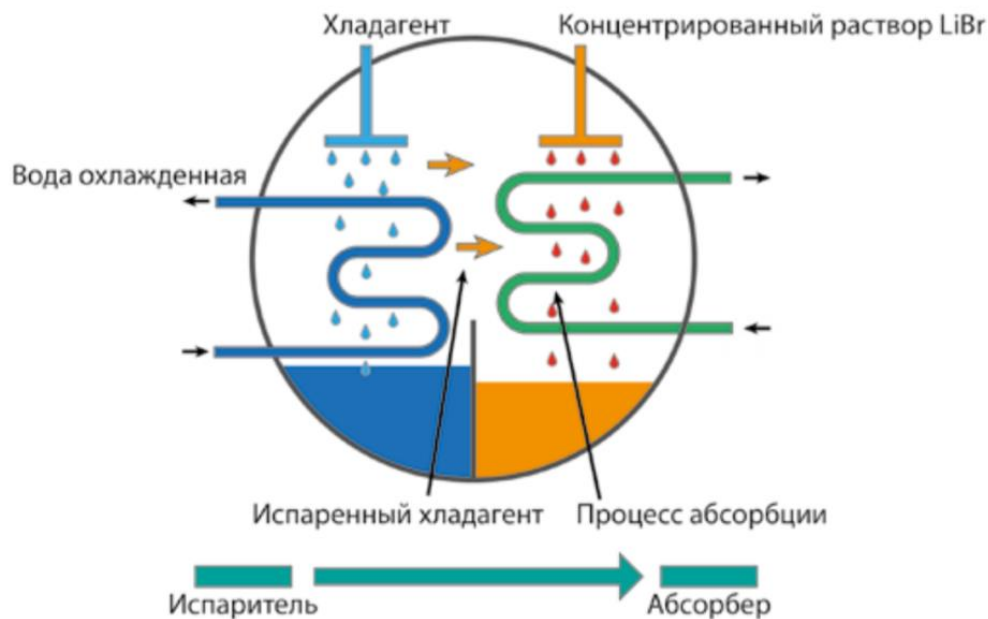


Рисунок 9 – Процесс абсорбции

Раствор бромида лития, полученный после абсорбции, направляется в генератор при помощи насоса. Там под воздействием тепла из него выпаривается часть воды. Это восстанавливает изначальную концентрацию LiBr в растворе, что нужно для поддержания его абсорбирующих свойств [26]. На рисунке 10 изображен процесс нагрева абсорбента.

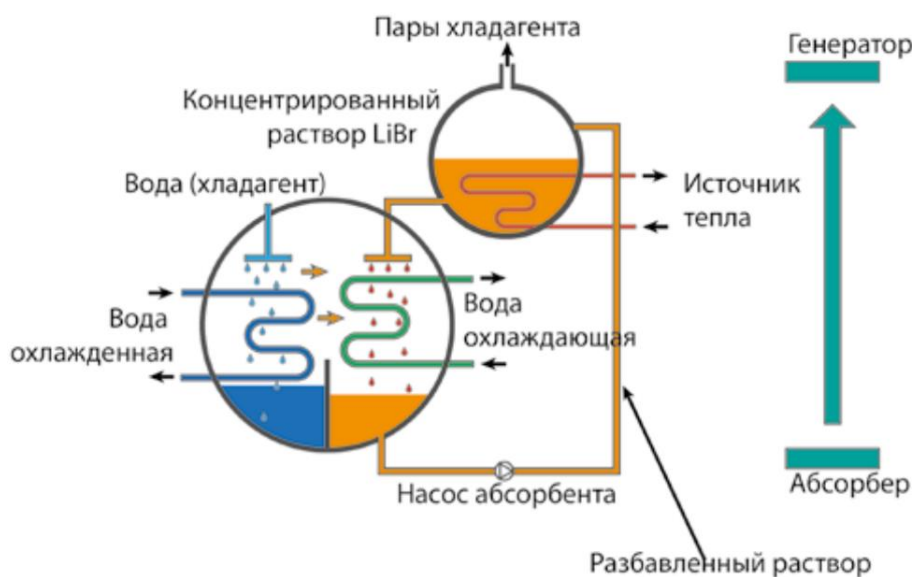


Рисунок 10 – Процесс нагрева абсорбента



Рисунок 11 – Процесс конденсации хладагента

В конденсаторе происходит процесс конденсации паров воды-хладагента из генератора. Далее, эта вода-хладагент вновь попадает в «Испаритель» (левую часть камеры) и испаряется [11], забирая тепло из теплообменных трубок с охлажденной водой. На рисунке 11 изображен процесс конденсации хладагента.

2.3 Преимущества в использовании АБХМ

Абсорбционно-холодильная машина способна выдать минимальную температуру охлаждения воды до -5°C . «Срок безаварийной работы при сохранении заявленных параметров составляет более 25 лет. Низкое потребление электроэнергии – 5 кВт электроэнергии для получения 1000 кВт холода. Кроме того, в отличие от конкурентов, технология, реализованная в АБХМ Thermax, позволяет предотвратить кристаллизацию до её начала» [2]. Имеется возможность производства горячей воды одновременно с холодной водой. «Холодная вода идет на нужды кондиционирования, горячая — на нужды отопления и горячего водоснабжения. Пропадает необходимость в установке бойлеров и котлов. Не требуется капитальный ремонт, так как

трубы генератора выполнены из нержавеющей стали SS-430 Ti с титановой стабилизацией. Это исключает необходимость замены труб и капитального ремонта АБХМ. Производство труб – Sholler (Германия), срок службы – более 25 лет» [2].

2.4 Предлагаемая схема оптимизации гранулирования карбамида

Особенностью существующего производства является наличие на производственной площадке трубопровода с водой от градирень. Данный источник, стоит использовать в качестве хладагента, для последующего процесса охлаждения атмосферного воздуха. АБХМ будет являться вспомогательным оборудованием в технологическом процессе получения гранулированного карбамида. Вид продукции АБХМ – искусственно созданный холод, имеющий оптимальный температурный режим 5-10°C.

На рисунке 12 изображена предлагаемая установка стадии гранулирования карбамида, с включением дополнительного оборудования.

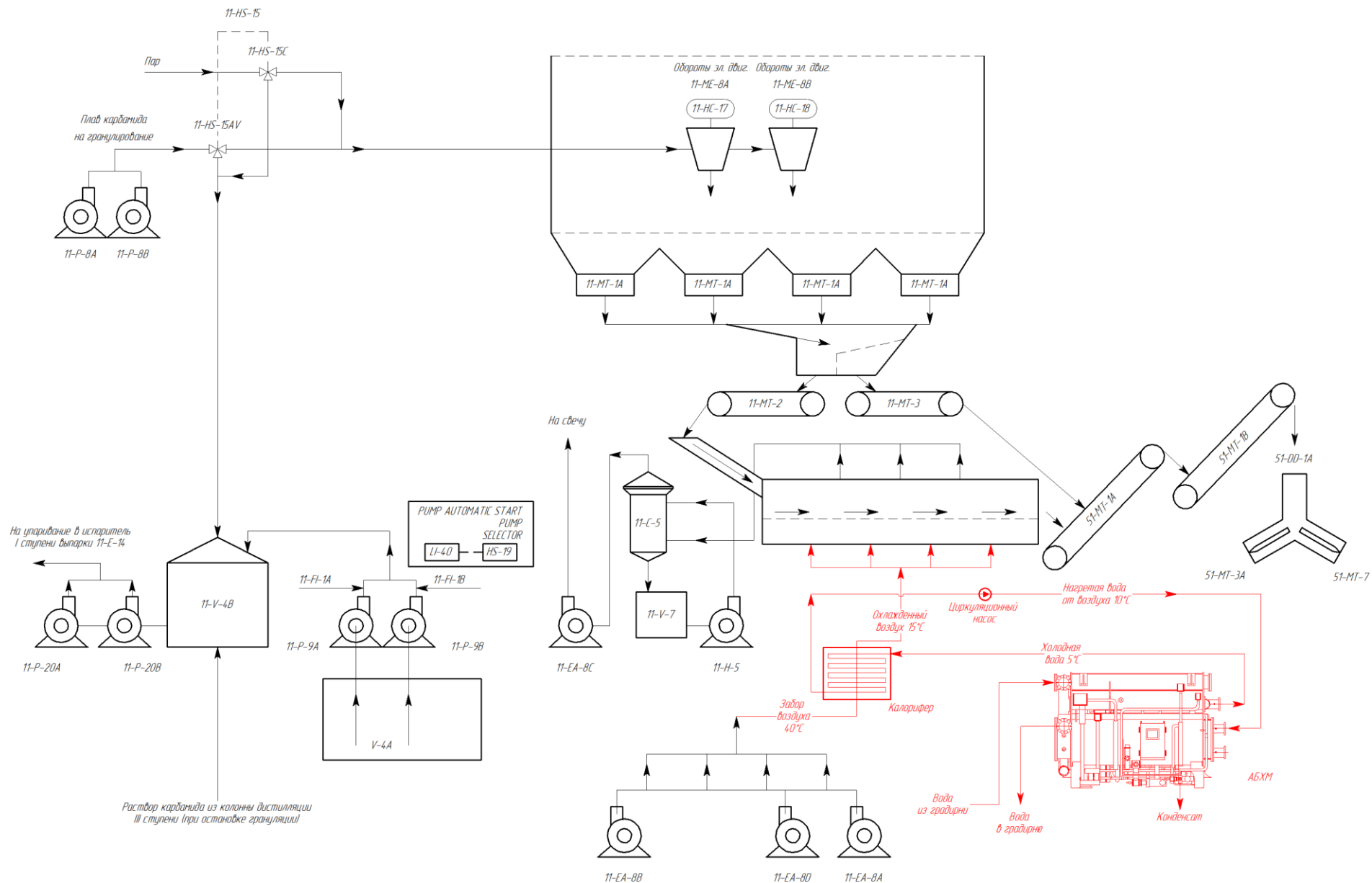


Рисунок 12 – Оптимизация стадии гранулирования карбамида

На рисунке 12 красным цветом указана предлагаемая оптимизация, в которую входят следующие аппараты:

- абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина (АБХМ);
- калорифер типа ВО (воздухоохладитель), через который будет проходить контур охлажденной вода от АБХМ;
- циркуляционный насос, предназначенный для циркуляции контура охлажденной воды между АБХМ и калорифером.

Калориферы типа ВО предназначены для охлаждения воздуха, в основу которого используется хладагент – вода. Калорифер, применяемый в промышленности, называется водяным воздухоохладителем. Теплообменник воздухоохладителя оснащен гладкими либо оребренными трубами, имеет патрубки входа/выхода воды и воздуха. Все трубы теплообменника заключены в корпус: по бокам устанавливаются торцевые плиты, а сверху монтируются герметичные крышки, которые позволяют избавиться от потерь количества нагнетаемого воздуха от вентиляторов.

Калориферы типа ВО также оснащаются специальными пробками, которые служат для быстрого стравливания воздуха из корпуса воздухоохладителя. Также в теплообменной части устанавливается пробка для слива воды из циркуляционной системы.

Корпус калорифера изготавливается из углеродистой и нержавеющей стали. Трубы теплообменника выполняются из меди, латуни или стали. В некоторых случаях используют однофазный сплав меди с сочетанием с никелем. Такой сплав называется мельхиор.

Принцип действия калорифера типа ВО, заключается в том, что вода, поступающая в теплообменник проходит трубы, при этом снимает излишнюю температуру воздуха, который подается в межтрубное пространство калорифера. На рисунке 13 изображен наглядный принцип работы воздухоохладителя.

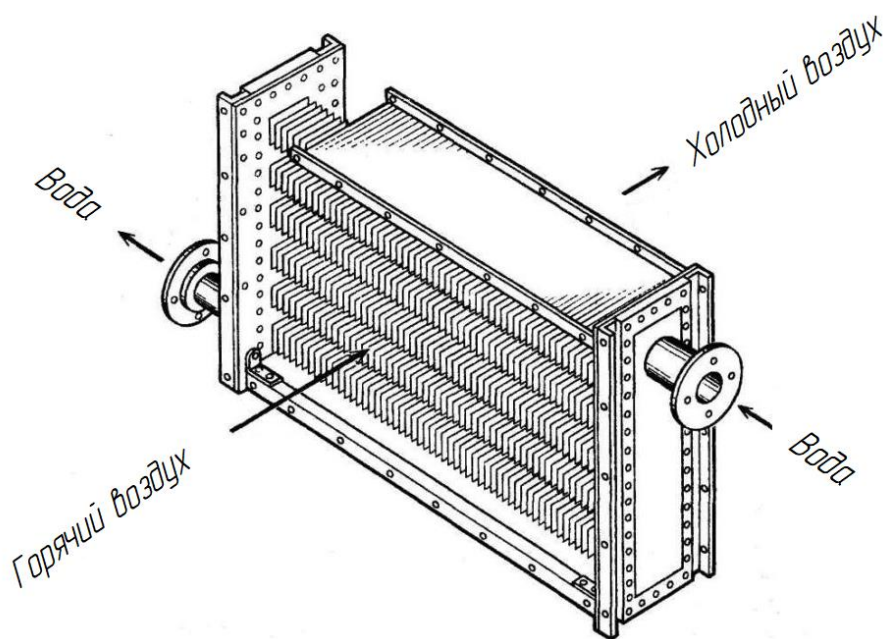


Рисунок 13 – Принцип работы калорифера типа ВО

Вывод по технологической части.

Использование АБХМ даст возможность охладить воздух до оптимальной температуры, используя при этом магистраль воды от градирни в качестве хладагента. Предлагаемая оптимизация позволит достаточно охладить гранулы перед подачей их на транспортеры (позиции 51-МТ-1А и 51-МТ-1В).

Для дальнейшей работы выполним расчет абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины и калорифера, чтобы определить количество подаваемой холодной воды, для охлаждения забираемого воздуха температурой 40°C с максимальным подаваемым объемом $169 \text{ м}^3/\text{ч}$ в аэрохладитель, вентиляторами позиций 11-ЕА-8В, 11-ЕА-8D и 11-ЕА-8А. Выполним расчет циркуляционного насоса.

3 Расчетная часть

3.1 Расчет абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ)

Расчет АБХМ будет выполняться по методическому пособию авторов Бабмушка Е. М., Бухарина Н. Н., Герасимова Е. Д. и Сакуна И. А [3].

Для расчета рассмотрим схему тепловых потоков, а также процессы (ξ -i диаграмма), которые проходят в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. указанные на рисунке 14.

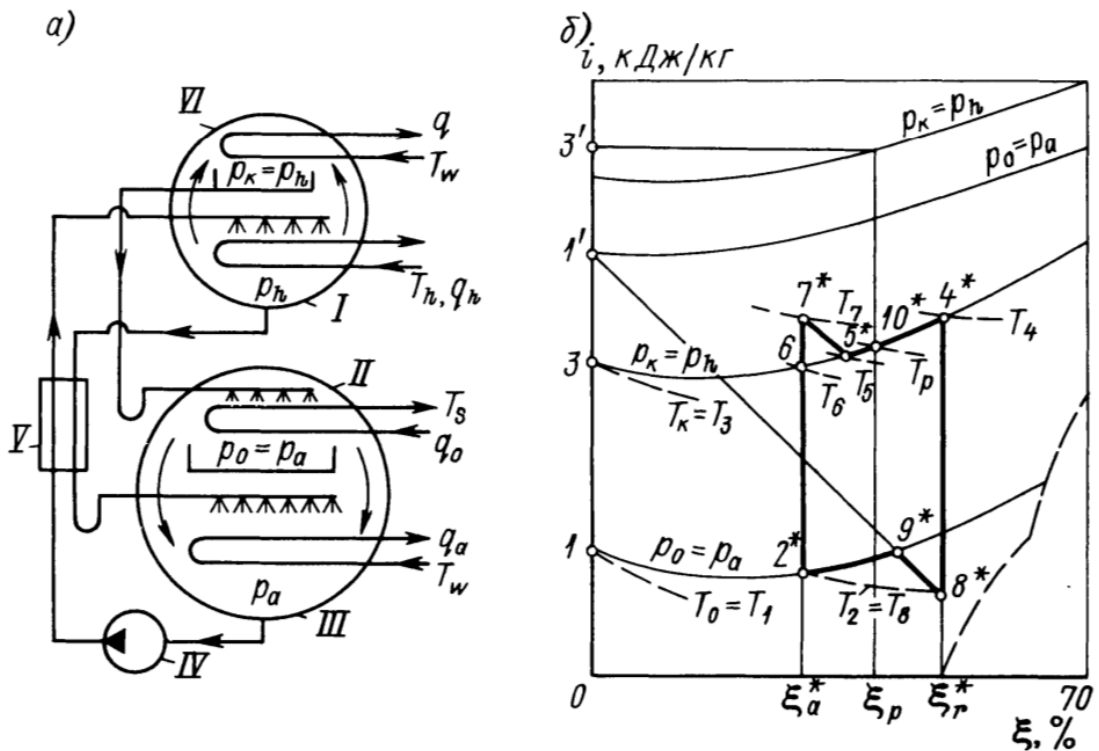


Рисунок 14 – Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина

а) схема тепловых потоков АБХМ; б) процессы в ξ – i диаграмме

I – генератор, II – испаритель, III – абсорбер, IV – насос слабого раствора, V – теплообменник, VI – конденсатор

Исходные данные:

- температура греющего источника (вода), которая будет использоваться для генератора – $T_{\text{н}} = 358\text{K}$ (85°C);
- температура охлаждающей воды (подача воды от градирни) – $T_{\omega} =$

293К (20°C);

- температура охлаждаемого объекта (вода), которая будет подаваться для охлаждения воздуха – $T_s = 278\text{К}$ (5°C).

«Высшая температура в конце процесса кипения раствора в генераторе» [3]:

$$T_4 = T_h - \Delta T_h$$

где: ΔT_h – разность температур, $\Delta T_h = 10 \div 20$ К, в зависимости от типа генератора, тогда:

$$T_4 = 358\text{К} - 15\text{К} = 343\text{К}$$

«Температура конденсации при условии параллельной подачи воды в абсорбер и конденсатор» [3]:

$$T_k = T_\omega + \Delta T_\omega$$

где: ΔT_ω – разность температур, $\Delta T_\omega = 8 \div 10$ К, тогда:

$$T_k = 293 + 9 = 302\text{К}$$

Давление конденсации пара в конденсаторе определяют по диаграмме концентрация-энтальпия ($\xi - i$) для водного раствора бромистого лития в области жидкости при $\xi = 0$ и $T_k = 302\text{К}$ [8]:

$$p_k = 4,05\text{КПа}$$

«При отсутствии гидравлических сопротивлений прохождению пара из генератора в конденсатор, давление кипения раствора в генераторе принимается равным давлению в конденсаторе, то есть» [3]:

$$p_h = p_k = 4,05\text{КПа}$$

«Низшая температура раствора в конце процесса абсорбции пара в

абсорбере» [3]:

$$T_2 = T_\omega + \Delta T_a$$

где: ΔT_a – разность температур, ΔT_a принимается в пределах 8 – 15 К. Тогда:

$$T_2 = 293 + 12 \text{ К} = 305 \text{ К}$$

«Температура кипения воды в испарителе» [3]:

$$T_0 = T_s - \Delta T_s$$

где: ΔT_s – разность температур, ΔT_s принимается в пределах 2 – 5 К. Тогда:

$$T_0 = 278 - 3 = 275 \text{ К}$$

Давление кипения в испарителе определяют по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара или по $\xi - i$ диаграмме (при $\xi = 0$, и $T_0 = 275 \text{ К}$) [20]:

$$p_0 = 0,705 \text{ кПа}$$

«При отсутствии гидравлических сопротивлений прохождению пара из испарителя в абсорбер давление в абсорбере принимается равным давлению в испарителе, т. е. $p_a = p_0 = 0,705 \text{ кПа}$. Температура крепкого раствора на выходе из теплообменника при отсутствии в нем недорекуперации теплоты» [3]:

$$T_8 = T_2 = 305 \text{ К}$$

С помощью диаграммы $\xi - i$ источника [8], находим параметры узловых точек, согласно рисунку 14б по найденным значениям температур и давления. Параметры узловых точек циклов, изображены на рисунке 15, 16 и в таблице 5.

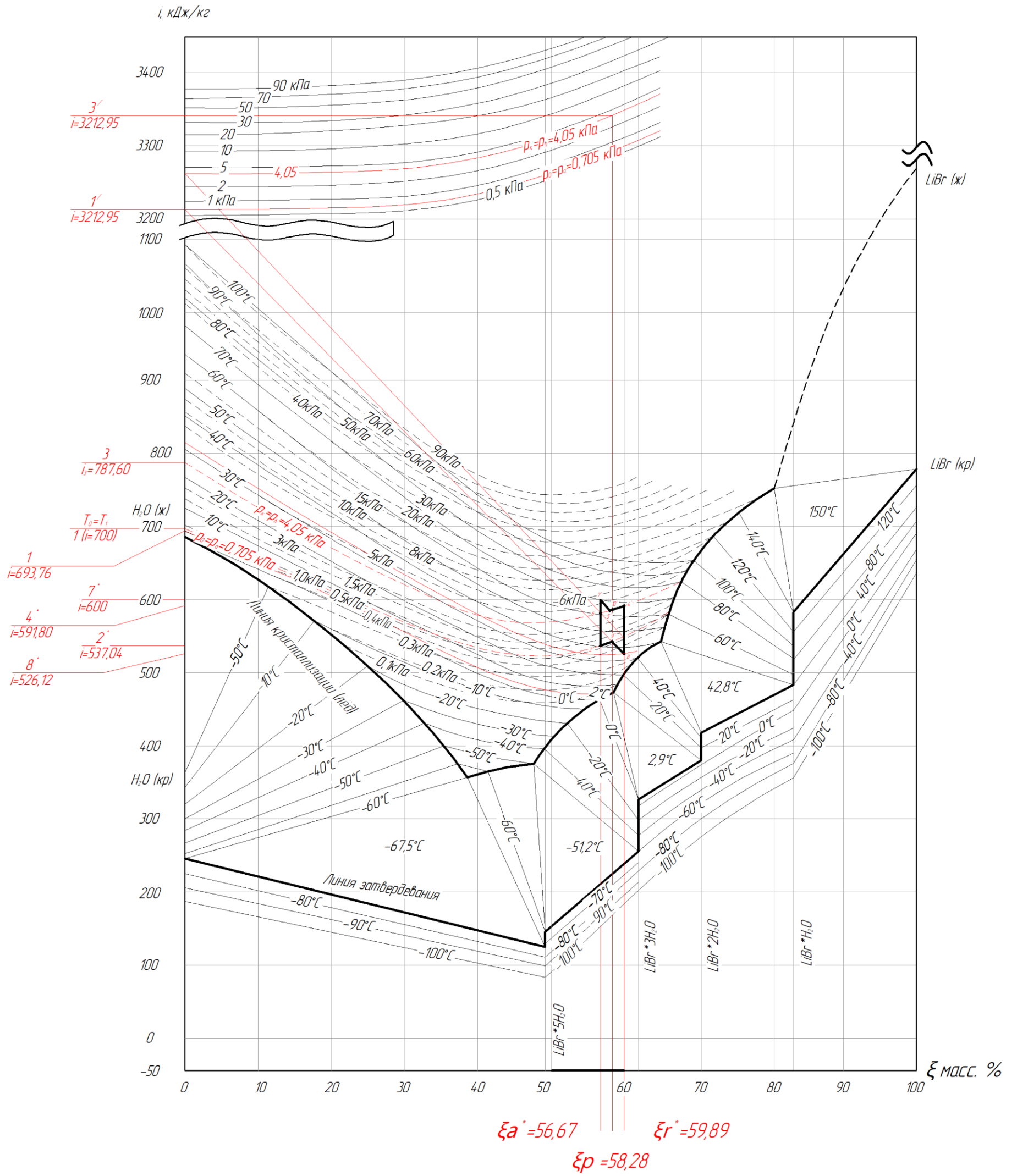


Рисунок 15 – Параметры узловых точек циклов

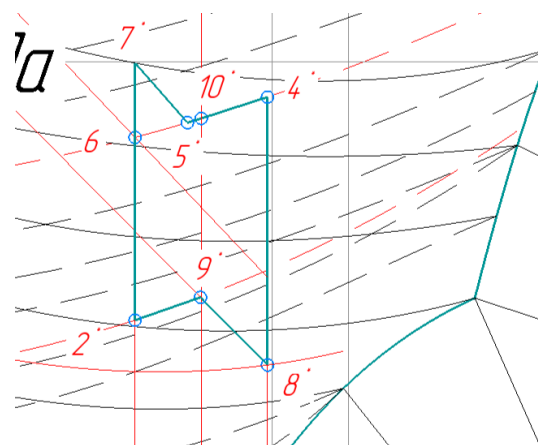


Рисунок 16 – Укрупненный рисунок узловых точек циклов

Таблица 5 – Параметры узловых точек

Состояние вещества	T, К	p, кПа	ξ , %	i, кДж/кг
Вода после конденсации раствора	$T_k = T_3 = 302$	$p_k = 4,05$	$\xi = 0$	$i_3 = 787,60$
Раствор:				
- крепкий после генератора	$T_4 = 343$	$p_h = 4,05$	$\xi_r^* = 59,89$	$i_4^* = 591,80$
- слабый после абсорбции	$T_2 = 305$	$p_a = 0,705$	$\xi_a^* = 56,67$	$i_2^* = 537,04$
- крепкий после теплообменника	$T_8 = 305$	$p_h = 4,05$	$\xi_r^* = 59,89$	$i_8^* = 526,12$
Вода в испарителе	$T_0 = T_1 = 275$	$p_0 = 0,705$	$\xi = 0$	$i_1 = 700,00$
Пар:				
- после испарителя	$T_1 = T_0 = 275$	$p_0 = 0,705$	$\xi = 0$	$i_1' = 3212,95$

«Кратность циркуляции раствора» [3]:

$$f^* = \frac{\xi_r^*}{(\xi_r^* - \xi_a^*)}$$

$$f^* = \frac{59,89}{(59,89 - 56,67)} = 18,60 \text{ кг/кг}$$

«Теплота теплообменника» [3]:

$$q_T^* = (f^* - 1) * (i_4^* - i_8^*)$$

$$q_T^* = (18,60 - 1) * (591,80 - 526,12) = 1155,97 \text{ кДж/кг}$$

«Энтальпия слабого раствора после теплообменника» [3]:

$$i_{7^*} = i_{2^*} + \frac{q_T^*}{f^*}$$

$$i_{7^*} = 537,04 + \frac{1155,97}{18,60} = 599,19 \text{ кДж/кг}$$

«По значению $i_{7^*} = 599,19$ кДж/кг при $\xi_a^* = 56,67\%$ по $\xi - i$ диаграмме определим положение точки 7* и температуру слабого раствора

на выходе из теплообменника» [3]:

$$T_7 = 343 \text{ К}$$

«В связи с тем, что слабый раствор на входе в генератор перегрет, в генераторе осуществляется сначала адиабатно-изобарный процесс десорбции ($7^* - 5^*$), в результате чего концентрация раствора увеличивается (т. 7^*), а температура его снижается до равновесной (т. 5^*). Температура точки (т. 5^*) выше равновесной (т. 6^*) при известных ξ_a^* , p_h : $T_5 = 339\text{К}$, $T_6 = 342\text{К}$.

Средняя температура раствора, кипящего в генераторе» [3]:

$$T_p = \frac{(T_4 + T_5)}{2}$$
$$T_p = \frac{(343 + 339)}{2} = 341\text{К}$$

Концентрация раствора, соответствующая температуре T_p (т. 10^*), $\xi_p = 58,28\%$.

«Энтальпия перегретого пара на выходе из генератора определяется по $\xi - i$ диаграмме при известных p_h и ξ_p : $i_{3/} = 3341,64$ кДж/кг. Теплота генератора» [3]:

$$q_h = i_{3/} + (f^* - 1) * i_{4^*} - f^* * i_{7^*}$$
$$q_h = 3341,64 + (18,60 - 1) * 591,80 - 18,60 * 599,19 = 2612,39 \text{ кДж/кг}$$

«Теплота испарителя» [3]:

$$q_0 = i_{1/} - i_3$$
$$q_0 = 3212,95 - 787,60 = 2425,35 \text{ кДж/кг}$$

«Теплота конденсатора» [3]:

$$q = i_{3/} - i_3$$
$$q = 3341,64 - 787,60 = 2554,04 \text{ кДж/кг}$$

«Теплота абсорбера» [3]:

$$q_a = i_{1'} + (f^* - 1) * i_{8^*} - f^* * i_{2^*}$$

$$q_a = 3212,95 + (18,60 - 1) * 526,12 - 18,60 * 537,04 = 2483,72 \text{ кДж/кг}$$

Абсорбция состоит из двух процессов:

- адиабатно-изобарный ($8^* - 9^*$);
- изобарный ($9^* - 2^*$).

«Теплота подведенная» [3]:

$$\sum q_{\text{подв.}} = q_h + q_0$$

$$\sum q_{\text{подв.}} = 2612,39 + 2425,35 = 5037,7 \text{ кДж/кг}$$

«Теплота отведенная» [3]:

$$\sum q_{\text{отв.}} = q + q_a$$

$$\sum q_{\text{отв.}} = 2554,04 + 2483,72 = 5037,7 \text{ кДж/кг}$$

«Тепловой коэффициент» [3]:

$$\zeta^* = \frac{q_0}{q_h}$$

$$\zeta^* = \frac{2425,35}{2612,39} = 0,928$$

Таким образом произведен расчет абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) и показана ее эффективность.

3.2 Расчет калорифера (воздухоохладитель)

Расчет калорифера выполнен по методическому пособию К. Ф. Павлова, П. Г. Романкова и А. А. Носкова [18].

Рассчитаем калорифер типа ВО (воздухоохладитель), для охлаждения

воздуха от +40°C до 8°C. Атмосферный воздух перед подачей в аэроохладитель, будет охлаждаться водой, которая подается от АБХМ с температурой 5°C. После прохождения теплообменника, вода имеет температуру 10°C. Режим течения воды в трубном пространстве теплообменника – турбулентный.

Переведем количество воздуха кг/сутки в кг/ч:

$$G_B = \frac{4056}{24} = 169 \text{ кг/ч}$$

«Средняя разность температур при противотоке» [18]:

$$+40^\circ\text{C} \rightarrow +8^\circ\text{C} \text{ (воздух)}$$

$$+10^\circ\text{C} \rightarrow +5^\circ\text{C} \text{ (воздух)}$$

$$\Delta t_{\text{б}} = 30^\circ\text{C} \quad \Delta t_{\text{м}} = 3^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{30 - 3}{2,3 \lg \frac{30}{3}} = 11,7^\circ\text{C} = 11,7\text{K}$$

«Средняя температура воды» [18]:

$$t_2 = \frac{10 + 5}{2} = 7,5^\circ\text{C}$$

«Средняя температура воздуха» [18]:

$$t_1 = t_2 + \Delta t_{\text{ср}}$$

$$t_1 = 7,5 + 11,7 = 19,2^\circ\text{C}$$

«Тепловая нагрузка с учетом потери холода в размере 5%» [18]:

$$Q = 1,05 * G_1 * c_1 (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}})$$

$$Q = 1,05 * 0,047 * 1005 * (40 - 8) = 1587,1 \text{ Вт}$$

где: $G_1 = \frac{169}{3600} = 0,047$ кг/с – массовый расход воздуха;

$c_1 = 1005$ Дж/(кг * К) – средняя удельная теплоемкость воздуха при $t_1 = 19,2^\circ\text{C}$ [6].

«Массовый расход воды» [18]:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2(t_{2к} - t_{2н})}$$
$$G_2 = \frac{1587,1}{4197,6 * (10 - 5)} = 0,076 \text{ кг/с}$$

где: $c_2 = 4197,6$ Дж/(кг * К) – удельная теплоемкость воды при $t_2 = 7,5^\circ\text{C}$ [10].

«Объемный расход воды» [18]:

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2}$$
$$V_2 = \frac{0,076}{1} = 0,076 \text{ м}^3/\text{с}$$

где: $\rho_2 = 1$ кг/м³ – плотность воды.

«Ориентировочно определяем максимальную величину площади поверхности теплообмена. По таблице 4.8 пособия минимальное значение коэффициента теплопередачи для водного теплообменника от газа к жидкости принимаем $K_{min} = 10$ (Вт/м² * К). При этом» [18]:

$$F_{\text{макс}} = \frac{Q}{K_{min} * \Delta t_{cp}}$$
$$F_{\text{макс}} = \frac{1587,1}{10 * 11,7} = 13,56 \text{ м}^2$$

«Для обеспечения устойчивого турбулентного течения воды в трубном пространстве при $Re_2 > 10000$ скорость в трубах должна быть больше ω'_2 » [18]:

$$\omega_2' = \frac{10000\mu_2}{d_2 p_2}$$

$$\omega_2' = \frac{10000 * 1,494 * 10^{-3}}{0,021 * 1} = 0,71 \text{ м/с}$$

где: $\mu_2 = 1,494 * 10^{-3}$ Па * с – динамический коэффициент вязкости воды при $t_2 = 7,5^\circ\text{C}$ [6].

$d_2 = 0,021$ м – внутренний диаметр труб.

«Число труб 25 x 2 мм, обеспечивающих объемный расход воды при $Re_2 = 10000$ » [18]:

$$n_2' = \frac{V_2}{0,785 * d_2^2 * \omega_2'}$$

$$n_2' = \frac{0,076}{0,785 * 0,021^2 * 0,71} \approx 310$$

Принимаем $n_2 = 261$.

I. «Коэффициент теплоотдачи для воды.

Уточняем значение критерия Re_2 » [18]:

$$Re_2 = 10000 * \frac{n_2'}{n_2}$$

$$Re_2 = 10000 * \frac{310}{261} = 11877,39$$

«Критерий Прандтля для воды при $t_2 = 7,5^\circ\text{C}$ » [18]:

$$Pr_2 = \frac{c_2 \mu_2}{\lambda_2}$$

$$Pr_2 = \frac{4197,6 * 1,494 * 10^{-3}}{0,573} = 10,94$$

где: $\lambda_2 = 0,573$ Вт/(м * К) – коэффициент теплопроводности воды при $t_2 = 7,5^\circ\text{C}$ [10].

«Для определения $Pr_{ст.2}$ принимаем ориентировочно» [18]:

$$t_{ст.2} = t_2 + \frac{\Delta t_{ср}}{2}$$
$$t_{ст.2} = 7,5 + \frac{11,7}{2} = 13,35^\circ\text{C}$$

При этой температуре $\mu_{ст.2} = 1,205 * 10^{-3}$ Па * с и $\lambda_{ст.2} = 0,582$ Вт/(м * К) и $c_{ст.2} = 4188$ Дж/(кг * К) [6]. Следовательно:

$$Pr_{ст.2} = \frac{4188 * 1,205 * 10^{-3}}{0,582} = 8,67$$

«Расчетная формула числа Нуссельта» [18]:

$$Nu_2 = 0,021 \varepsilon_l Re_2^{0,8} Pr_2^{0,43} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{ст.2}} \right)^{0,25}$$

«Значение ε_l принимается равным единице, полагая, что отношение L/d_2 будет больше 40. Таким образом» [18]:

$$Nu_2 = 0,021 * 1 * 11877,39^{0,8} * 10,94^{0,43} * \left(\frac{10,94}{8,67} \right)^{0,25} = 113,25$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_2}$$

$$\alpha_2 = \frac{113,25 * 0,573}{0,021} = 3090,10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

II. «Коэффициент теплоотдачи для воздуха

Объемный расход воздуха» [18]:

$$V_1 = \frac{169}{3600 * \rho_1}$$

$$V_1 = \frac{169}{3600 * 1,208} = 0,039 \text{ м}^3/\text{с}$$

где: $\rho_1 = 1,208$ кг/м³ – плотность воздуха при $t_1 = 19,2^\circ\text{C}$ [6].

«Скорость воздуха в межтрубном пространстве» [18]:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{2 * 0,785 * D^2}$$
$$\omega_1 = \frac{0,039}{2 * 0,785 * 0,025^2} = 39,75 \text{ м/с}$$

Критерий Рейнольдса для воздуха при $t_1 = 19,2^\circ\text{C}$:

$$Re_1 = \frac{\omega_1 * d_э * \rho_1}{\mu_1}$$
$$Re_1 = \frac{39,75 * 0,025 * 1,208}{0,181 * 10^{-3}} = 6632,32$$

где: $d_э = 0,025$ м – эквивалентный диаметр межтрубного пространства [5];

$\mu_1 = 0,181 * 10^{-3}$ Па * с – динамический коэффициент вязкости воздуха при $t_1 = 19,2^\circ\text{C}$ [10].

«Критерий Прандтля для воздуха при $t_1 = 19,2^\circ\text{C}$ » [18]:

$$Pr_1 = \frac{c_1 \mu_1}{\lambda_1}$$
$$Pr_1 = \frac{1005 * 0,181 * 10^{-3}}{0,0258} = 7,05$$

где: $\lambda_1 = 0,0258$ – коэффициент теплопроводности воздуха при $t_1 = 19,2^\circ\text{C}$ [10].

«Для определения $Pr_{ст.1}$ принимаем ориентировочно» [18]:

$$t_{ст.1} = t_1 - \frac{\Delta t_{ср}}{2}$$
$$t_{ст.1} = 19,2 - \frac{11,7}{2} = 13,35^\circ\text{C}$$

При этой температуре $c_{ст.1} = 1005$ Дж/(кг * К); $\mu_{ст.1} = 0,178 * 10^{-3}$ Па * с; $\lambda_{ст.1} = 0,0253$ Вт/(м * К) [6]. Следовательно:

$$Pr_{ст.1} = \frac{1005 * 0,178 * 10^{-3}}{0,0253} = 7,07$$

«По расчетной формуле имеем» [18]:

$$Nu_1 = 0,021 * Re_1^{0,8} * Pr_1^{0,43} \left(\frac{Pr_1}{Pr_{ст.1}}\right)^{0,25}$$

$$Nu_1 = 0,021 * 6632,32^{0,8} * 7,07^{0,43} * \left(\frac{7,05}{7,07}\right)^{0,25} = 55,53$$

Тогда:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 * \lambda_1}{d_3}$$

$$\alpha_1 = \frac{55,53 * 0,0258}{0,025} = 57,31 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

«Тепловая проводимость стенки и загрязнений» [18]:

$$\frac{1}{\sum r_{ст}} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{5800}} = 2578,39 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

«Коэффициент теплопередачи» [18]:

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{ст} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{57,31} + \frac{1}{2578,39} + \frac{1}{3090,10}} = 55,06 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

Уточняем значения $(Pr/Pr_{ст})^{0,25}$:

- определяем $\Delta t_1 = \frac{55,06 * 11,7}{\alpha_1} = \frac{55,06 * 11,7}{57,31} = 11,2 \text{ К} = 11,24 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{ст.1} =$

$$19,2 - 11,2 = 8^\circ\text{C}.$$

При $t_{ст.1} = 8^\circ\text{C}$ значения динамического коэффициента вязкости,

удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности воздуха будут:
 $\mu_{ст.1} = 0,175 * 10^{-3} \text{ Па} * \text{с}$, $c_{ст.1} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} * \text{К})$, $\lambda_{ст.1} = 0,0250 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К})$ [10]. Тогда:

$$Pr_{ст.1} = \frac{1005 * 0,175 * 10^{-3}}{0,0250} = 7,04$$

«Расчетное значение $(Pr/Pr_{ст.1})^{0,25} = (7,05/7,04)^{0,25} = 1$, а было принято 0,999. Внесем поправку в значение α_1 » [18]:

$$\alpha_1 = 57,31 * \frac{0,999}{1} = 57,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

- определим $\Delta t_2 = \frac{55,06 * 11,7}{\alpha_2} = \frac{55,06 * 11,7}{3090,10} = 0,21 \text{ К} = 0,21 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{ст.2} = 7,5 - 0,21 = 7,3^\circ\text{C}$.

При $t_{ст.1} = 7,3^\circ\text{C}$ значения динамического коэффициента вязкости, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности воды будут:
 $\mu_{ст.1} = 1,436 * 10^{-3} \text{ Па} * \text{с}$, $c_{ст.1} = 4198 \text{ Дж}/(\text{кг} * \text{К})$, $\lambda_{ст.1} = 0,573 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К})$ [10]. Тогда:

$$Pr_{ст.2} = \frac{4198 * 1,436 * 10^{-3}}{0,573} = 10,52$$

«Расчетное значение $(Pr/Pr_{ст.2})^{0,25} = (10,94/10,52)^{0,25} = 1,01$, а было принято 1,06. Внесем поправку в значение α_2 » [18]:

$$\alpha_2 = 3090,10 * \frac{1,06}{1,01} = 3243,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

«Таким образом, исправленное значение K » [18]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{57,25} + \frac{1}{2578,39} + \frac{1}{3243,08}} = 55,06 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

«Уточнение величин $(Pr_1/Pr_{ст.1})^{0,25}$ и $(Pr_2/Pr_{ст.2})^{0,25}$ привело к неизменяемости коэффициента теплопередачи.

Удельная тепловая нагрузка» [18]:

$$q = K * \Delta t_{cp}$$
$$q = 55,06 * 11,7 = 644,20 \text{ Вт/м}^2$$

«Расчетная площадь поверхности теплообмена» [18]:

$$F_p = Q/q$$
$$F_p = \frac{1587,1}{644,20} = 2,46 \text{ м}^2$$

Принимаем 261 труб длиной 1 м, располагаемых горизонтально, соединенные последовательно.

«Площадь поверхности теплообмена, определяемая по диаметру трубы» [18]:

$$F = \pi d_{cp} L n = 3,14 * 0,00525 * 261 * 1 = 4,30 \text{ м}^2$$

«Запас площади поверхности теплообмена» [18]:

$$\frac{4,30 - 2,46}{2,46} * 100 = 75\%$$

На схему теплопередачи наносим значения $\alpha_1, \alpha_2, q, t_{ст.1}, t_{ст.2}, t_1, t_2$, рисунок 17.

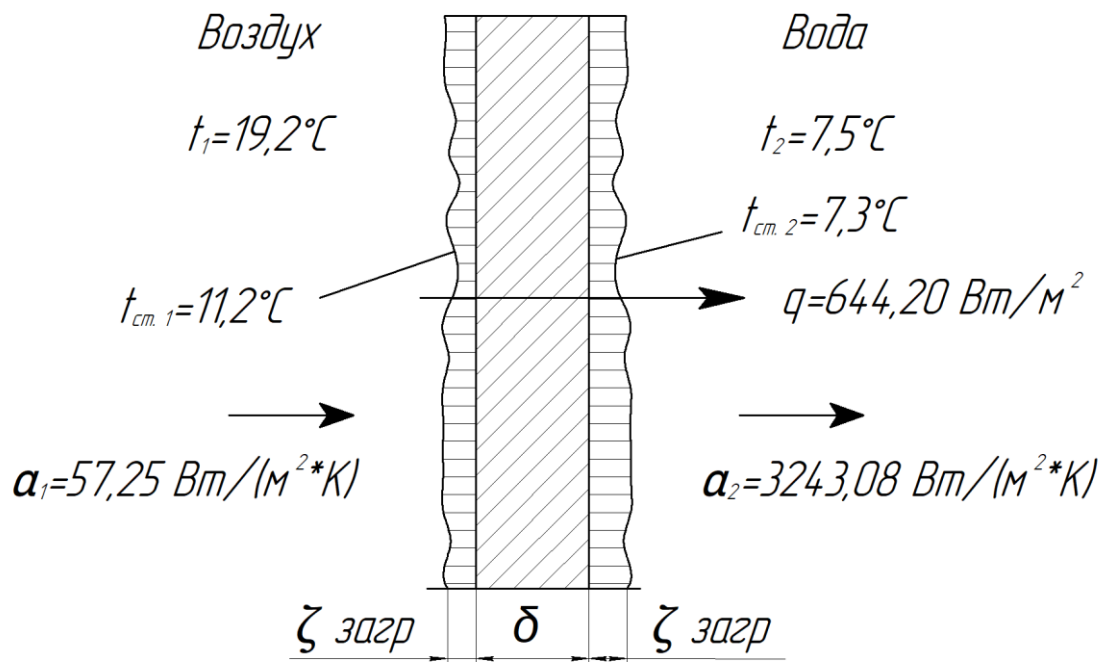
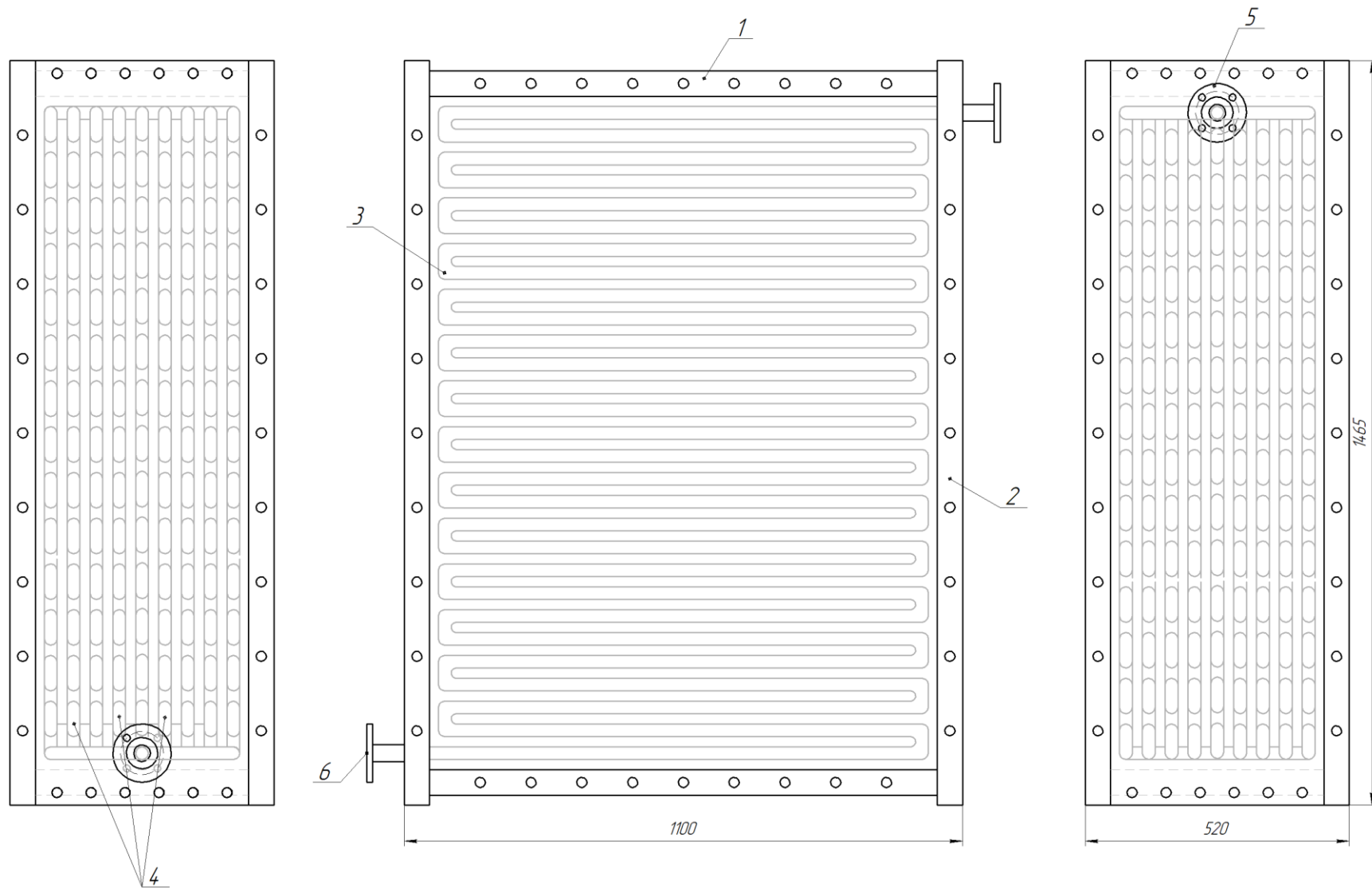


Рисунок 17 – Схема теплопередачи

Принимаем калорифер типа ВО–10/800–01, имеющий 9 рядов труб по 29 шт. На рисунке 18 изображен применяемый калорифер, согласно расчетным данным.



Условные обозначения

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1-герметичная крышка калорифера; | 4-секции труб (9 шт.) |
| 2-торцевые плиты калорифера; | 5-патрубок входа охлаждающей воды; |
| 3-галдяки трубы одной секции (29 шт.); | 6-патрубок выхода нагретой воды. |

Рисунок 18 – Калорифер типа ВО-10/800-01

3.3 Подбор абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины

Зная расход холодной воды $V_2 = 0,076 \text{ м}^3/\text{с} = 274 \text{ м}^3/\text{ч}$, следует подобрать абсорбционную холодильную машину с расходным запасом в 30%. Выбираем АБХМ фирмы Thermax серии 5G марки 5К С. Технические характеристики АБХМ серии 5G марки 5К С приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики АБХМ серии 5G марки 5К С

Модель	Ед. изм.	серия 5G марка 5К С
Холоднопроизводительность	кВт	1350
Расход от источника (градирня)	м ³ /час	228
Количество проходов (испаритель)	1+1	
Диаметр подключения D _y	мм	150
Контур охлаждающей воды		
Расход	м ³ /час	377
Количество проходов (абсорбер)	2+2	
Количество проходов (конденсатор)	1+1	
Потеря давления	м. вод. ст.	7,3
Диаметр подключения, D _y	мм	250
Контур горячей воды		
Расход	м ³ /час	152
Количество проходов (генератор)	1+1	
Потеря давления	м. вод. ст.	1,1
Диаметр подключения, D _y	мм	200
Габаритные размеры		
Длина	мм	4750
Ширина	мм	2270
Высота	мм	3210
Эксплуатационный вес	т	19,1
Транспортировочный вес	т	15,9
Пространство для обслуживания	мм	4150
Электропитание		
Насос абсорбента	кВт (А)	3,7 (11,0)
Насос хладагента	кВт (А)	0,3 (1,4)
Вакуумный насос	кВт (А)	0,75 (1,8)
Общее потребление	кВ А	11,2
Источник питания	380 В (±10%), 50 Гц (±5%), Фазы	

На рисунке 19 изображен АБХМ, который будет вырабатывать холодную воду из градирни, для охлаждения атмосферного воздуха.

Условные обозначения

Узел	Назначение
1	Вход охлажденной воды
2	Выход охлажденной воды
3	Дренаж охлажденной воды
4	Вход охлаждающей воды
5	Выход охлаждающей воды
6	Дренаж охлаждающей воды
7	Вход горячей воды
8	Выход горячей воды

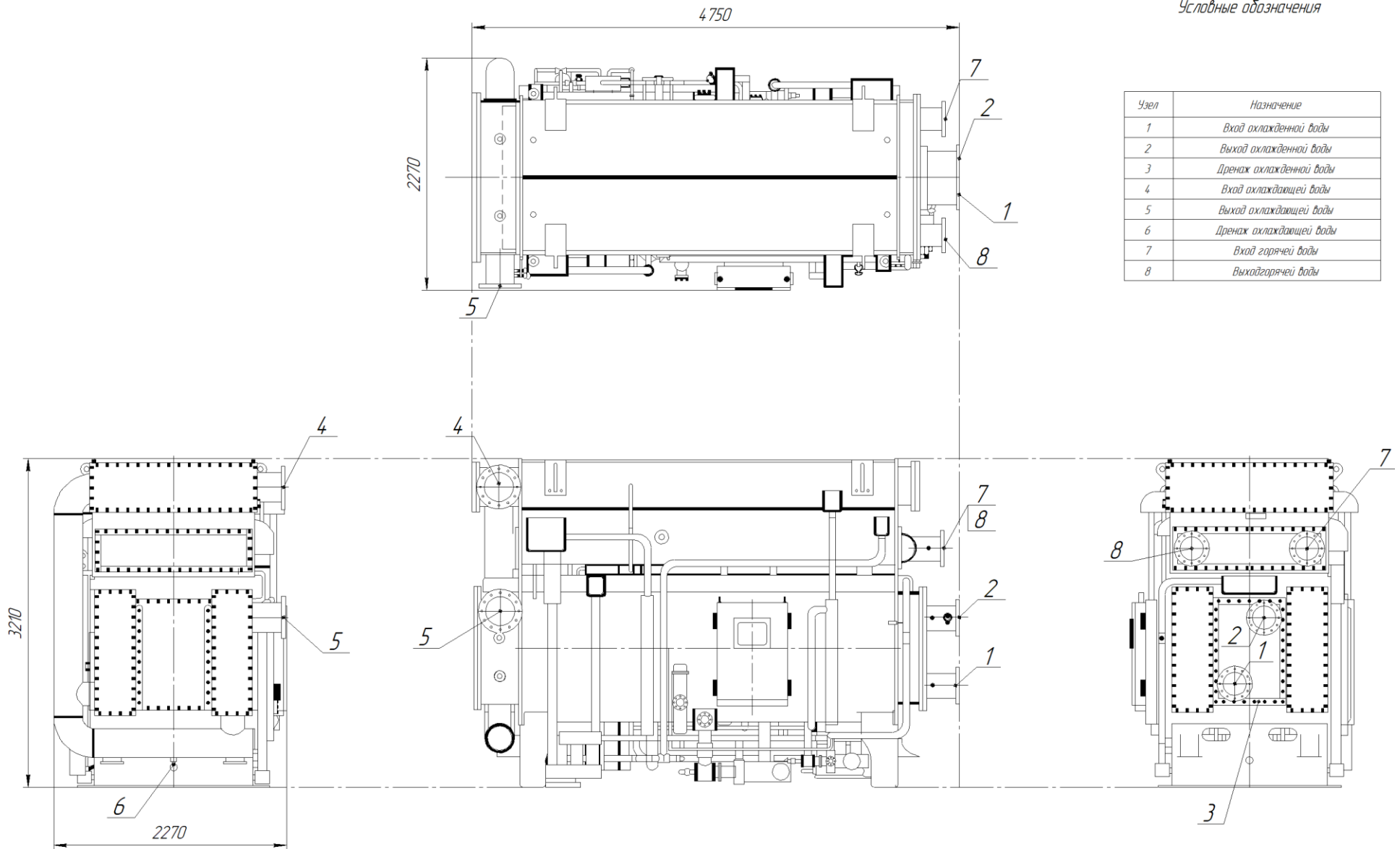


Рисунок 19 – Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина серии 5G марки 5К С

3.4 Подбор циркуляционного насоса

После подбора абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины будет подобран циркуляционный насос, который будет выполнять функцию перекачивания холодной воды от АБХМ к калориферу и обратно в АБХМ. Зная количество воды в контуре охлаждения $377 \text{ м}^3/\text{ч}$, выбираем два циркуляционных насоса, один из которых будет находиться в резерве от производителя Waterstry серии SCR V 200, рисунок 20.



Рисунок 20 – Циркуляционный насос от производителя Waterstry серии SCR V 200

В таблице 7 указаны технические характеристики циркуляционного насоса от производителя Waterstry серии SCR V 200.

Таблица 7 – Технические характеристики циркуляционного насоса от производителя Waterstry серии SCR V 200

Общие характеристики	
Вид насоса	Поверхностный
Тип насоса	Циркуляционный насос
Модельный ряд	SCR V
Подгруппа модельного ряда	SCR V 200
Гидравлические параметры	
Максимальное рабочее давление, бар	12
Максимальный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	480
Максимальный напор, м	32,1
Номинальный напор, м	27
Номинальный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	400

Характеристика рабочей среды, рабочие режимы	
Качество подаваемой воды	Чистая вода, хладагенты и промышленные жидкости
Электрические параметры	
Класс защиты изделия	IP 55
Класс изоляции	F
Номинальная мощность, кВт	45
Электропитание, В	3x380/60
Защита электродвигателя	Обеспечивается потребителем
Конструктивные особенности	
Число ступеней	1
Тип ротора	Сухой
Рабочее колесо	Закрытое
Температура	
Температура перекачиваемой жидкости, °С	-15 до +110
Верхний предел температуры, °С	+110
Нижний предел температуры, °С	-5
Температура окружающей среды, °С	до +40
Размеры	
Высота, мм	1412
Ширина, мм	1100
Глубина, мм	555
Присоединение	
Присоединение	Фланцы круглые
Размер присоединения	DN 200
Материал	
Материал корпуса	Чугун
Материал рабочего колеса	Чугун
Масса, объем	
Вес, кг	638

Вывод по расчетной части.

После выполнения расчетной части была подобрана абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина АБХМ серии 5G марки 5КС, которая способна выработать холодную воду от градирни до температуры +5°С.

Для охлаждения воздуха был подобран калорифер, в котором устанавливаются гладкие трубы в количестве 261 шт., (9 секций, в каждой, из которой монтируются по 29 труб.). Длина труб 1 м.

Подобраны два циркулирующих насоса резервный и рабочий, от производителя Waterstry серии SCR V 200, предназначенный для циркуляции охлажденной воды в контуре между АБХМ и калорифером.

Заключение

В выпускной квалификационной работе была рассмотрена технологическая схема стадии гранулирования цеха 08К предприятия АО «ТольяттиАзот». На основании выполненного анализа на стадии гранулирования были замечены недостатки, которые ухудшают технико-экономические показатели получения карбамида в весенне-летний, летний и летне-осенний период. Для устранения недостатков был выполнен патентный поиск и изучены литературные источники.

Предложен вариант использования АБХМ с применением дополнительного оборудования (теплообменник, циркуляционный насос). Использование абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины даст возможность охладить воздух до оптимальной температуры, используя при этом магистраль воды от градирни в качестве хладагента. Предлагаемая оптимизация позволит охлаждать гранулы перед подачей их на транспортеры (позиции 51-МТ-1А и 51-МТ-1В).

Согласно выполненным расчетам была подобрана абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина АБХМ серии 5G марки 5КС, которая способна выработать холодную воду от градирни до температуры $+5^{\circ}\text{C}$. С помощью подобранной АБХМ можно добиться минимальной температуры охлаждения воды до -5°C .

Для охлаждения воздуха выбран калорифер типа ВО–10/800–01, имеющий трубы длиной 1 метр в количестве 261 шт., (9 секций, в каждой, из которой монтируются по 29 труб.). Калорифер будет выполнять функцию теплообмена между горячим воздухом с температурой $+40^{\circ}\text{C}$ и холодной водой, выработанной от АБХМ с температурой $+5^{\circ}\text{C}$.

Подобраны два циркулирующих насоса резервный и рабочий, от производителя Waterstry серии SCR V 200, предназначенный для циркуляции охлажденной воды в контуре между АБХМ и калорифером.

Составлено техническое описание применяемого оборудования.

Список используемой литературы

1. Абсорбционная холодильная машина URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Абсорбционная_холодильная_машина (дата обращ. 20.01.2024).
2. Абсорбционные холодильные машины THERMAX. URL: <https://colden.ru/wp-content/uploads/2022/07/abxm-thermax-about-1.pdf> (дата обращения 13.04.2024).
3. Бамбушек Е. М. и др. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин: учеб. пособие для вузов по спец. «Холодильные компрессорные машины и установки». Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение. – 1987.
4. Бизунок Н. А., Гайдук А. В. Мочегонные средства. – 2016.
5. Булкина А. М., Осовская И. И. От нефтепродуктов к полимерам. – 2019.
6. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Рипол Классик, 1963.
7. ГОСТ 2081-2010 «Карбамид. Технические условия».
8. Караван С. В., Пинчук О. А. Интегральные энтальпии и энтропии водного раствора бромида лития //Вестник международной академии холода. – 2013. – №. 4. – С. 38-42.
9. Лукьянова Д. А., Барабанщикова Л. Н. Применение карбамида в животноводстве //Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе. – 2022. – С. 139-147.
10. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Бастет. – 2010.
11. Нямба И. Р. Повышение энергетической эффективности газотурбинных установок для работы в климатических условиях Кот-Д'Ивуара. – 2021.

12. Патент № 2788006С1 Российская Федерация МПК С07С 273/04 (2006.1). Способ и устройство для получения мочевины : № 2021129720 : заявл. 20.06.2019 : опубл. 16.01.2023/ Сасаки Кейго.

13. Патент № 2674961С1 Российская Федерация МПК В01J 2/00 (2006.1). Охладитель и способ охлаждения прилл и гранул : № 2017143100 : заявл. 11.12.2017 : опубл. 13.12.2018/ Гусев В. И.

14. Патент № 2640779С2 Российская Федерация МПК В01J 2/04 (2006.1), С07С 273/00 (2006.1). Грануляционная башня и способ получения, в частности, мочевины : № 2015118137 : заявл. 15.1.2013 : опубл. 11.01.2018/ Бин Луо, Чжунпин Се, Хойсюнь Лин, Карлесси Лино.

15. Патент № 2015101156С1 Российская Федерация МПК В01J 2/04 (2006.1). Способ и устройство для гранулирования жидкости, в частности для гранулирования мочевины : № 2015101156 : заявл. 18.04.2013 : опубл. 21.09.2017/ Бедетти Джанфранко.

16. Патент № 126962U1 Российская Федерация МПК В01J 2/04 (2006.1). Грануляционная башня : № 2012138039 : заявл. 05.09.2012 : опубл. 20.04.2013/ Беседин А. Б., Шнепп Ю. Б., Баклан Г. С., Дунаева О. А., Родионов А. С., Кизименко В. Л., Прокопьев А. А., Кузнецов Н. М.

17. Патент № 2491262С1 Российская Федерация МПК С05С 7/02 (2006.1). Способ и установка для получения гранулированного удобрения : № 2012114061 : заявл. 10.04.2012 : опубл. 27.08.2013/ Беседин А. Б., Шнепп Ю. Б., Баклан Г. С., Дунаева О. А., Родионов А. С., Кизименко В. Л., Прокопьев А. А., Кузнецов Н. М.

18. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Рипол Классик, 1987.

19. Постоянный технологический регламент производства карбамида мощностью 960 тыс. тонн в год, поставки фирмы «Снампрожетти» Италия, №ПК-5Р. Введен в действие с приказом от 2020 г.

20. Ривкин СЛ А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. – 1984.

21. Сазоненко В. М., Шамаров М. В. Области и перспективы применения абсорбционных холодильных машин // Ответственный редактор. – 2019. – С. 72.

22. Тимофеева Е. Э., Тихомирова А. В. Перспективы развития производства смол на основе карбамида // Химия и химическая технология: Достижения и перспективы. – 2018. – С. 146.1-146.3.

23. Donaldson W. R., Tang C. L. Urea optical parametric oscillator // Applied physics letters. – 1984. – Т. 44. – №. 1. – С. 25-27.

24. Meessen J. H., Petersen H. Urea // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – 2000.

25. URL: <https://abxm-thermax.ru/stati/vnedrenie-effektivnoj-sistemy-ohlazhdeniya-granul-mineralnyh-udobrenij/> (дата обращения 27.01.2024).

26. URL: <https://colden.ru/wp-content/uploads/2022/07/catalog-web-2.pdf> (дата обращения 12.03.2024).

27. URL: <https://colden.ru/wp-content/uploads/2022/07/trigeneracziya-1.pdf> (дата обращения 12.03.2024).

28. URL: <https://hecsa.ru/rastvor-bromida-litija/> (дата обращения 05.03.2024).

29. URL: <https://pharmtec.ru/stati/mochevina/> (дата обращения 29.05.2024).

30. URL: https://atamanchemicals.com/carbamide_u27999/?lang=RU (дата обращения 29.05.2024).

31. URL: <https://tsrhiesel.ru/blog/primenenie-mocheviny-v-dizelnykh-dvigatelyakh/> (дата обращения 29.05.24).