

**УДК 628.8**

Захаров А. Н., студент ПЭ-11

Никулина И.М., ст. преподаватель

Рябышенков А.С., доцент

Национальный исследовательский университет «Московский институт  
электронной техники»

### **Анализ эффективности комфортного кондиционирования воздуха в чистых помещениях**

Эффективность системы комфортного кондиционирования воздуха (СККВ) в теплый и холодный периоды года (ТПГ и ХПГ) для чистых помещений (ЧП) напрямую зависит от эффективной работы ее составных элементов (стартовый фильтр, центральный кондиционер, кондиционер-доводчик, финишные фильтры, система удаления воздуха).

При выполнении практически любого технологического процесса требуется соблюдение строгих нормативных требований по соблюдению параметров микроклимата, запыленности воздуха и т.п. Согласно стандарта ГОСТ Р ИСО 14644-1 «Чистые 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].

Энергетическая эффективность СККВ определяется, насколько полно используется подаваемая извне и производимая внутри энергия, то есть, насколько низки потери энергии для осуществления необходимых процессов воздухоподготовки (нагрев, охлаждение, осушение, увлажнение и очистка) для ЧП.

Существует несколько методов термодинамического анализа СККВ, среди которых выделяют эксергетический подход к оценке данной системы,

основанный на использовании понятия эксергии. Под эксергией понимают максимальную работу, которую можно получить от системы при данном состоянии окружающей среды [3].

Эксергетический подход для анализа СККВ, позволяет оценить степень использования энергии, ее потери, а также получить распределение этих потерь по отдельным участкам всей системы воздухоподготовки [4].

Необходимо отметить, при использовании рассматриваемого подхода используются такие понятия, как обратимый процесс, который может проходить в обоих направлениях без затрат энергии системы, то есть только за счет полученной в ходе прямого процесса полезной работы, и необратимый процесс, в котором присутствуют потери энергии в процессе.

При анализе СККВ вначале составляют материальный и тепловой балансы, и как следствие эксергетический.

В отличие от теплового баланса, который не отражает в полной мере приближения СККВ к идеальной, эксергетический баланс в большей степени учитывает энергетические потери от необратимых термодинамических процессов в СККВ и, тем самым, приближает систему к идеальной, для которой эксергетический КПД равен единице [5].

Эксергетический баланс СККВ ЧП имеет следующий вид (рисунок 1):

$$E_{\text{СККВ}} = E_{\text{ЧП}} + \sum_{i=1}^n E_i ,$$

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

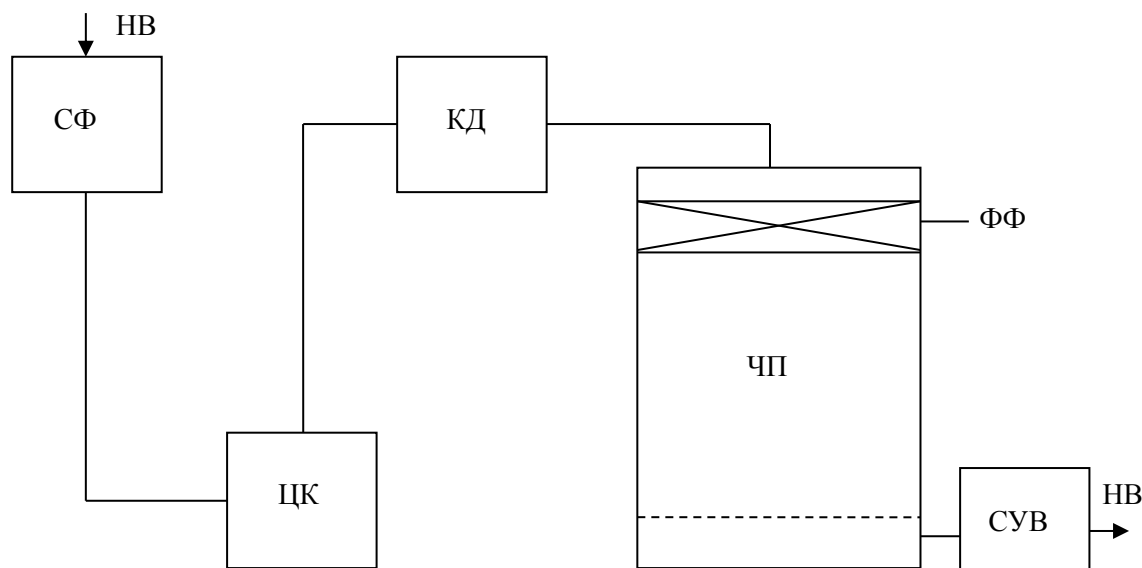


Рисунок 1 – Схема СККВ: НВ – наружный воздух, СФ - стартовый фильтр, ЦК – центральный кондиционер, КД – кондиционер доводчик, ФФ – финишные фильтры, СУВ – система удаления воздуха.

На основе эксергетического баланса определяются абсолютные или относительные характеристики СККВ и отдельных ее элементов, далее строится диаграмма Грассмана, которая в полной мере отражает потоки и потери эксергии в рассматриваемой СККВ [6].

Общая эксергия представляет сумму эксергий по трем основным показателям (термодинамический, химический, механический). В данной работе рассматривается механическая эксергия воздушных потоков в СККВ, которая представляет собой расширение от текущего давления до давления окружающей среды и рассчитывается по формуле 1. Исходные значения параметров воздуха и результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

$$E_i = \frac{R}{\mu} T_0 \ln\left(\frac{P}{P_0}\right), (1)$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная, кДж/(моль\*К);  $\mu$  – молярная масса влажного воздуха, кг/моль;  $T_0$  – температура окружающей среды, К;  $P$  и

$P_0$  – давление газа в рассматриваемом потоке и в состоянии равновесия с окружающей средой, кПа [7].

Таблица 1 – Исходные значения параметров воздуха

Параметры воздуха	Значение
Температура окружающей среды в ТПГ	303 °K
Температура окружающей среды в ХПГ	243 °K
Диаметр воздуховода	800 мм
Скорость воздуха в воздуховодах	12 м/с
Перепад давления на СФ	250 Па
Перепад давления в фильтре ЦК	450 Па
Перепад давления в фильтре КД	120 Па
Перепад давления в ФФ	120 Па
Избыточное давление в ЧП	25 Па
Коэффициент гидравлической вязкости воздуха при 30 °C	$1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$
Коэффициент гидравлической вязкости воздуха при -30 °C	$1,08 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Таблица 2 - Значения механической эксергии в фильтрах СККВ для ТПГ и ХПГ

Элемент СККВ	Эксергия кДж/кг	
	ТПГ	ХПГ
СФ	0,848	0,836
ЦК	0,627	0,623
КД	0,237	0,237
ФФ	0,129	0,129
СУВ	0,021	0,021

Молярная масса влажного воздуха находится по формуле 2 [8].

$$\mu = 28,96 - 10,944 \frac{P_n}{P_0}, (2)$$

где  $P_{\text{п}}$  – давление водяных паров.

Необходимое нагнетаемое давление в ЧП определяется по формуле 3.

$$P_{\text{нагн}} = P_0 + P_{\text{изб.ЧП}} + \Delta P_{\text{фф}} + \sum (h_{\text{тр.1}} + h_{\text{к.1}}) + \Delta P_{\text{кд}} + \sum (h_{\text{тр.2}} + h_{\text{к.2}}) + \Delta P_{\text{цк}} + \sum (h_{\text{тр.3}} + h_{\text{к.3}}) + \Delta P_{\text{сф}} + \sum (h_{\text{тр.4}}), \quad (3)$$

где  $P_{\text{изб.ЧП}}$  – избыточное давление в ЧП;  $\Delta P_{\text{фф}}$  – перепад давления в ФФ;  $\Delta P_{\text{кд}}$  – перепад давления в фильтре КД;  $\Delta P_{\text{цк}}$  – перепад давления в ЦК;  $\Delta P_{\text{сф}}$  – перепад давления в СФ;  $h_{\text{тр.i}}$  – потери в воздуховоде на трение;  $h_{\text{к.i}}$  – потери в воздуховоде на изменение направления.

Для построения диаграммы Грассмана системы СККВ в ТПГ и ХПГ, определяем потери эксергии в основных ее элементах, в процентном соотношении подаваемой эксергии в исследуемую СККВ. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Потери эксергии в основных элементах СККВ в ТПГ и ХПГ

Элемент СКФВ	Потери эксергии, %	
	ТПГ	ХПГ
СФ	44,54	45,29
ЦК	33,67	33,74
КД	12,73	12,84
ФФ	6,92	6,99
СУВ	1,13	1,14

Для построения диаграмм Грассмана в ТПГ и ХПГ составляем общий эксергетический баланс схемы СККВ:

$$E_{\text{вх}} = X_{\text{сф}} + X_{\text{цк}} + X_{\text{кд}} + X_{\text{фф}} + X_{\text{сув}} = 100\%$$

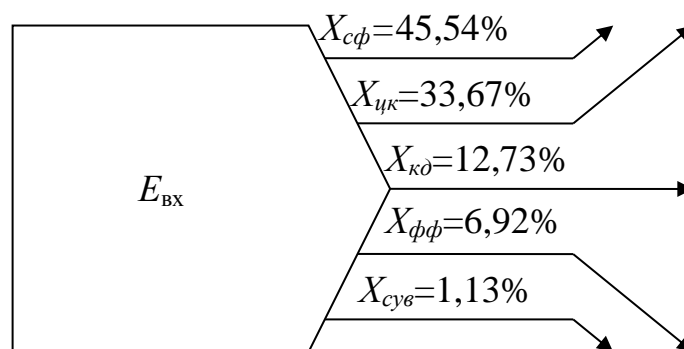


Рисунок 2 - Диаграмма Грассмана СККВ для ТПГ

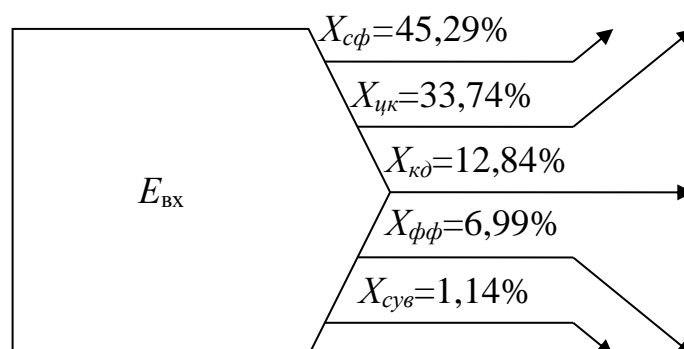


Рисунок 3 - Диаграмма Грассмана СККВ для ХПГ

Проведенный анализ диаграмм Грассмана для ТПГ и ХПГ (рисунок 2 и 3), показал, что наиболее эксергетически затратным элементом СККВ, не зависимо от периода года, является стартовый фильтр (для ТПГ 45,54%, для ХПГ 45,29%).

### Список литературы

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. 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.
4. Плотников В.В., Петрова О.Г. Эксергетический метод в системном анализе химико-технологических схем // Современные наукоемкие технологии. – 2009. - №4. – С. 27-29.
5. Эксергетические расчеты технических систем: справ.пособие / [В.М. Бродянский, Г.П. Верховкер, 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.
6. 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
7. Шевцов А.А., Котарев В.И., Мажулина И.В., Тертычная Т.Н. Эксергетический анализ энергоэффективной биотехнологии порошкообразных ферментных препаратов // Известия ТСХА. – 2015. – Выпуск 1. – С. 79 -90.
8. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Изд.2, перер.и доп. // Издательство «Химия». – 1978. – С. 392.