

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники»

Факультет интеллектуальных технических систем  
Кафедра промышленной экологии

Захаров Артем Николаевич

Бакалаврская работа  
по направлению: 20.03.01 «Техносферная безопасность»

**Эксергетический анализ системы кондиционирования воздуха чистых  
помещений микроэлектроники.**

Студент \_\_\_\_\_ / Захаров А.Н./

Научный руководитель

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ / Рябышенков А.С./

Москва 2017

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Литературный обзор</b> .....	5
1.1 Требования предъявляемые к ЧП микроэлектроники.....	5
1.2 Анализ методов энергосбережения СКВ ЧП.....	9
1.3 Показатели энергоэффективности СКВ.....	13
1.4 Системы кондиционирования воздуха.....	19
1.5 Эксергетический подход для оценки СКВ.....	33
Выводы по первой главе.....	37
<b>Глава 2. Расчетная часть</b> .....	38
2.1. Расчет эксергетических потерь для ПС ТПГ.....	38
2.2. Расчет эксергетических потерь для ПС ХПГ.....	42
2.3. Расчет эксергетических потерь для РЦК ТПГ.....	46
2.4. Расчет эксергетических потерь для РЦК ХПГ.....	50
Выводы по второй главе.....	54
<b>Заключение</b> .....	55
<b>Список литературных источников:</b> .....	56

## Введение

Одним из условий развития микроэлектроники в настоящее время является ее обеспечение современной инфраструктуры включающее в себя чистое помещение (ЧП) и систему кондиционирования воздуха (СКВ), служащую для подготовки и обеспечения параметров ЧП заданного класса.

В данной работе объектом исследования является система кондиционирования воздуха ЧП.

Цель работы - анализ энергоэффективного использования воздуха для ЧП микроэлектроники. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- ❖ Провести анализ основных методов энергосбережения для СКВ ЧП;
- ❖ Установить показатели энергоэффективности СКВ;
- ❖ Конкретизировать требования, предъявляемые к ЧП различных классов;
- ❖ Провести анализ различных схем воздухоподготовки;
- ❖ Рассмотреть основные теоретические положения термодинамического анализа СКВ на примере эксергетического анализа СКВ ЧП;
- ❖ Провести расчет эксергетических потерь ПС и РК в ТПГ и ХПГ;
- ❖ Сформулировать выводы.

Характерной особенностью микроэлектроники является неотъемлемая взаимосвязь системы СКВ с атмосферными показателями природно-технической геосистемы, которые в свою очередь оказывают влияние на работу всего комплекса подготовки наружного воздуха.

В микроэлектронной промышленности для выполнения технологического процесса требуются специальные чистые условия (параметры микроклимата, запыленность и др.). Обращаясь к стандарту ГОСТ Р ИСО 14644-1: «Чистое помещения и связанные с ними контролируемые среды». «ЧП – это помещение, в котором контролируется концентрация взвешенных в воздухе частиц, построенное и используемое

так, чтобы свести к минимуму поступление, выделение и удержание частиц внутри помещения, и позволяющее, по мере необходимости, контролировать другие параметры, например, температуру, влажность и давление» [1-2].

Главная цель ЧП состоит в предоставлении необходимых параметров внутрипроизводственного воздуха ЧП в соответствии с заданным классом чистоты.

Принимая во внимание тот факт, что современное оборудование для производства любой техники, а также сами производимые высокотехнологичные продукты, использует изделия микроэлектронной промышленности, как выше отмечено, не могут существовать без ЧП

Результаты выпускной квалификационной работы (ВКР) докладывались и обсуждались на 24-ой всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов по тематике «Микроэлектроника и информатика - 2017».

Основные положения ВКР опубликованы в двух работах. ВКР состоит из введения, двух глав (теоретической и расчетной), выводов и списка литературных источников из 23 наименований. Общий объем ВКР составляет 57 стр.

## Глава 1. Литературный обзор

### 1.1 Требования предъявляемые к ЧП микроэлектроники

В производстве изделий микроэлектроники требуется достаточно высокий уровень контроля загрязнений для соответствующего класса чистоты помещения, который определяется минимальными топологическими размерами производимой продукции [3].

Класс чистоты с минимальной концентрацией частиц обычно выбирается исходя из критического размера частиц пыли, который непосредственно влияет на выбор требуемого класса чистоты ЧП. Классы чистоты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация ЧП

Класс чистоты	Предельно-допустимое число частиц в м <sup>3</sup> воздуха размером равным и превышающим, мкм					
	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5,0
ИСО 14644-1						
1 ИСО	10	2				
2 ИСО	100	24	10	4		
3 ИСО	1000	237	102	35	8	
4 ИСО	10000	2370	1020	352	83	
5 ИСО	100000	23700	10200	3520	832	29
6 ИСО	1000000	237000	102000	35200	8320	293
7 ИСО				352000	83200	2930
8 ИСО				3520000	832000	29300
9 ИСО				35200000	8320000	293000

Определение класса чистоты для различных рабочих зон основывается на вероятности потенциального отказа оборудования и загрязнении производимых изделий.

Для примера, рассмотрим процесс фотолитографии пластин кремния. Пластины, в связи необходимости технического процесса, находятся в открытой окружающей среде, которая, в свою очередь, зависит от параметров таких как: температура, влажность и давление, и опасность образования брака крайне высока. Из – за этого, в готовой продукции, в случае брака пластины, произойдет отказ [3].

Примеры применения ЧП различных классов для микроэлектроники, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Примеры применения ЧП различных классов

Класс ЧП в эксплуатируемом состоянии	Тип потока воздуха	Средняя скорость потока воздуха, м/с	Пример применения
2 ИСО	однонаправленный	0,3-0,5	Фотолитография и другие критические зоны
3 ИСО	однонаправленный	0,3-0,5	Рабочие зоны
4 ИСО	однонаправленный	0,3-0,5	Рабочие зоны, производство масок с несколькими подложками, зоны обслуживания, вспомогательные зоны
5 ИСО	однонаправленный	0,2-0,5	Рабочие зоны, производство масок с несколькими подложками, зоны обслуживания, вспомогательные зоны
6 ИСО	Не однонаправленный	Не применяется	Зоны обслуживания,

	ый или смешанный		вспомогательные зоны
--	---------------------	--	-------------------------

Технологический микроклимат - часть электронной гигиены, предусматривающая поддержание в чистых помещениях и рабочих объемах заданных параметров воздушной среды: температуры, относительной влажности, счетной концентрации аэрозольных частиц.

Температура в ЧП и на рабочих местах должна поддерживаться у номинала (точки регулирования), колебания температуры относительно номинала выбраны в зависимости от вида технологической операции из следующих значений:  $\pm 1,0$ ;  $\pm 1,5$ ;  $\pm 2,0$  °С;

Примечание: Допускается выбирать номинал температуры с учетом выбранных отклонений в пределах (20-24) °С для получения стабильности изготавливаемых и испытываемых изделий по требованию технологического процесса.

Относительная влажность в ЧП должна поддерживаться у номинала 45% в зависимости от требований технологического процесса (операции), колебания относительной влажности у номинала выбраны следующего значения:  $\pm 10\%$ .

Примечание. Допускается выбирать номинал поддержания относительной влажности в ЧП с учетом выбранных отклонений в пределах (30-60) %, в особых случаях - по требованию технологического процесса.

Нормы технологического микроклимата определяются разработчиком технологии в техническом задании на производственное помещение, согласовываются с представителем заказчика, отделом технического контроля и далее устанавливается класс ЧП.



## 1.2 Анализ методов энергосбережения СКВ ЧП

Определенное состояние воздушной среды чистых помещений является необходимым, а часто и решающим условием для стабильного производства изделий микроэлектроники.

Кондиционирование воздуха — создание и поддержание (автоматическое) в закрытых помещениях и средствах транспорта параметров воздушной среды (температуры, относительной влажности, чистоты воздуха, скорости движения и давления), наиболее благоприятных для самочувствия людей (комфортное кондиционирование воздуха), ведения технологических процессов, действия оборудования и приборов, обеспечения сохранности предметов культуры и искусства. Как правило кондиционирование воздуха выполняет функции вентиляции [4].

Еще одно определение кондиционирования воздуха, приводимое в изданиях «ASHRAE»: «СКВ — есть системы, которые обеспечивают окружающие условия в помещениях, позволяющие людям или продуктам производства функционировать в оптимальных условиях» [5].

Для поддержания необходимых параметров воздушной среды в ЧП, используют совокупность пассивных и активных элементов СКВ.

Пассивные элементы представляют из себя различного рода ограждения и тепловую изоляцию помещений. В большинстве случаев, при существующих зданиях и сооружениях изменение конструкции пассивного элемента не возможно или экономически невыгодно. Активными элементами обеспечения параметров микроклимата являются системы вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха. Грамотная их организация, в большинстве случаев, позволяет добиться в ЧП оптимальных условий для технологического процесса.

В многочисленных и очень разнообразных областях применения, самые высокие требования по чистоте воздушной среды выполняются, используя однонаправленный воздушный поток, который в европейской технической

литературе иногда называется низкотурбулентным вытесняющим потоком, а в английских и американских публикациях называется - кратко, но не совсем корректно - ламинарным потоком. Это положение верно и для настоящего времени, и для ближайшего прогнозируемого будущего [6].

К сожалению, подобное высокое качество обходится недешево: при обычно используемых линейных скоростях воздуха 0,3 - 0,5 м/с расход воздуха будет составлять 1080 - 1800 м<sup>3</sup>/ч на каждый квадратный метр площади фильтров. Однонаправленный поток, таким образом, неразрывно связан с большим расходом воздуха. Следовательно, стоимость систем с использованием однонаправленного потока воздуха неизбежно высока, так как стоимость любых систем циркуляции воздуха - для чистых помещений или каких-либо других - прямо пропорциональна расходу воздуха. Таким образом, творческий подход к проектированию инженерных систем в технологии чистых помещений должен быть сознательно направлен на минимизацию расхода воздуха путем:

- уменьшения числа чистых зон, в которых используется однонаправленный поток воздуха, до минимально допустимого для технологического процесса уровня;

- снижения скорости воздушного потока в зонах, использующих однонаправленный поток, до минимальной величины, определяемой восходящими потоками нагретого воздуха и/или неустойчивостями воздушного потока, вызванными источниками тепла, связанными с технологическим процессом, и турбулентностью, вызванной передвижением персонала;

- защиты чистых зон, использующих однонаправленный поток воздуха, путем применения пластиковых завес или разделяющих перегородок, обеспечивающих физическую изоляцию от внешних участков с более низкими требованиями к технологической среде;

- применения альтернативных проектных концепций, эффективно отделяющих технологический процесс от источников загрязнения и

персонала (например, использование минизон типа SMIF-контейнеров в микроэлектронике и изоляторов или барьерных систем в фармацевтической промышленности)

Рассмотренные выше различные решения заключались главным образом в снижении до минимума расхода воздуха, что обеспечивает эффективное уменьшение капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Однако существует еще множество способов снижения энергозатрат в системе чистых помещений. Некоторые из них могут потребовать дополнительных начальных вложений, но в итоге суммарные затраты на энергию в течение периода полезного использования системы могут в два - три раза (и даже больше) окупить капитальные затраты, что является показателем разумного использования средств. Особенно хорошие результаты достигаются при использовании комбинированных методов, которые могут объединять несколько отдельных мероприятий, перечисленных выше, в цельную согласованную модель:

- регулируемое соотношение поступающего снаружи и рециркуляционного воздуха с целью уменьшения потребности в искусственном охлаждении за счет использования принципа естественного охлаждения;
- использование отходящего тепла с целью нагрева;
- извлечение тепла из рециркуляционного воздуха при помощи рекуперации и тепловых насосов с реверсивным циклом;
- минимальное увлажнение воздуха;
- последовательное расположение систем и зон в зависимости от требуемых параметров воздуха;
- снижение расхода воздуха в то время, когда производство останавливается;
- выбор для системы компонентов, отличающихся высокой эффективностью и низким перепадом давления;

- минимизация сопротивления потоку в системе циркуляции воздуха путем выбора низких скоростей, плавных соединений, отсутствия резких изменений скорости и других подобных мер.

Этот перечень, разумеется, не является исчерпывающим. Значительное снижение энергозатрат может быть достигнуто при проектировании систем кондиционирования воздуха и систем чистых помещений в целом, если использовать все возможности управления энергопотреблением с помощью современных автоматических систем контроля, особенно при использовании микропроцессорных технологий и персональных компьютеров. В дальнейшем такие системы могут дополняться, превращаясь в комплексные автоматизированные системы управления всем производственным зданием [6-9].

### 1.3 Показатели энергоэффективности СКВ

Решение проблемы энергосбережения и повышения энергетической эффективности носит долгосрочный характер, что обусловлено необходимостью как изменения системы отношений на рынках энергоносителей, так и замены и модернизации значительной части производственной, инженерной инфраструктуры и ее развития на новой технологической базе.

Первым шагом на пути к реализации мер по повышению энергоэффективности стала «Энергетическая стратегия России до 2020 года», принятая в 1992 г. [10].

В России используется ГОСТ Р 51388-99 «Энергосбережение. Информирование потребителей об энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения», устанавливающий семь классов энергоэффективности (A+++, A++, A+, A, B, C, D, E), которые обозначают степени энергопотребления СКФВ при их эксплуатации [11].

Класс энергетической эффективности СКВ определяется согласно ГОСТ 32970-2014 «Кондиционеры и тепловые насосы без воздухопроводов. Испытания и оценка рабочих характеристик» [12].

Показатель энергоэффективности для СКВ определяется отношением индекса производительности холода к фактическому потреблению электроэнергии в процессе охлаждения для теплого периода года (ТПГ) или отношением индекса производительности тепла к фактическому к фактическому потреблению электроэнергии в процессе нагрева для холодного периода года (ХПГ). Рассматриваемый стандарт устанавливает следующие условия проведения испытания СКВ:

1. Предварительные условия испытания, которые проводятся для выбранных условиях, без каких – либо изменений скорости вентилятора или резистивной системы для коррекции отклонений от стандартного барометрического давления.

2. Положения решеток, заслонок, скорость вращения вентиляторов СКВ, должны быть установлены соответствии с инструкциями изготовителя. При отсутствии инструкции, решетки, заслонки, скорость вращения вентиляторов должны быть установлены для обеспечения максимальной холодопроизводительности.

3. Аппаратура испытательной камеры для предварительных условий и оборудование должны работать до тех пор, пока не будут достигнуты условия равновесия. Условия равновесия должны поддерживаться не менее чем в течение 1 ч до начала регистрации данных холодопроизводительности.

4. Требования к проведению испытаний. Испытания проводят для определения явной, скрытой и общей холодопроизводительностей на внутренней секции центрального кондиционера.

5. Продолжительность испытания регистрируются через равные промежутки времени, при этом запись данных следует продолжать в течение не менее 30-минутного отрезка времени, в течение которого должны быть определены значения допусков [12].

Необходимо отметить, что за рубежом используются аналогичные стандарты и директивы для оценки энергопотребления СКВ [13-15].

В Европе, для оценки СКВ широко применяется холодильный коэффициент EER (Energy Efficiency Ratio), который определяется из отношения холодопроизводительности к количеству энергии, затраченной в

единицу времени на осуществление холодильного цикла.  $EER = \frac{Q_x}{N_{потр}}$ , где  $Q_x$

– холодопроизводительность, Вт;  $N_{потр}$  – потребляемая мощность СКВ, Вт.

Другой коэффициент — COP (Coefficient of Performance) показывает эффективность работы СКВ в режиме обогрева и равен отношению

мощности обогрева к потребляемой мощности.  $COP = \frac{Q_o}{N_{потр}}$ , где  $Q_o$  –

мощность обогрева, Вт,  $N_{потр}$  – потребляемая мощность СКВ, Вт.

Для того чтобы было удобней сравнивать энергоэффективность разных моделей СКВ, была введена в Европейском союзе шкала энергоэффективности, состоящая из семи категорий, обозначаемых буквами представленная в таблице 3.

Таблица 3 - Шкалы энергоэффективности.

EER							
Категория	A	B	C	D	E	F	G
	$3,2 \geq$	3,2 - 3	3 – 2,8	2,8 - 2,6	2,6 - 2,4	2,4 - 2,2	<2, 2
COP							
Категория	A	B	C	D	E	F	G
	$3,6 \geq$	3,6 - 3,4	3,4 – 3,2	3,2 - 2,8	2,8 - 2,6	2,6 - 2,4	<2, 4

Необходимо обратить внимание, на особенности данных показателей, полученных при оценке энергоэффективности. Во – первых, показатели EER/COP являются моментальными, то есть характеризуют энергоэффективность непосредственно в данный момент времени. Во -вторых, данные показатели рассчитываются строго в определенных условиях в соответствии с ISO 5151:2010 «Non-ducted air conditioners and heat pumps -- Testing and rating for performance». Испытания и определение рабочих характеристик, то есть при 100% тепловой нагрузке при стандартных условиях (температура наружного воздуха +35°C в режиме охлаждения и +7°C в режиме обогрева) [15]. Если для сравнительной характеристики конкретных моделей такой подход себя полностью оправдывал, то для комплексной оценки энергоэффективности во времени он имеет несколько существенных недостатков:

- Тепловая нагрузка меняется в процессе работы кондиционера.

- Расчет производится с учетом только потребляемой мощности компрессора (без учета вентиляторов, ионизаторов), что не совсем верно при отсутствии соответствующих оговорок в техническом описании.
- Значительное различие и среднегодовые температуры в разных регионах.

С учетом приведенных недостатков, в европейском союзе, было принято решение производить измерения эффективности не при одной температуре наружного воздуха, а при 4-х. Более того, для режима обогрева стала приниматься во внимание и климатическая зона, в которой предполагается эксплуатировать оборудование. С этой целью были введены 3 зоны европейского климата, представленные на рисунке 1, имеющие разное распределение так называемых градус-часов: -теплая (Афины) –средняя (Страсбург) и –холодная (Хельсинки).

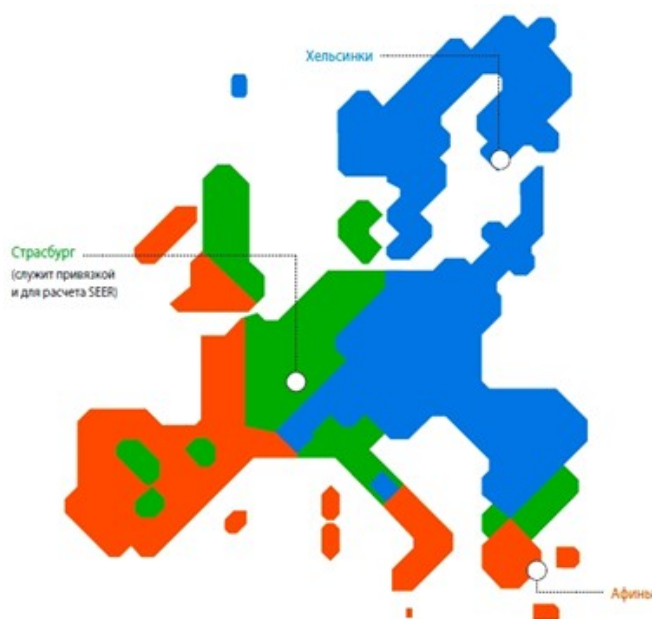


Рисунок 1- Зоны европейского климата

Благодаря введению климатических зон, появились сезонные коэффициенты SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) и SCOP (Seasonal Coefficient of Performance). Именно такой подход теперь применяется для оценки и сравнения фактического энергопотребления техники



кондиционирования воздуха. Для расчета этих коэффициентов определяется количество холода или тепла, выработанного СКВ за один сезон, которое делится на потребленную за этот же период электроэнергию. Для более точного учета зависимости энергоэффективности от температуры наружного воздуха коэффициент SCOP рассчитывают отдельно для разных климатических зон. На данный момент обязательным пока является указание только для средней

На основе сезонных коэффициентов разработана и новая шкала энергоэффективности СКВ от D (SEER < 3,6; SCOP<2,5) до новых высших классов энергоэффективности A++ и A+++ (SEER > 8,5; SCOP>5,1). Классы E, F, G были вообще исключены. Шкалы энергоэффективности SEER и SCOP представлены в таблице 3.

Таблица 4 - Шкалы энергоэффективности SEER и SCOP.

Класс энергоэффективности	SEER	SCOP
A+++	SEER ≥ 8,5	SCOP ≥ 5,1
A++	6,1 ≤ SEER < 8,5	4,6 ≤ SEER < 5,1
A+	5,6 ≤ SEER < 6,1	4,0 ≤ SEER < 4,6
A	5,1 ≤ SEER < 5,6	3,4 ≤ SEER < 4,0
B	4,6 ≤ SEER < 5,1	3,1 ≤ SEER < 3,4
C	4,1 ≤ SEER < 4,6	2,8 ≤ SEER < 3,1
D	3,6 ≤ SEER < 4,1	2,5 ≤ SEER < 2,8

В Австралии используется стандарт AS 1668.2-2012 «The use of ventilation and airconditioning in buildings Mechanical ventilation in buildings», который аналогичен европейским коэффициентам EER и COP [15].

Необходимо отметить, что правительством Австралии поддерживается [сайт по политике в сфере энергомаркировок и минимальных стандартов энергетических характеристик](#) (МСЭХ).

В Японии МСЭХ не существует, а имеется программа стандартов «Лидер гонки» (Top Runner), в рамках которой устанавливаются целевые

значения характеристик энергоэффективности на последующий год, исходя из наивысших текущих показателей энергоэффективности по каждому виду продукции. По наступлении целевого года могут определяться новые целевые значения. На сегодняшний день осуществление программы является достаточно успешным, поскольку большинство производителей стремятся выполнить установленные целевые показатели. Реализация программы основывается на высокой степени доверия и взаимодействия между правительством и относительно небольшим числом японских производителей. Такой основанный на сотрудничестве подход для большинства других стран, помимо Японии, труднодостижим.

Для включения продукта в программу «Лидер гонки» используют четкие критерии. Он должен:

- широко использоваться в Японии и пройти уровень начального проникновения на рынок, иметь высоко/крайне специализированное использование

- быть достаточно энергоемким и иметь потенциал для энергосбережения

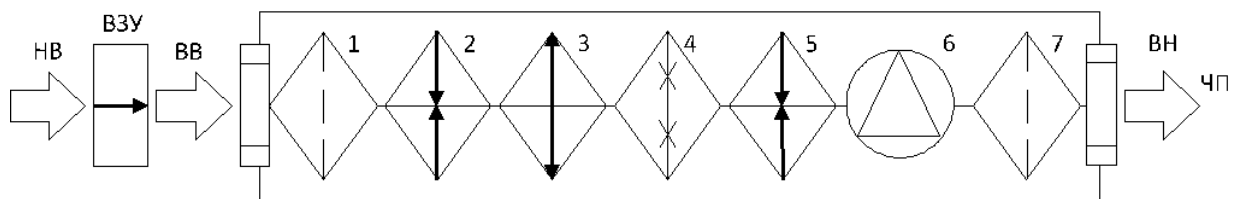
- не быть субъектом регулирования другими стандартами (для оборудования)

- не иметь утвержденного формата измерений энергохарактеристик, в частности энергоэффективности [16].

В заключении, необходимо отметить, что большинство стран стремятся производить энергоэффективные СКВ, для нужд микроэлектроники. Для этого создаются различные стандарты, директивы, правительственные программы, регулирующие показатели энергоэффективности. Однако, большинство нормативных документов, рассматривают показатели только при постоянных условиях окружающей среды, не принимая во внимание изменения параметров наружного воздуха с течением времени, что характерно для всех регионов Российской Федерации.

## 1.4 Системы кондиционирования воздуха

Подбор центральных кондиционеров (ЦК) для чистых помещений (ЧП) высокотехнологичного производства имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с выбором для других типов помещений. Речь идет о больших производственных площадях ЧП, сложном монтаже и крупных габаритах высокоточного технологического оборудования, возможности установки требуемых технико-экологических настроек для ЧП с различными классами чистоты. Цена возможных просчетов при проектировании и монтаже системы кондиционирования воздуха для ЧП будет весьма высока – от выхода из строя дорогостоящей системы кондиционирования, материального ущерба высокотехнологичному производству до причинения вреда здоровью персонала [15].



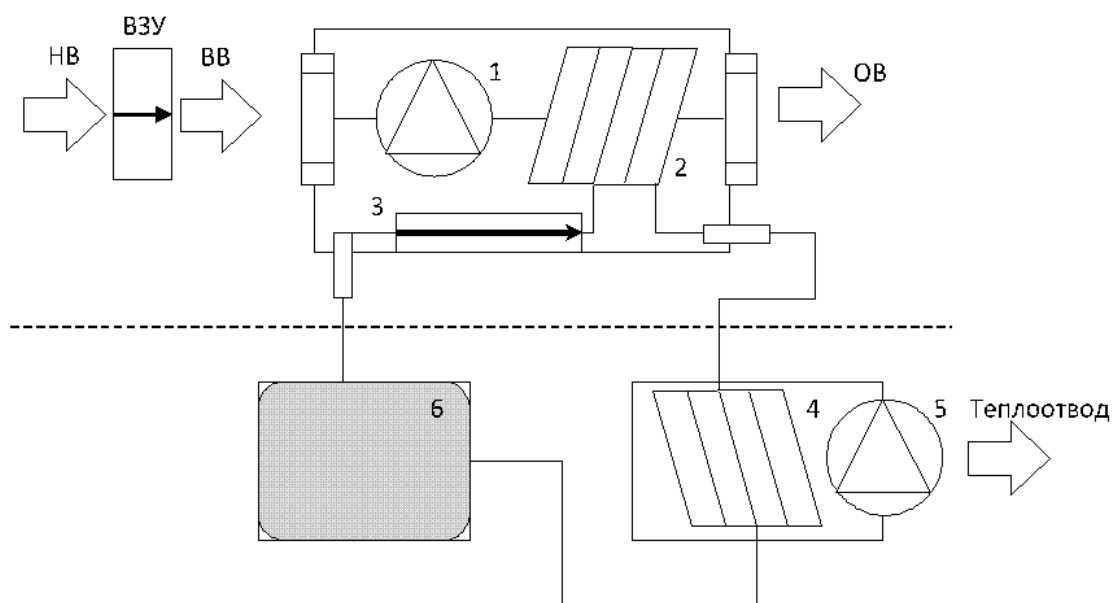
1 - стартовый фильтр; 2 - секция нагрева; 3 - секция охлаждения; 4 - секция увлажнения; 5 - секция нагрева; 6 - вентиляционная секция(вентилятор); 7 - предфильтр; НВ – наружный воздух; ВЗУ – воздухозаборное устройство; ВВ – всасывающий воздуховод; НВ – нагнетательный воздуховод; ЧП – чистое помещение

Рисунок 2 - Промышленный центральный кондиционер

Промышленные ЦК (рисунок 2) разрабатываются для обслуживания ЧП общей площадью более 300 кв. м. Их часто устанавливают в промышленных зданиях, где требуются соответствующие параметры микроклимата и запыленности воздуха для ЧП. Различают несколько

разновидностей систем кондиционирования воздуха для нужд высокотехнологичного производства.

Мультизональные системы кондиционирования типа VRF и VRV включают в себя до 64 внутренних блоков и от одного до трех внешних блоков (рисунок 3), отличаются минимальным уровнем энергопотребления. Максимальная суммарная длина межблочных коммуникаций (воздуховодов) 300 м. Максимальный перепад высот может составлять 50 м. Для каждого внутреннего блока можно установить собственную температуру в помещении и обеспечить требуемые параметры микроклимата в ЧП. Погрешность устанавливаемой температуры воздуха при этом составляет порядка 0,5°C.

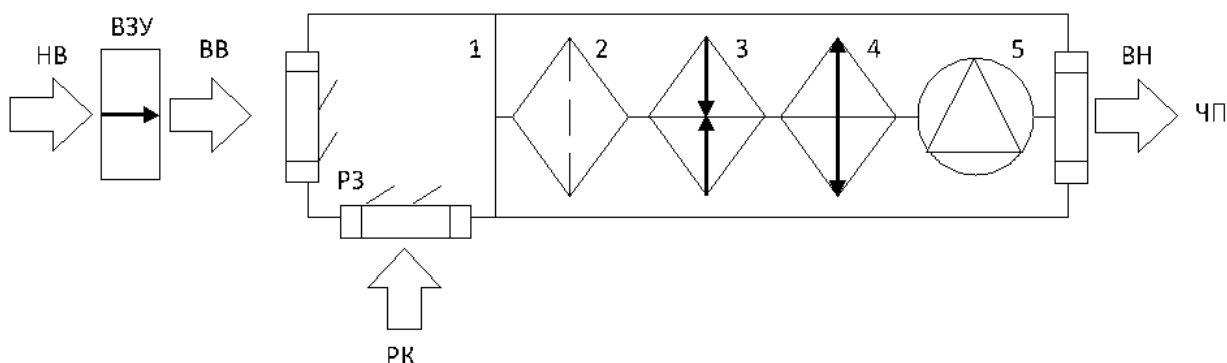


1 - вентилятор испарителя; 2 - испаритель (Чиллер); 3 – компрессор; 4- конденсатор (Фанкойл); 5 - вентилятор конденсатора; ОВ – отвод воздуха

Рисунок 3 - Чиллер-Фанкойл система кондиционирования

Система воздухоподготовки в ЧП на основе системы «Чиллер-Фанкойл» (рисунок 3) отличается тем, что внутри чистого помещения

используется не хладагент, а вода или антифриз. Центральная холодильная машина называется чиллером, а теплообменники в помещениях – фанкойлами. Представленная система выгодно отличается тем, что максимальное расстояние между чиллером и фанкойлом практически не ограничено, при этом требования к магистральным трубопроводам по которым течет охлаждающий реагент - минимальны.

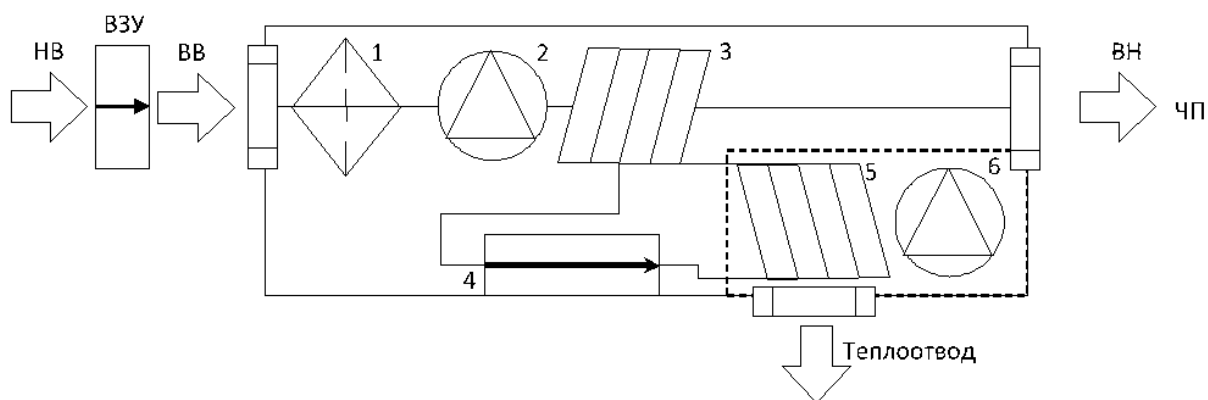


РК – рециркуляционный контур; РЗ – регулирующие заслонки; 1- камера смешения; 2- фильтр; 3 - секция нагревания; 4 - секция охлаждения; 5 - вентиляционная секция(вентилятор)

Рисунок 4 - Крышный кондиционер.

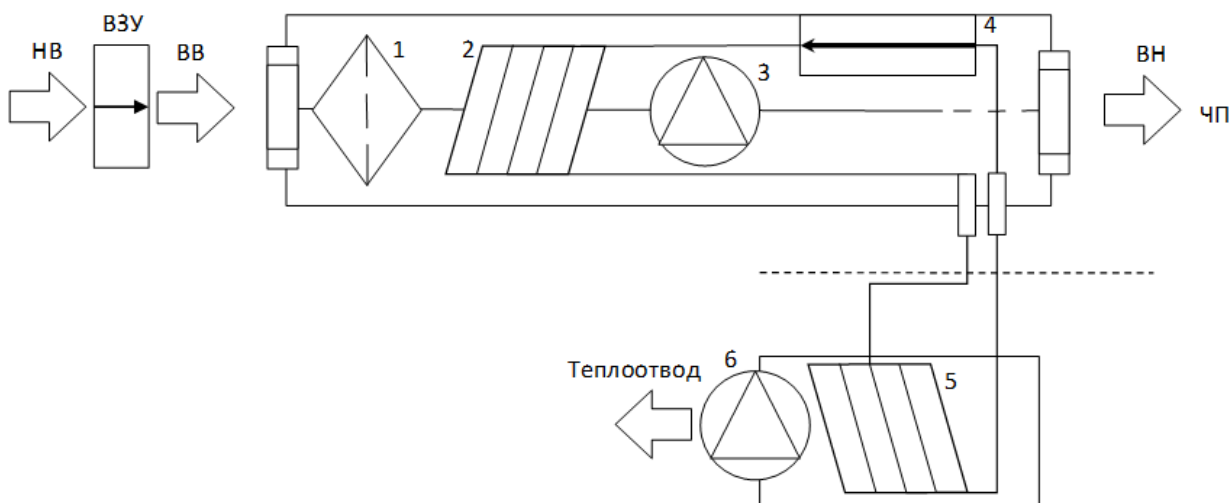
Центральные кондиционеры являются многофункциональными компонентами системы воздухоподготовки в ЧП, так как в них осуществляются процессы нагревания, охлаждения, осушения, увлажнения, очистки, подачи воздуха и автоматического регулирования параметров внутрипроизводственной среды. Центральными они называются, потому что воздух обрабатывается в центральном модуле, а затем по воздуховодам распределяется в ЧП с заданными классами чистоты. Установка ЦК, прокладка соответствующих воздуховодов и коммуникаций с учётом специфики ЧП отличается повышенной конструктивно-технологической сложностью. Наиболее оптимальным, с точки зрения простоты монтажа системы воздухоподготовки является крышный кондиционер (рисунок 4), для которого требуется внешний источник холода.

Шкафные кондиционеры (рисунок 5) предназначены для поддержания постоянных параметров микроклимата (температуры и влажности воздуха) на больших площадях ЧП и в течение достаточно длительного времени.



1 - фильтр; 2 - вентилятор испарителя; 3 - испаритель; 4 - Компрессор контура охлаждения; 5 - Конденсатор; 6- Вентилятор Конденсатора

Рисунок 5 - Шкафной кондиционер



1– фильтр; 2 – испаритель; 3 – вентилятор; 4 - Компрессор контура охлаждения; 5 - выносной конденсатор; 6 - вентилятор для охлаждения конденсатора

Рисунок 6 - Прецизионный кондиционер

Прецизионные кондиционеры (рисунок 6) отличаются высокой точностью поддержания заданных параметров температуры и влажности.

Они состоят из наружного и внутреннего блоков. При подборе кондиционеров для ЧП микроэлектроники необходимо учитывать множество факторов, среди которых можно выделить следующие: назначение ЧП, метеорологические характеристики конкретной природно-технических геосистемы, тип и конфигурация системы кондиционирования воздуха (СКВ), характер и диапазон тепловой нагрузки технологического оборудования и т.д. Отличительной особенностью представленных систем кондиционирования воздуха является то, что можно создать практически любую конфигурацию в зависимости от решаемой задачи, например в систему «чиллер-фанкойл» можно интегрировать центральный кондиционер и получится система с вентиляцией.

Мультизональная система и система «чиллер-фанкойл» может быть оснащена дополнительно центральными кондиционерами или вентиляционными установками, что обеспечит возможность обеспечения требуемой кратности воздухообмена в ЧП. Отличительной особенностью центральных и крышных кондиционеров является возможность автоматического регулирования заданных параметров (температура и влажность воздуха, степень его очистки, кратность воздухообмена и т.п.) для каждого ЧП индивидуально. Известно, что в области эксплуатации СКВ при сохранившейся на промышленных предприятиях старой системы вентиляции и кондиционирования воздуха имелись смесительные камеры, в которых рециркуляционный воздух из ЧП перемешивался с наружным, затем соответствующим образом обрабатывался и подавался обратно. В настоящее время в общую схему СКВ предпочитают устанавливать современные системы, так называемые рекуператоры, в которых перенасыщенный микроорганизмами воздух, удаляется, а потери расхода воздуха компенсируются притоком свежего наружного. Для предотвращения образования болезнетворных микроорганизмов, необходимо проводить периодическую комплексную очистку всех элементов СКВ на предмет различных загрязнений.

Кондиционирование воздуха в ЧП осуществляется комплексом технических средств и мероприятий, направленных на обработку приточного наружного атмосферного воздуха с заданными автоматическими и регулируемыми параметрами в целях поддержания в ЧП требуемого состояния внутрипроизводственной среды независимо от состава вредных загрязнений и параметров наружного воздуха. Данная система в отличие от вентиляционной обеспечивает контролируемый расход воздуха в помещении по принципу общеобменной вентиляции, а также автоматически поддерживает необходимые метеорологические условия в ЧП независимо от времени года и переменных поступлений теплоты и влаги в самом помещении. Система кондиционирования обеспечивает требуемую чистоту воздуха в зависимости от класса ЧП, его газовой-компонентный состав, специфические ароматические запахи, необходимое содержание положительных и отрицательных ионов, давление воздуха, показатель кратности воздухообмена и т.п.

В СКВ входит оборудование для различных процессов обработки, подачи и распределения воздуха, источники нагрева и охлаждения, средства автоматического регулирования, дистанционного управления и контроля параметров воздуха, а также насосы, вентиляторы, воздуховоды и трубопроводы для тепло- влажностной обработки, местные доводчики (подогреватели, охладители и увлажнители), контрольно-измерительные приборы и фильтры для очистки воздуха (стартовые и промежуточные фильтры).

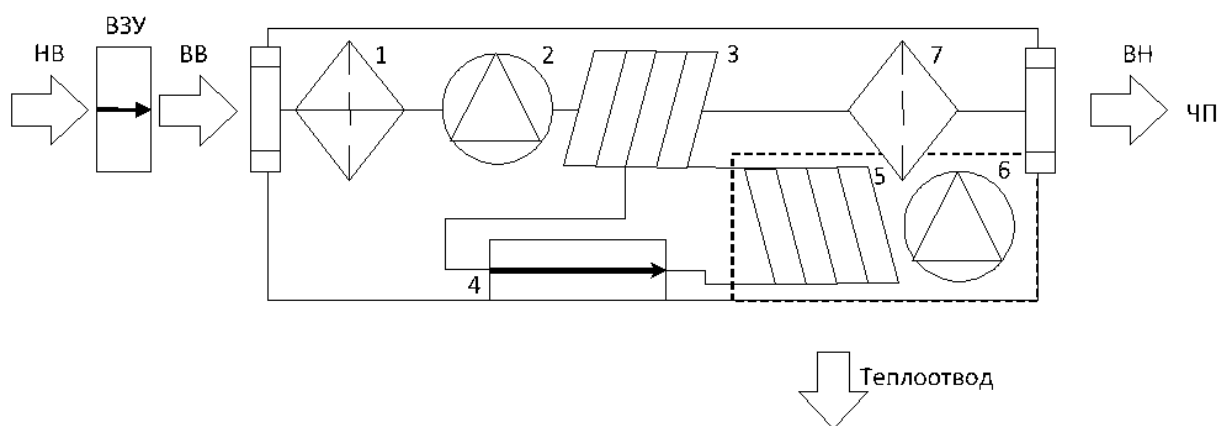
Основное оборудование для обработки и транспортировки воздуха обычно объединяются в аппарат, называемый кондиционером. По назначению СКВ подразделяют на системы комфортного и технологического кондиционирования. Комфортное кондиционирование применяют для создания и автоматического поддержания метеорологических параметров и условий по чистоте воздуха, установленных для помещений жилых, общественных и вспомогательных зданий. Технологическое



кондиционирование применяют для обеспечения требуемых параметров воздуха, отвечающих строгим технологическим требованиям производства изделий микроэлектроники. Технологическое кондиционирование воздуха в ЧП, где находится обслуживающий персонал, осуществляют с учетом санитарно-гигиенических требований[16-17].

Системы комфортного и технологического кондиционирования в зависимости от расположения кондиционеров по отношению к обслуживаемым помещениям делят на центральные и местные (кондиционеры-доводчики).

Центральными называются СКВ, обслуживающие несколько ЧП из общего центра, внешнего по отношению к обслуживаемым ЧП. Обработанный в центральном кондиционере воздух подается в обслуживаемые ЧП по разветвленной сети воздуховодов различных типоразмеров.

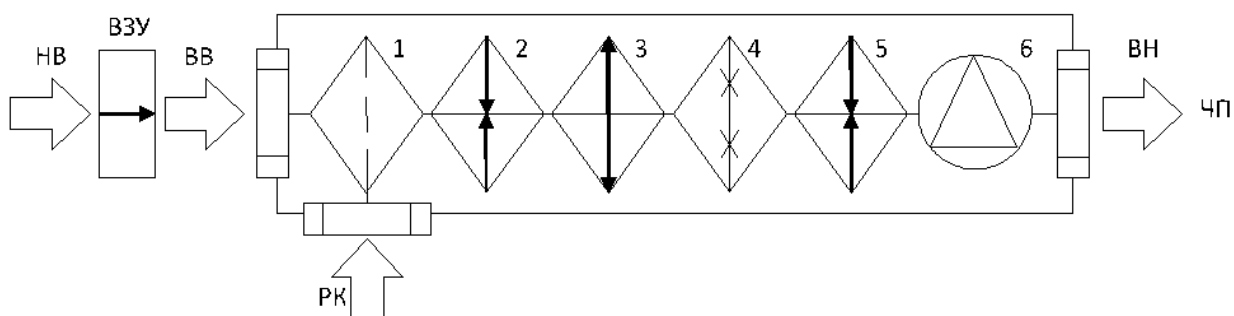


1- стартовый фильтр; 2 - вентилятор испарителя; 3 - испаритель; 4 - компрессор контура охлаждения; 5 - конденсатор; 6 - вентилятор конденсатора; 7 - финишный фильтр

Рисунок 7 - Кондиционер Доводчик

Системы кондиционирования воздуха, кондиционеры в которых непосредственно установлены в обслуживаемых помещениях, называются кондиционерами-доводчиками. С помощью таких систем обеспечивается

кондиционирование воздуха только для помещения, в котором располагается данный тип кондиционера-доводчика (рисунок 7).

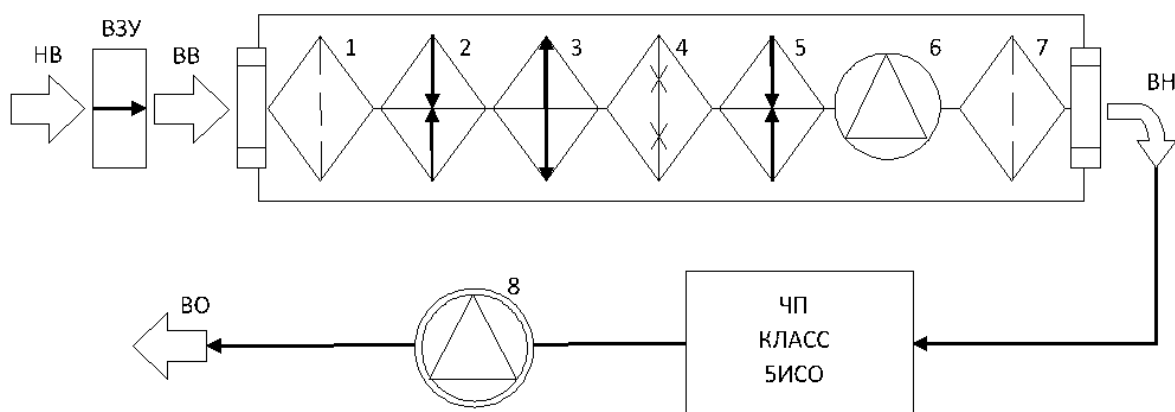


1 - фильтр; 2 - секция нагревания; 3 - секция охлаждения; 4 - секция увлажнения; 5 - секция нагревания; 6 - вентиляционная секция(вентилятор)

Рисунок 8 - Автономная система кондиционирования

По способу тепло- и холодоснабжения системы кондиционирования воздуха подразделяют на неавтономные и автономные кондиционеры (рисунок 8). Кондиционеры неавтономных СКВ снабжаются теплотой (горячей водой или паром) и холодом (холодной водой) от внешних источников. Кондиционеры автономных СКВ (автономные кондиционеры) имеют встроенные агрегаты, являющиеся источниками теплоты (электронагреватели) и холода (холодильные машины). Центральные СКВ, получившие наибольшее распространение, имеют неавтономные кондиционеры. Местные СКВ могут иметь неавтономные и автономные кондиционеры. Во всех случаях кондиционеры снабжаются электроэнергией для привода вентиляторов и насосов от внешних источников.

По характеру использования приточного наружного воздуха все СКВ подразделяются на приточные, рециркуляционные и с частичной рециркуляцией.

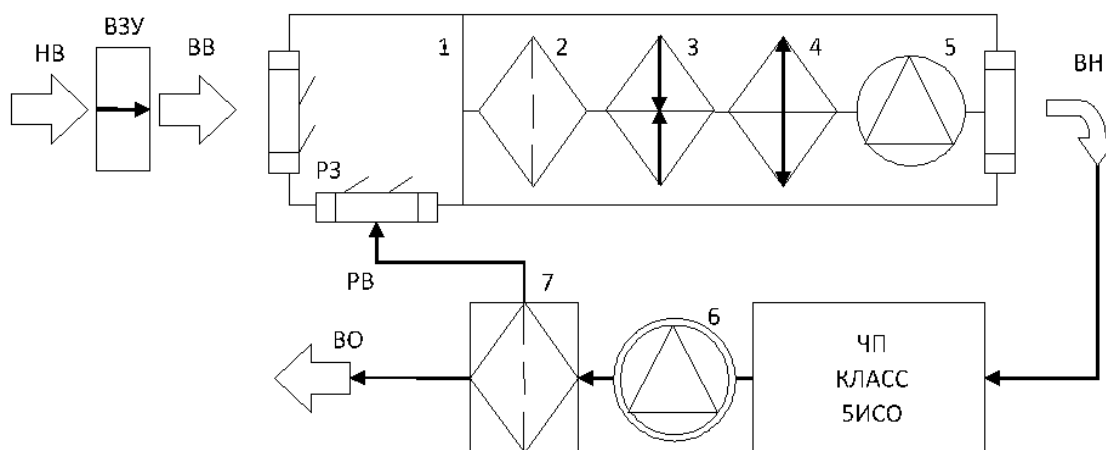


1 - стартовый фильтр; 2 - секция нагревания; 3 - секция охлаждения; 4 - секция увлажнения; 5 - секция нагревания; 6 - вентиляционная секция(вентилятор); 7 – предфильтр; 8 – вытяжной вентилятор; ВО – воздуховод

Рисунок 9 - Прямоточная система кондиционирования

В прямоточных системах (рисунок 9), используется только приток наружного атмосферного воздуха. Эти системы забирают наружный атмосферный воздух, обрабатывают его до требуемых параметров и подают в обслуживаемые ЧП. Из помещений воздух удаляется системами обработки и удаления воздуха посредством вытяжной вентиляции.

Прямоточные СКВ применяют для ЧП, в которых высокая вероятность возникновения аварийных чрезвычайных ситуаций, при этом в общий объём ЧП выделяются значительные количества токсичных и ядовитых паров, газов и пыли, содержатся болезнетворные микроорганизмы, исключающие повторное использование (рециркуляцию) удаляемого из помещения воздуха. Такие же системы применяют для помещений, в воздухе которых содержатся резко выраженные неприятные запахи, а также для помещений с выделениями взрывоопасных и пожароопасных веществ.



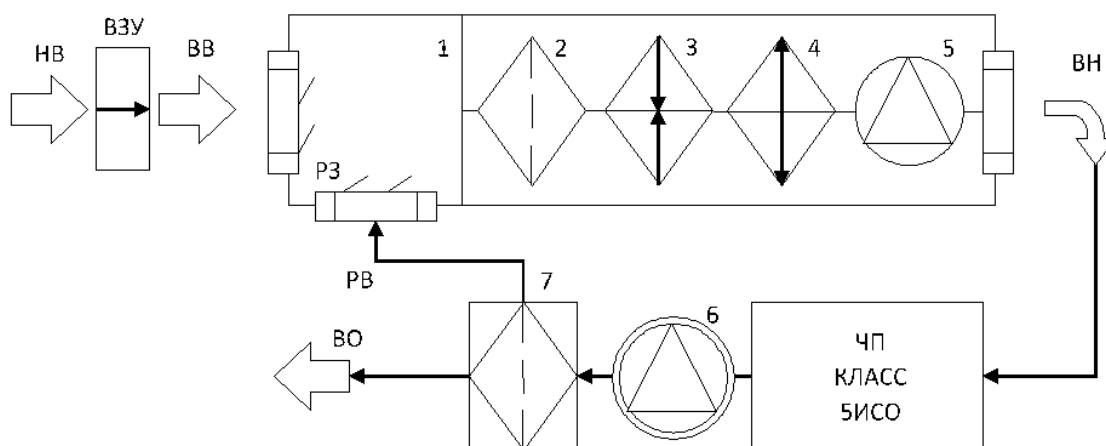
1- камера смешения; 2 – фильтр; 3 - секция нагрева; 4 - секция охлаждения; 5 - вентиляционная секция(вентилятор); 6 - вытяжной вентилятор; 7 - рециркуляционный фильтр

Рисунок 10 - Рециркуляционная система кондиционирования

В рециркуляционных схемах (рисунок 10) многократно используется один и тот же воздух, который забирается из ЧП, подвергается в системе доводки и обработки воздуха (кондиционере-доводчике) необходимой обработке до требуемых параметров воздуха в ЧП определенного класса чистоты и снова подается в помещение. Таким образом осуществляется полная рециркуляция воздуха, соотношение приточного наружного и рециркуляционного воздуха для ЧП высоких классов примерно 1:10. Обычно рециркуляционные контуры (РК) применяют для помещений, в которых образуются только тепло- и влагоизбытки и, в которых отсутствуют выделения вредных веществ (паров, газов и пыли) в значительных количествах.

В случае поступления в воздух ЧП вредных паров, газов и пыли, то применять систему кондиционирования с РЦК можно лишь при использовании в общей СКВ дополнительных устройств по обработке воздуха (фильтров для очистки воздуха).

В СКВ с полной рециркуляцией осуществляются только очистка воздуха от пыли и тепло-влажностная обработка, поэтому такие СКВ применяют для кондиционирования воздуха в ЧП, в которых требуется поддержание заданных температурно-влажностных параметров воздуха, а потребность в приточном наружном воздухе минимальна.

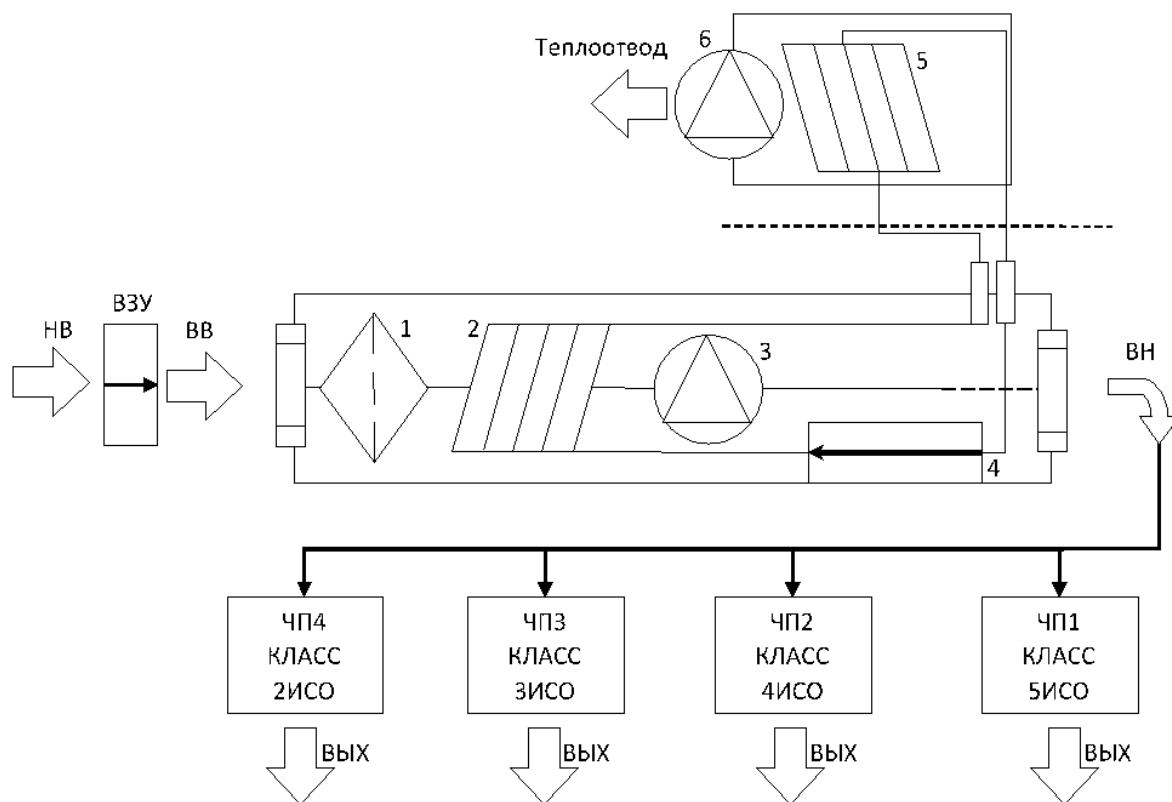


1- Камера смешения; 2 – фильтр; 3 - секция нагревания; 4 - секция охлаждения; 5 - вентиляционная секция(вентилятор); 6 - вытяжной вентилятор; 7 - рециркуляционный фильтр.

Рисунок 11 - Рециркуляционная система кондиционирования

Наиболее распространенной является СКВ с частичным РК, в которой используется смешанный состав наружного и рециркуляционного воздуха (рисунок 11). Такие системы применяют в случаях, когда воздух, используемый для РК, не содержит значительного количества токсичных паров и газов.

Схемы СКВ с частичной рециркуляцией воздуха являются наиболее универсальными и гибкими: в зависимости от технико-экологических условий в ЧП и качества наружного воздуха они могут работать по прямоточной схеме, по схеме с частичной или полной рециркуляцией.



1 –фильтр; 2 – испаритель; 3 – вентилятор; 4 -компрессор контура охлаждения; 5 -выносной конденсатор; 6 - вентилятор для охлаждения конденсатора; ВН– нагнетательный воздуховод; ЧП(1-4) – чистые помещения; (2-5) ИСО – классы чистоты

Рисунок 12 - Многозональные СКВ

В случае, если требуется подавать в несколько ЧП различных классов чистоты воздух с различными заданными параметрами микроклимата и запыленности, то применяют многозональные схемы СКВ (рисунок 12). В многозональных СКВ приточный наружный воздух обрабатывается в ЦК до определенных параметров, по воздуховодам подается к ЧП, а перед подачей непосредственно в ЧП подвергается дополнительной обработке и очистке в кондиционере-доводчике, в котором воздух доводится до параметров, требуемых для ЧП соответствующего класса.

Современные схемы СКВ с ЦК оборудуются неавтономными кондиционерами в многосекционном и агрегатном исполнении,

воздухозаборными устройствами со стартовым фильтрами, разветвленной сети воздухопроводов, воздухораспределительными устройствами, а также эффективными устройствами шумо- и вибропогашения. В настоящее время ЦК выпускаются с производительностью по воздуху от 10 до 250 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

В состав ЦК секционного типа входят рабочие секции (воздухозаборные устройства воздушный фильтр, воздухонагреватели первого и второго подогрева, воздухоохладители и камеры орошения, всасывающие и нагнетательные воздухопроводы воздушные клапаны и т.п.), а также камеры и секции корпуса кондиционера, необходимые для сборки и обслуживания рабочих секций (камеры присоединительные, смесительные, секции поворотные и др.). В секционном ЦК, представленном на рисунке 13, обрабатываемый воздух проходит через следующие секции.

Приточный наружный атмосферный воздух из воздухозаборного устройства поступает через открытый утепленный клапан в смесительную камеру на первичную очистку в СФ. Как правило, клапан имеет пневматический или электрический привод, который через систему автоматического управления включается в схему пускателя электродвигателя вентилятора. При пуске вентилятора в работу привод открывает створки клапана, а при остановке - закрывает. Через регулирующий клапан по всасывающему воздухопроводу поступает в смесительную камеру ЦК. Из СФ через воздушную камеру воздух поступает в теплообменники секции первого подогрева, в которых при необходимости воздух нагревается до требуемой температуры. Нагрев воздуха регулируется изменением температуры и расхода горячей воды, поступающей в теплообменники. Если в кондиционере используют теплообменники, обогреваемые паром, то здесь предусмотрен обводной канал, расход воздуха через который регулируется секционным клапаном.

Из секции первого подогрева через воздушную камеру воздух поступает в камеру орошения, в которой подвергается увлажнению, осушке, охлаждению. Далее обрабатываемый воздух через воздушную камеру

поступает к теплообменникам секции второго подогрева. Далее воздушный поток проходит в переходную секцию, посредством которой воздушный канал секций соединяется с всасывающим воздуховодом вентилятора. Для обеспечения горизонтальной связки и установки секций и камер служат опоры. Нагревательное отверстие вентилятора соединяется с всасывающим воздуховодом, по которому подготовленный в кондиционере воздух поступает в ЧП через кондиционер- доводчик.

Также для обеспечения требуемых параметров внутрипроизводственной среды ЧП для нужд микроэлектроники используются неавтономные агрегатные кондиционеры номинальной производительностью по воздуху от 3,15 до 20,0 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Данный тип кондиционеров имеют условный индекс КНБ (кондиционер неавтономный). Цифровое обозначение отвечает номинальной производительности по воздуху в тысячах м<sup>3</sup> в час. Кондиционеры КНБ предназначены для круглогодичного поддержания в ЧП, заданных температуры и относительной влажности воздуха, запыленности и кратности воздухообмена, необходимых по технологическим или санитарно-гигиеническим требованиям для ЧП заданного класса. Они могут работать как на одном наружном воздухе, так и с полной и частичной рециркуляцией воздуха. Кондиционеры могут применяться в системах кондиционирования с тепло- и холодоснабжением от центральных источников (котельная, холодильная станция, артезианская скважина), при этом предельные значения температуры наружного атмосферного воздуха, обрабатываемого в КНБ лежат в пределах от плюс 40 до минус 45 °С. Кондиционеры оснащены электрической системой регулирования и обеспечивают автоматическое поддержание температуры воздуха в помещениях с точностью  $\pm 1$  °С и относительной влажности с точностью  $\pm 7$  % [18].



## 1.5 Эксергетический подход для оценки СКВ

Изобретенные человеком машины и аппараты, работают с помощью преобразования энергии. Поэтому естественно, что среди различных подходов к ее изучению, совершенствованию и эксплуатации важнейшее место занимает эксергетический метод. Для этого необходимо создание соответствующей теоретической модели рассматриваемого или проектируемого технического объекта. Такая модель называется технической системой. Она должна отражать множество входящих элементов, связи между ними, а также связи между внешними элементами.

Эксергетический метод термодинамического анализа, основан на использовании понятия эксергии. Под эксергией понимают максимальную работу, которую можно получить от системы при данном состоянии окружающей среды. Таким образом, при определении эксергии объект исследования включает прежде всего техническую систему, после чего окружающую среду, и в заключении, меру эксергии.

Рассматриваемая техническая система бывает, как простой, так и сложной. Однако, во втором случае, выбираются характеристики технической системы, позволяющие рассмотреть ее с помощью применения термодинамических характеристик.

Оценка эффективности процессов обработки воздуха проводится методом эксергетических балансов, отражающих равенство подведенной к системе эксергии и отведенной от нее эксергии и потерь.

Основными задачами эксергетического анализа являются [19]:

- оценка всех энергоресурсов и энергоносителей, в пределах одного технологического процесса;
- определение степени термодинамического совершенства технических систем, установок, аппаратов по проектным и эксплуатационным данным;

- определение на всех этапах преобразования и использования энергии потерь эксергии во всех элементах систем и установок;

- термодинамическая оптимизация систем, установок и их элементов.

Эксергетический анализ существующих систем проводится в следующей последовательности:

- рассматриваемая система (или ее часть) мысленно отделяется некоторой замкнутой контрольной поверхностью от других объектов;

- выбираются параметры окружающей среды (влажность и температура);

- проводится оценка совершенства рассматриваемой системы, определяется эксергетический КПД системы и отдельных ее элементов, оцениваются относительные эксергетические потери.

В настоящее время многие ученые начали широко использовать эксергетический подход для определения оптимальных термодинамических процессов, протекающих в различных энергетических установках, в том числе в системе СКВ для нужд микроэлектроники [20-21].

Расчеты материально и энергетического СКВ с учетом эксергии дает возможность в упрощенной и наглядной форме решить ряд научно-технических задач. С их помощью, возможно минимизировать повторяющиеся ошибки, связанные с игнорированием качественной стороны превращений, создать условия для решения вопросов энерго- и ресурсосбережения [22].

Для исследуемой системы СКВ в начале составляют материальный и тепловой балансы, и как, следовательно, и эксергетический. В отличие от теплового, эксергетический баланс учитывает потери энергии от необратимости процессов в СКВ и тем самым приближает систему к идеальной, для которой эксергетический КПД равен единице.

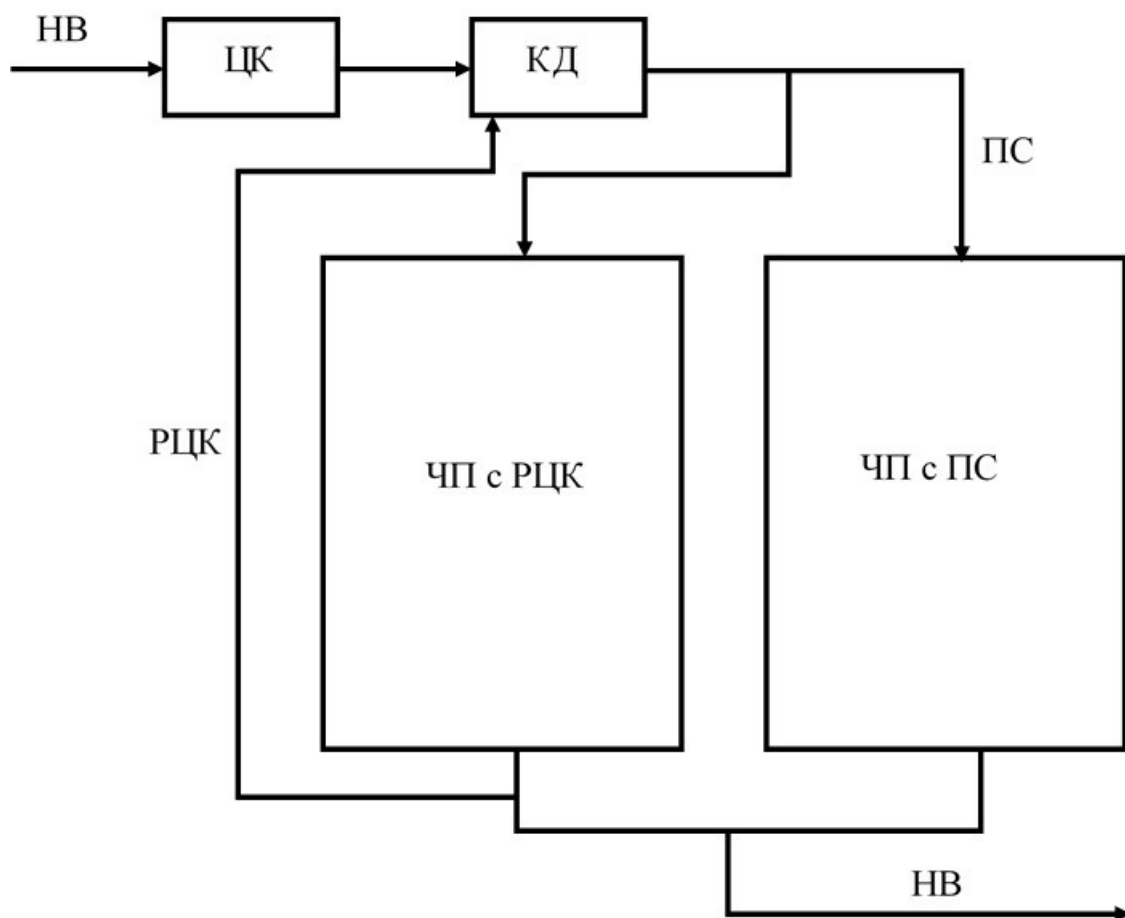
Эксергетический баланс исследуемой схемы СКВ ЧП имеет следующий вид:

$$E_{скв} = E_{чп} + \sum_{i=1}^n E_i ,$$

где  $E_{скв}$  - полная эксергия воздуха СКВ ЧП, Дж/кг;  $E_{чп}$  - эксергия воздуха в ЧП, Дж/кг,  $\sum_{i=1}^n E_i$  - сумма потерь эксергии в элементах СКВ, Дж/кг.

На основе эксергетического баланса определяются абсолютные или относительные характеристики СКФВ и отдельных ее элементов, далее строится диаграмма Грассмана, которая в полной мере отражает потоки и потери эксергии в исследуемой СКВ.

Эксергетический баланс СКВ составляется на основе принципиальной схемы, представленной на рисунке 13.



НВ – наружный воздух, ЦК – центральный кондиционер, КД – кондиционер доводчик, ПС –прямоточная система, РЦК – рециркуляционный контур, ЧП – чистое помещение

Рисунок 13 - Принципиальная схема СКВ ЧП с РЦК и ПС

Работа исследуемой СКВ в ТПГ и ХПГ зависит от параметров наружного воздуха НПТГ (температуры воздуха и его влагосодержания). Воздух из окружающей среды поступает в центральный кондиционер (ЦК), далее проходит через калорифер I-ого подогрева, охлаждается и увлажняется в камере орошения, подогревается в калорифере II-ого подогрева, после чего переносится в кондиционер-доводчик (КД) и подается в ЧП.

Эффективность СКВ и всех её элементов будет выше, чем меньше потерь эксергии и как следствие повышение эффективности функционирования СКВ будет характеризоваться эксергетическим КПД, который можно определить из эксергетического баланса:

$$\eta_e = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{ex}}} ,$$

Удельная эксергия воздуха в элементах СКВ ( $e_i$ ) определяется по формуле [23]:

$$e_i = T_{\text{нв}} \left\{ (C_{p.c} + d_i C_{p.n}) \left( \frac{T_i}{T_{\text{нв}}} - 1 - \ln \frac{T_i}{T_{\text{нв}}} \right) + i + R_n \left[ (0,622 + d_i) \ln \frac{p_i (0,622 + d_o)}{p_{\text{нв}} (0,622 + d_i)} + d_i \ln \frac{d_i}{d_{\text{нв}}} \right] \right\} ,$$

где  $T_{\text{нв}}$  и  $d_{\text{нв}}$  - температура и влагосодержание наружного воздуха, °К и г/кг;

$C_{p.c}$ ,  $C_{p.n}$  - удельная теплоемкость сухого воздуха и водяного пара, кДж/кг\*К;

$p_i$ ,  $p_{\text{нв}}$  - парциальное давление воздуха в i-элементе СКВ и в наружном воздухе, Па;

$R_n$  - универсальная газовая постоянная водяного пара, Дж/(кг\* К);

$T_i$ ,  $d_i$  - температура и влагосодержание воздуха в i-элементе СКВ, 0К и г/кг.

Необходимо отметить, что при выполнении расчетов не были учтены потери эксергии, связанные с потерей аэродинамического давления в СКВ, которыми можно пренебречь.

## **Выводы по первой главе**

Рассматривая различные литературные источники используемые для написания первой главы, были конкретизированы требования, предъявляемые к ЧП различных классов, установлены показатели энергоэффективности СКВ, проведен анализ основных методов энергосбережения для СКВ ЧП, проведен анализ различных схем воздухоподготовки, рассмотрены основные теоретические положения термодинамического анализа СКВ на примере эксергетического анализа СКВ ЧП.

## Глава 2. Расчетная часть

### 2.1. Расчет эксергетических потерь для ПС ТПГ

Для оценки эксергетических потерь построена диаграмма Мольте процессов кондиционирования воздуха прямооточного типа для следующих параметров наружного и внутреннего воздуха в теплый период года (ТПГ): ТПГ - температура воздуха ( $T_{\text{нв}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ); влагосодержание ( $d_{\text{нв}} = 10,9 \text{ г/кг}$ ), относительная влажность ( $\phi_{\text{нв}} = 41\%$ ), энтальпия ( $I_{\text{нв}} = 58,1 \text{ кДж/кг}$ ); барометрическое давление ( $p_{\text{нв}} = 101325 \text{ Па}$ ); ЧП -  $T_{\text{чп}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $d_{\text{чп}} = 6,2 \text{ г/кг}$ ;  $\phi_{\text{чп}} = 40 \%$ .

Последовательность изменений, происходящая с влажным воздухом, проходящим через элементы ПС СКВ в ТПГ, показана на рисунке 14. Для предложенной модели влажного воздуха была построена диаграмма Грассмана потерь эксергии при критической температуре наружного воздуха в ТПГ -  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

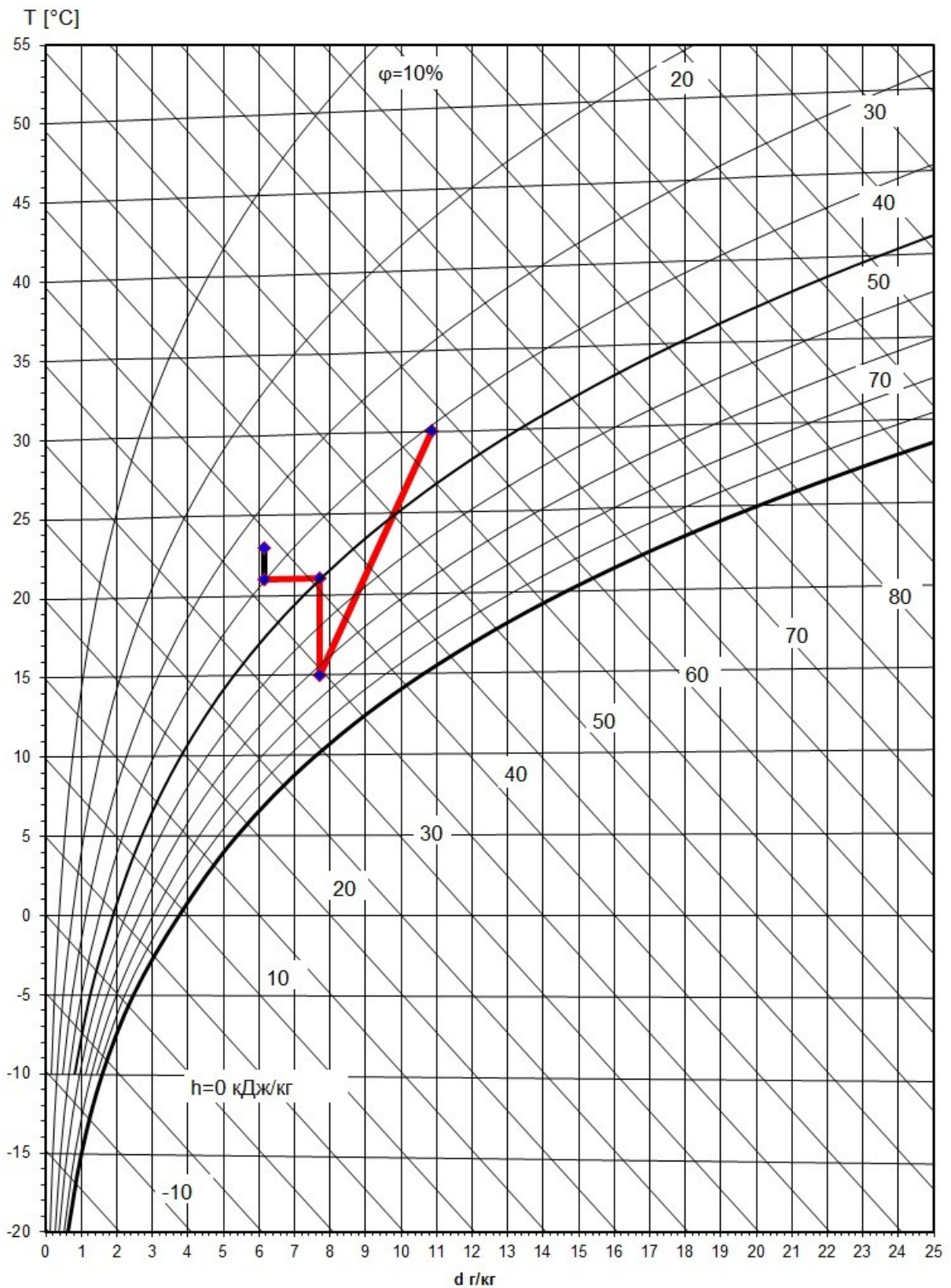


Рисунок 14 - Диаграмма Молье для ПС ТПГ

Подвергая анализу полученную диаграмму Молье для ПС ТПГ, определены отрезки, а именно: отрезок АВ соответствует процессу



увлажнения, происходящем в камере орошения,  $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 73\%$ ; отрезок ВС соответствует процессу нагревания, происходящем в калорифере 2,  $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 50\%$ ; отрезок CD соответствует процессу доводки воздуха, происходящем в КД,  $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 40\%$ , отрезок ED соответствует выходящему воздуху из ЧП,  $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 35\%$ .

Параметры, характеризующие состояние обрабатываемого воздуха в элементах ПС СКВ приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Параметры воздуха ПС СКВ в ТПГ.

Точки на диаграмме Молье	T, °C	I, кДж/кг	d, г/кг	$\varphi$ , %	$e_i$ , кДж/кг
A (НВ)	30	58,1	10,9	41,0	0
B (КО)	15	34,7	7,7	73,0	-79,82
C (Кал. 2)	21	40,8	7,7	50,0	-46,83
D (КД)	21	36,9	6,2	40,0	-35,99
E (ЧП)	23	38,7	6,1	35,0	-46,63

Для построения диаграммы Грассмана системы ПС СКВ при  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , определяем потери эксергии в основных ее элементах, в процентном соотношении подаваемой эксергии в исследуемую СКВ:

- для камеры орошения:  $X_{\text{ко}} = \frac{e_{\text{ко}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 38,14$  ;

- для калорифера 2-го подогрева:  $X_{\text{кал.2}} = \frac{e_{\text{кал.2}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 22,38$  ;

- для ЧП:  $X_{\text{чп}} = \frac{e_{\text{чп}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 17,20$  ;

- для КД:  $X_{кд} = \frac{e_{кд}}{E_{вх}} \times 100 = 22,28$ .

Для построения диаграммы Грассмана составляем эксергетический баланс прямоточной схемы СКФВ при +30 °С:

$$E_{вх} = X_{кд} + X_{кал.2} + X_{чп} + X_{ко} = 100\%.$$

После чего, строим диаграмму Грассмана ПС СКВ для ТПГ изображенную на рисунке 17.

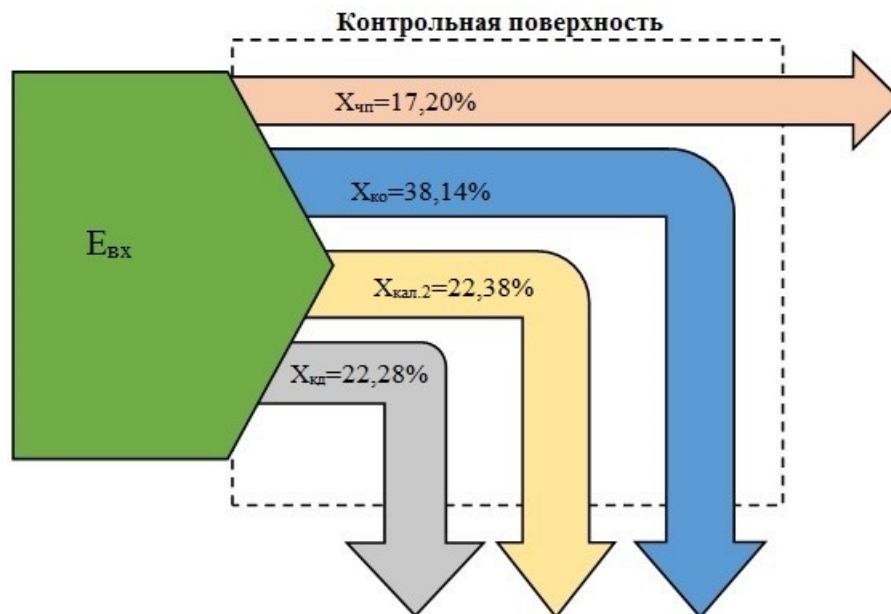


Рисунок 15 - Диаграмма Грассмана для ПС СКВ в ТПГ

Проанализировав построенные диаграммы Грассмана для ПС СКВ в ТПГ, видно, что наибольшие эксергетические затраты присутствуют в процессах обработки воздуха, а именно: увлажнения (38,14 %) и нагреве (22,38%).

## 2.2. Расчет эксергетических потерь для ПС ХПГ

Для ХПГ выбраны следующие параметры наружного и внутреннего воздуха: температура воздуха ( $T_{\text{нв}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ ); влагосодержание ( $d_{\text{нв}} = 0,2 \text{ г/кг}$ ), относительная влажность ( $\phi_{\text{нв}} = 95\%$ ), энтальпия ( $I_{\text{нв}} = -29,8 \text{ кДж/кг}$ ); барометрическое давление ( $p_{\text{нв}} = 101325 \text{ Па}$ ); ЧП -  $T_{\text{чп}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $d_{\text{чп}} = 6,2 \text{ г/кг}$ ;  $\phi_{\text{чп}} = 40 \%$ .

Последовательность изменений, происходящая с влажным воздухом, проходящим через элементы ПС СКВ в ХПГ, показана на рисунке 18. Для предложенной модели влажного воздуха была построена диаграмма Грассмана потерь эксергии при критической температуре наружного воздуха в ТПГ -  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

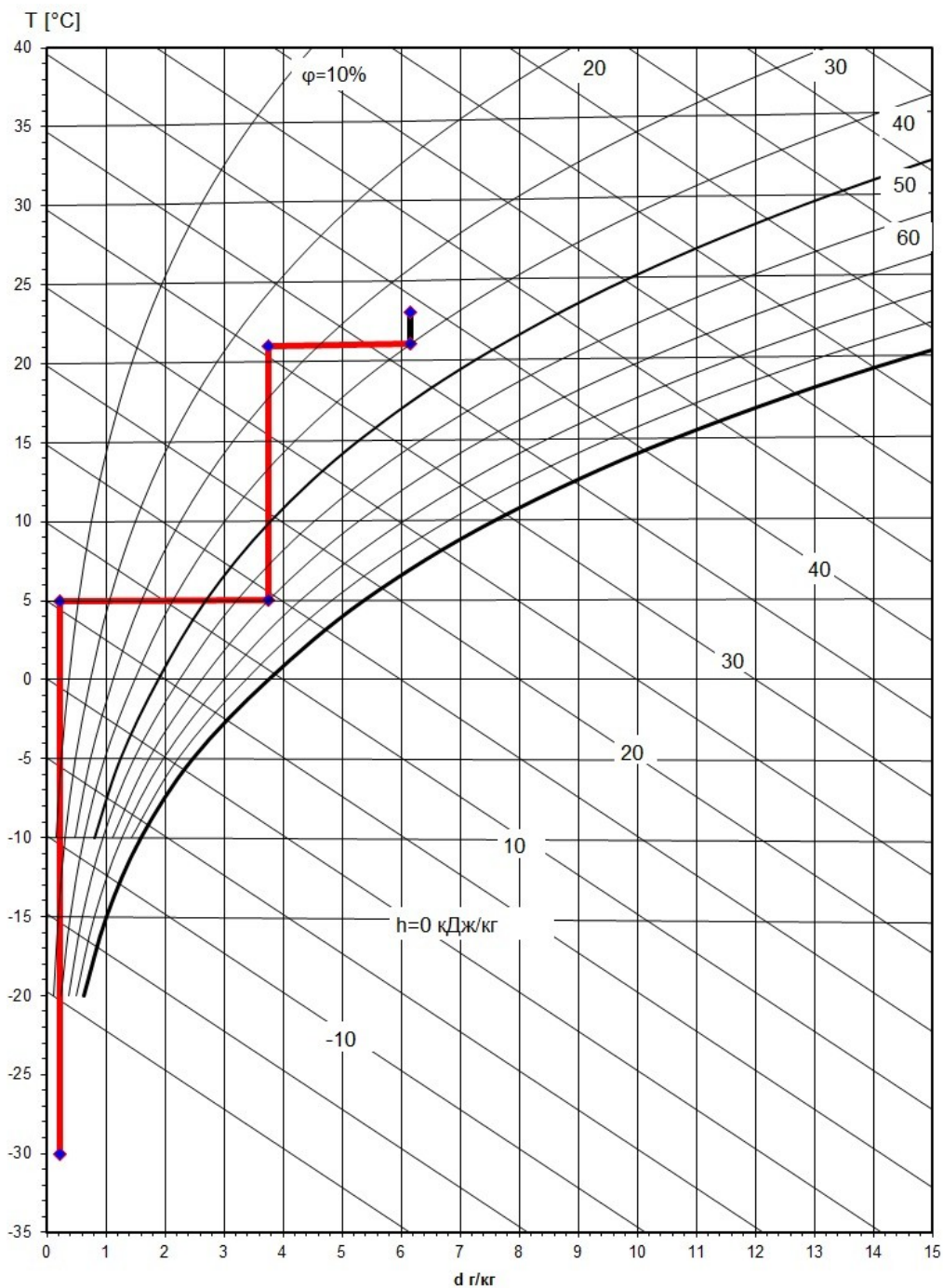


Рисунок 16 - Диаграмма Молье для ПС ХПГ

Анализируя полученную диаграмму Молье для ПС ХПГ, определены отрезки, а именно: отрезок FG соответствует процессу нагревания, происходящем в калорифере 1,  $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 4\%$ ; отрезок GI соответствует процессу увлажнения, происходящем в камере орошения,  $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 70\%$ ; отрезок IR соответствует процессу нагревания, происходящим в калорифере 2,  $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 25\%$ , отрезок RM соответствует процессу доводки воздуха,

происходящем в КД,  $T = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 40\%$ , отрезок ML соответствует выходящему воздуху из ЧП,  $T = 23^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 35\%$ .

Параметры, характеризующие состояние обрабатываемого воздуха в элементах ПС СКВ приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Параметры воздуха ПС СКВ в ХПГ.

Точки на диаграмме Молье	T, °C	I, кДж/кг	d, г/кг	$\phi$ , %	$e_i$ , кДж/кг
F (НВ)	-30	-29,8	0,2	95,0	0
G (Кал. 1)	5	5,6	0,2	4,0	200,64
I (КО)	5	36,9	3,8	70,0	202,63
R (Кал. 2)	21	30,8	3,8	25,0	278,44
L (ЧП)	21	36,9	6,2	40,0	280,61
M (КД)	23	38,7	6,1	35,0	280,33

Для построения диаграммы Грассмана системы ПС СКВ при  $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , определяем потери эксергии в основных ее элементах, в процентном соотношении подаваемой эксергии в исследуемую СКВ:

- для калорифера 1-го подогрева:  $X_{\text{кал.1}} = \frac{e_{\text{кал.1}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 16,04$  ;

- для камеры орошения:  $X_{\text{ко}} = \frac{e_{\text{ко}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 16,19$  ;

- для калорифера 2-го подогрева:  $X_{\text{кал.2}} = \frac{e_{\text{кал.2}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 22,25$  ;

- для ЧП:  $X_{\text{чп}} = \frac{e_{\text{чп}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 23,11$  ;

- для КД:  $X_{кд} = \frac{e_{кд}}{E_{вх}} \times 100 = 22,40$ .

Для построения диаграммы Грассмана составляем эксергетический баланс прямоточной схемы СКФВ при  $-30^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{вх} = X_{кал.1} + X_{ко} + X_{кал.2} + X_{чп} + X_{кд} = 100\%.$$

После чего, строим диаграмму Грассмана ПС СКВ для ХПГ изображенную на рисунке 17.

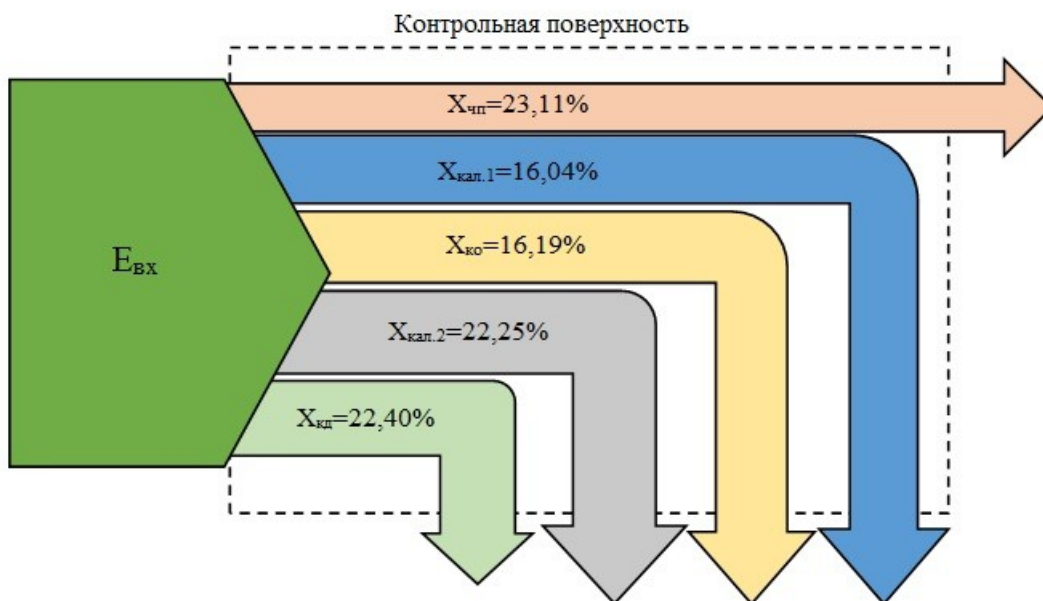


Рисунок 17 - Диаграмма Грассмана для ПС СКВ в ХПГ

Проведя анализ построенной диаграммы Грассмана для ПС СКВ в ХПГ, наблюдаются, что наибольшие эксергетические затраты присутствуют в процессах: нагреве (калорифер 2-го подогрева 22,25 %) и доводки (22,40%) воздуха.

### 2.3. Расчет эксергетических потерь для РЦК ТПГ

Для РЦК СКВ в ТПГ были приняты следующие параметры воздуха, а именно: температура воздуха ( $T_{\text{нв}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); влагосодержание ( $d_{\text{нв}} = 10,9 \text{ г/кг}$ ), относительная влажность ( $\phi_{\text{нв}} = 41\%$ ), энтальпия ( $I_{\text{нв}} = 58,1 \text{ кДж/кг}$ ); барометрическое давление ( $p_{\text{нв}} = 101325 \text{ Па}$ ); ЧП -  $T_{\text{чп}} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{\text{чп}} = 6,2 \text{ г/кг}$ ;  $\phi_{\text{чп}} = 40 \%$ .

Последовательность изменений, происходящая с влажным воздухом, проходящим через элементы РЦК СКВ в ТПГ, показана на рисунке 20. Для предложенной модели влажного воздуха была построена диаграмма Грассмана потерь эксергии при критической температуре наружного воздуха в ТПГ -  $+30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

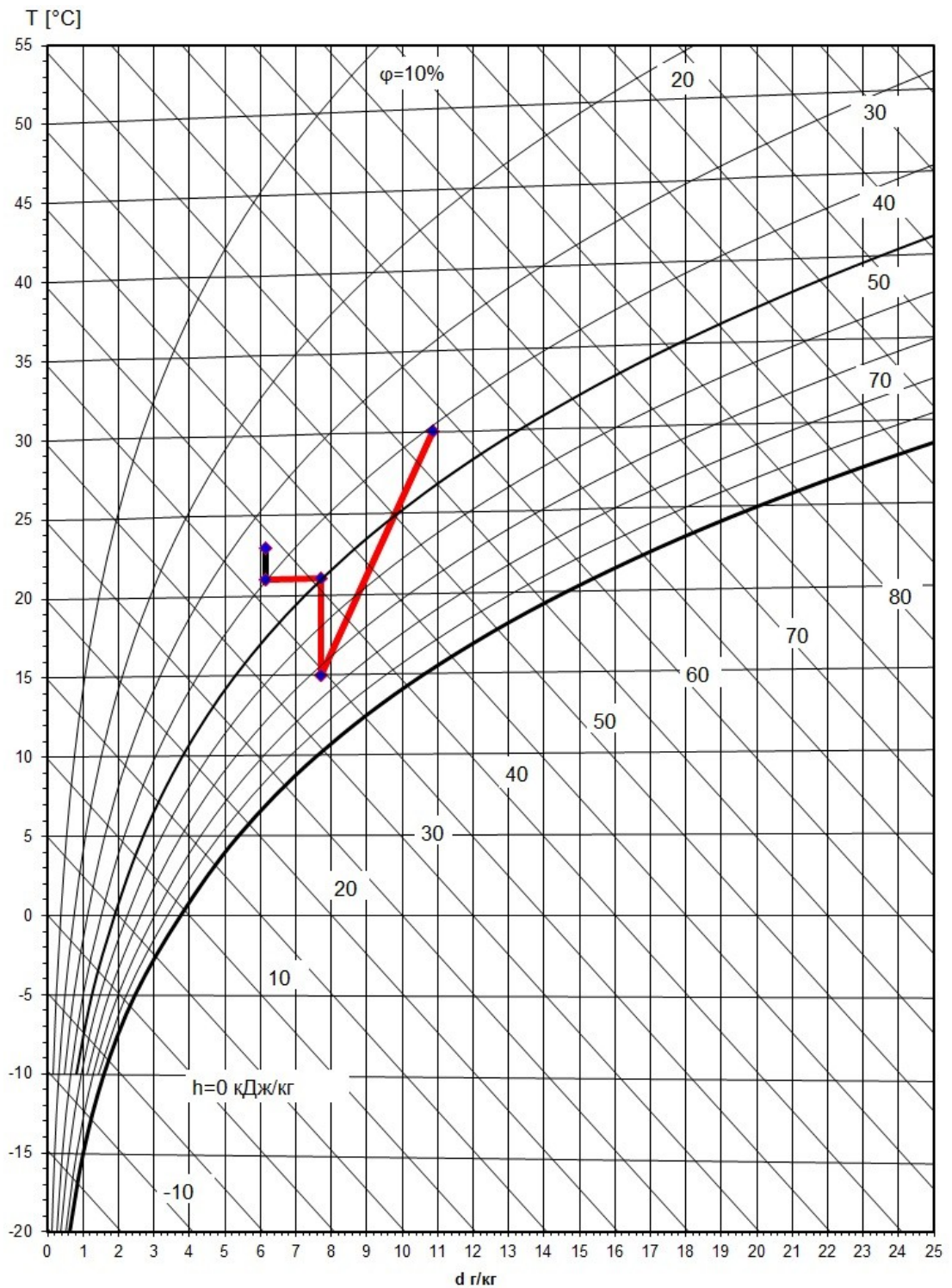


Рисунок 18 - Диаграмма Моляе для РЦК ТПГ

Анализируя полученную диаграмму Моляе для ПС ТПГ, определены отрезки, а именно: отрезок  $A_1B_1$  соответствует процессу увлажнения, происходящем в камере орошения,  $T = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 73\%$ ; отрезок  $B_1C_1$  соответствует процессу нагревания, происходящем в калорифере 2,  $T = 21^{\circ}\text{C}$ ,



$\varphi = 50\%$ ; отрезок  $C_1D_1$  соответствует процессу доводки воздуха, происходящем в КД,  $T = 21\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 40\%$ , отрезок  $E_1D_1$  соответствует выходящему воздуху из ЧП,  $T = 23^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 35\%$  отрезок  $E_1O_1$  соответствует циркуляционному воздуху СКВ,  $T = 21^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 40\%$ .

Параметры, характеризующие состояние обрабатываемого воздуха в элементах РЦК СКВ приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Параметры воздуха РЦК СКВ в ТПГ.

Точки на диаграмме Молье	T, °C	I, кДж/кг	d, г/кг	$\varphi$ , %	$e_i$ , кДж/кг
A <sub>1</sub> (НВ)	30	58,1	10,9	41,0	0
B <sub>1</sub> (КО)	15	34,7	7,7	95,0	-79,82
C <sub>1</sub> (Кал. 2)	21	40,8	7,7	50,0	-46,83
D <sub>1</sub> (КД)	21	36,9	6,2	40,0	-35,99
E <sub>1</sub> (ЧП)	23	38,7	6,1	35,0	-46,63
O <sub>1</sub> (РЦК)	21	36,9	6,2	40,0	-35,99

Для построения диаграммы Грассмана системы РЦК СКВ при  $+30\text{ }^\circ\text{C}$ , определяем потери эксергии в основных ее элементах, в процентном соотношении подаваемой эксергии в исследуемую СКВ:

- для камеры орошения:  $X_{\text{ко}} = \frac{e_{\text{ко}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 31,19$  ;

- для калорифера 2-го подогрева:  $X_{\text{кал.2}} = \frac{e_{\text{кал.2}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 18,30$  ;

- для ЧП:  $X_{\text{чп}} = \frac{e_{\text{чп}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 14,06$  ;

- для КД:  $X_{кд} = \frac{e_{кд}}{E_{вх}} \times 100 = 18,22$  ;

- для РЦК:  $X_{рцк} = \frac{e_{рцк}}{E_{вх}} \times 100 = 18,22$  .

Для построения диаграммы Грассмана составляем эксергетический баланс РЦК СКВ при +30 °С:

$$E_{вх} = X_{ко} + X_{кал.2} + X_{чп} + X_{кд} + X_{рцк} = 100\%.$$

После чего, строим диаграмму Грассмана РЦК СКВ для ТПГ изображенную на рисунке 19.

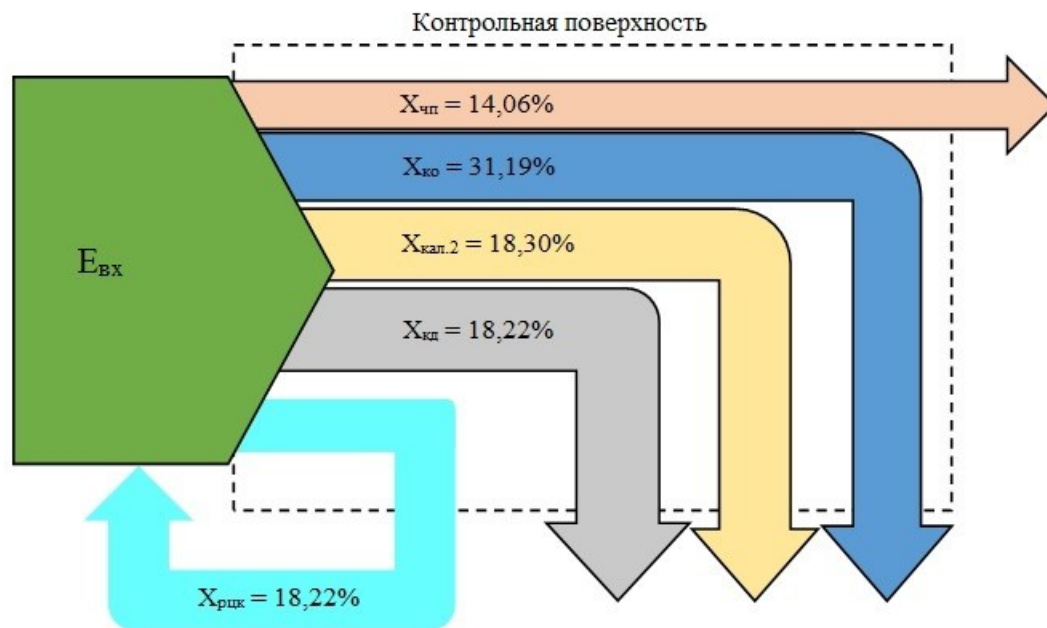


Рисунок 19 - Диаграмма Грассмана для РЦК СКВ в ТПГ

Проведя анализ построенной диаграммы Грассмана для РЦК СКВ в ТПГ, наблюдается, что наибольшие эксергетические затраты присутствуют в процессах обработки воздуха, а именно: увлажнения (38,14 %) и нагреве (22,38%).

## 2.4. Расчет эксергетических потерь для РЦК ХПГ

Для ХПГ выбраны следующие параметры наружного и внутреннего воздуха: температура воздуха ( $T_{\text{нв}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ ); влагосодержание ( $d_{\text{нв}} = 0,2 \text{ г/кг}$ ), относительная влажность ( $\phi_{\text{нв}} = 95\%$ ), энтальпия ( $I_{\text{нв}} = -29,8 \text{ кДж/кг}$ ); барометрическое давление ( $p_{\text{нв}} = 101325 \text{ Па}$ ); ЧП -  $T_{\text{чп}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $d_{\text{чп}} = 6,2 \text{ г/кг}$ ;  $\phi_{\text{чп}} = 40 \%$ .

Последовательность изменений, происходящая с влажным воздухом, проходящим через элементы РЦК СКВ в ХПГ, показана на рисунке 20. Для предложенной модели влажного воздуха была построена диаграмма Грассмана потерь эксергии при критической температуре наружного воздуха в ТПГ -  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

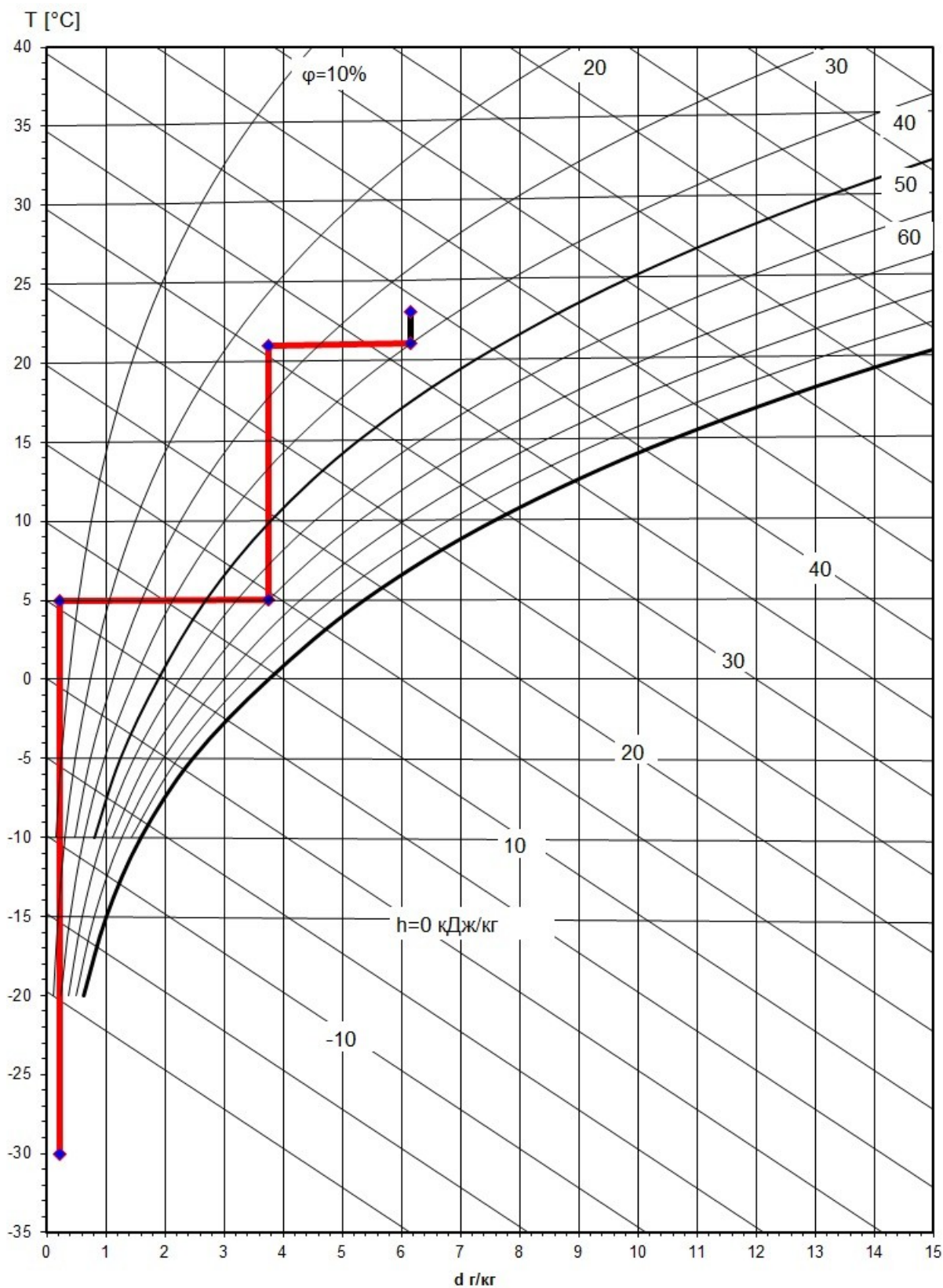


Рисунок 20 - Диаграмма Молье для РЦК ХПГ.

Изучая полученную диаграмму Молье для РЦК ХПГ, определены отрезки, а именно: отрезок  $F_2G_2$  соответствует процессу нагревания, происходящем в калорифере 1,  $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 4\%$ ; отрезок  $G_2I_2$  соответствует

процессу уважения, происходящем в камере орошения,  $T = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 70\%$ ; отрезок  $I_2R_2$  соответствует процессу нагревания, происходящим в калорифере 2,  $T = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 25\%$ , отрезок  $R_2M_2$  соответствует процессу доводки воздуха, происходящем в КД,  $T = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 40\%$ , отрезок  $M_2L_2$  соответствует выходящему воздуху из ЧП,  $T = 23^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 35\%$ , отрезок  $M_2O_2$  соответствует воздуху в РЦК.

Параметры, характеризующие состояние обрабатываемого воздуха в элементах РЦК СКВ приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Параметры воздуха РЦК СКВ в ХПГ.

Точки на диаграмме Молье	T, °C	I, кДж/кг	d, г/кг	$\varphi$ , %	$e_i$ , кДж/кг
F <sub>2</sub> (НВ)	-30	-29,8	0,2	95,0	0
G <sub>2</sub> (Кал. 1)	5	5,6	0,2	4,0	200,64
I <sub>2</sub> (КО)	5	36,9	3,8	70,0	202,63
R <sub>2</sub> (Кал. 2)	21	30,8	3,8	25,0	278,44
L <sub>2</sub> (ЧП)	21	36,9	6,2	40,0	280,61
M <sub>2</sub> (КД)	23	38,7	6,1	35,0	280,33
O <sub>2</sub> (РЦК)	21	36,9	6,2	40,0	280,61

Для построения диаграммы Грассмана системы РЦК СКВ при  $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , определяем потери эксергии в основных ее элементах, в процентном соотношении подаваемой эксергии в исследуемую СКВ:

- для калорифера 1-го подогрева:  $X_{\text{кал.1}} = \frac{e_{\text{кал.1}}}{E_{\text{ex}}} \times 100 = 13,10 \text{ } ;$

- для камеры орошения:  $X_{\text{ко}} = \frac{e_{\text{ко}}}{E_{\text{вх}}} \times 100 = 13,23$  ;

- для калорифера 2-го подогрева:  $X_{\text{кал.2}} = \frac{e_{\text{кал.2}}}{E_{\text{вх}}} \times 100 = 18,18$  ;

- для ЧП:  $X_{\text{чп}} = \frac{e_{\text{чп}}}{E_{\text{вх}}} \times 100 = 18,88$  ;

- для КД:  $X_{\text{кд}} = \frac{e_{\text{кд}}}{E_{\text{вх}}} \times 100 = 18,30$  ;

- для РЦК:  $X_{\text{рцк}} = \frac{e_{\text{рцк(кд)}}}{E_{\text{вх}}} \times 100 = 18,30$  ;

Для построения диаграммы Грассмана составляем эксергетический баланс РЦК СКФВ при  $-30^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{\text{вх}} = X_{\text{кал.1}} + X_{\text{ко}} + X_{\text{кал.2}} + X_{\text{чп}} + X_{\text{кд}} + X_{\text{рцк}} = 100\%.$$

После чего, строим диаграмму Грассмана РЦК СКВ для ХПГ изображенную на рисунке 21.

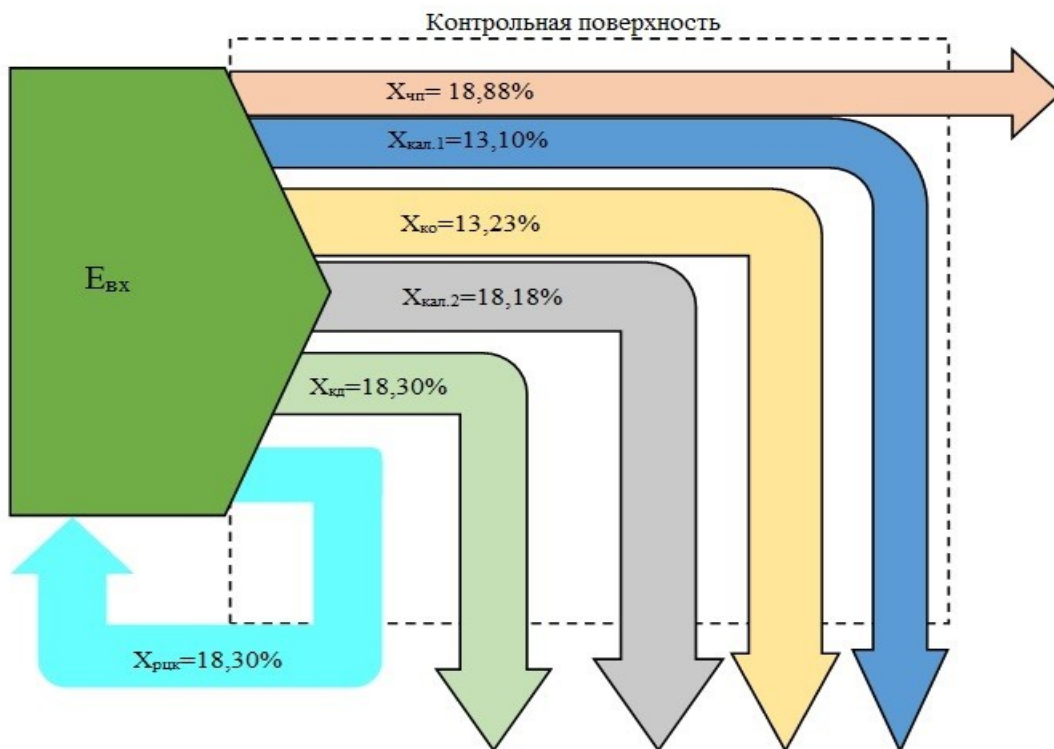


Рисунок 21 - Диаграмма Грассмана для РЦК СКВ в ХПГ

Проведя анализ построенной диаграммы Грассмана для РЦК СКВ в ХПП, наблюдается, что наибольшие эксергетические затраты присутствуют в калорифере 2-го подогрева (18,18%), кондиционере доводчике (18,30%), рециркуляционном контуре (18,30%).

## **Выводы по второй главе**

Исследуя различные варианты работы СКВ и применяя относительно новый подход оценки энергоэффективности с использованием термодинамики влажного воздуха, а именно эксергетического анализа. Выявлено, что наиболее эксергетически затратным участком СКВ является калорифер 2-го подогрева. При этом, расходуется значимое количество энергетических ресурсов системы. Также выявлено, что в ТПГ наибольшие затраты приходятся на процессы увлажнения воздуха, осуществляющиеся в камере орошения. Необходимо отметить, что эксергетический КПД элементов системы с РЦК ниже, чем ПС. Это обстоятельство, объясняется тем, что добавляются процессы обработки удаляемого воздуха из ЧП в кондиционере-доводчике, тем самым увеличивая общее количество составных компонентов системы обработки воздуха, которое приводит к снижению эксергетического КПД всей системы.



## **Заключение**

Рассматривая различные литературные источники используемые для написания первой главы, были конкретизированы требования, предъявляемые к ЧП различных классов, установлены показатели энергоэффективности СКВ, проведен анализ основных методов энергосбережения для СКВ ЧП, проведен анализ различных схем воздухоподготовки, рассмотрены основные теоретические положения термодинамического анализа СКВ на примере эксергетического анализа СКВ ЧП.

Исследуя различные варианты работы СКВ и применяя относительно новый подход оценки энергоэффективности с использованием термодинамики влажного воздуха, а именно эксергетического анализа. Выявлено, что наиболее эксергетически затратным участком СКВ является калорифер 2-го подогрева. При этом, расходуется значимое количество энергетических ресурсов системы. Также выявлено, что в ТПГ наибольшие затраты приходятся на процессы увлажнения воздуха, осуществляющиеся в камере орошения. Необходимо отметить, что эксергетический КПД элементов системы с РЦК ниже, чем ПС. Это обстоятельство, объясняется тем, что добавляются процессы обработки удаляемого воздуха из ЧП в кондиционере-доводчике, тем самым увеличивая общее количество составных компонентов системы обработки воздуха, которое приводит к снижению эксергетического КПД всей системы.

### Список литературных источников:

1. ГОСТ Р ИСО 14644-1: «Чистое помещения и связанные с ними контролируемые среды»
2. ISO 14644-1:2015 // Cleanrooms and associated controlled environments -- Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration.
3. ГОСТ Р ИСО 14644-4: «Чистое помещения и связанные с ними контролируемые среды»
4. Большая советская энциклопедия. Т. 13. М.: Советская энциклопедия, 1973.
5. ASHRAE Handbook. Systems. USA, Atlanta, 1992.
6. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. – М.: Клинрум, 2002. – 304 с.
7. Федотов А.Е. Чистые помещения. Второе изд., перераб. и доп. – М.: АСИНКОМ, 2003. – 576 с.
8. Хаякава И. Чистые помещения. Пер. с японск.– М.: Мир, 1990. – 456 с.
9. Уайт В. Проектирование чистых помещений. Пер. с англ. – М.: Клинрум, 2004. – 360 с.
10. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года».
11. ГОСТ Р 51388-99 «Энергосбережение. Информирование потребителей об энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения»
12. ГОСТ 32970-2014 (ISO 5151:2010) Кондиционеры и тепловые насосы без воздухопроводов. Испытания и оценка рабочих характеристик.
13. AS 1668.2-2012 «The use of ventilation and airconditioning in buildings Mechanical ventilation in buildings»

14. ISO 5151:2010(en) Non-ducted air conditioners and heat pumps — Testing and rating for performance
15. Top Runner Program, March, 2015
16. СНиП 2.04.05–86. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 64 с.
17. ГОСТ 30494-2011 // Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
18. Богословский В.Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов / В.Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров. – Стройиздат, 1985. – 367 с.
19. Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие для вузов.- 2-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
20. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
21. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / [В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев и др.]; под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского; Ин-т технической теплофизики АН УССР. – Киев: Наук.думка, 1991. – 360 с.
22. Шевченко В.И., Шевченко А.В., Шевченко М.В. Эксергетический метод оценивания технического состояния средств обеспечения температурно-влажностного режима // Технические науки №11, 2015 год, С. 936 – 941.
23. Рябышенков А.С., Захаров А.Н., Гаврилин В.А. Эксергетический анализ рециркуляционной системы кондиционирования и фильтрации воздуха в чистых помещениях. / Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники / Под ред В.И. Каракеяна. – М.: МИЭТ, 2016. С. 28–33.
24. Захаров А.Н. Рябышенков А.С. Применение эксергетического анализа для оценки энергоэффективности систем кондиционирования воздуха

чистых помещений / Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика - 2017»: сборник статей. – М.: МИЭТ, 2017. -С. 48-53