

УДК 536.76: 628.84

БОГДАНОВ А.В., студент гр. ТБ-11М (НИУ «МИЭТ»)
Научный руководитель РЯБЫШЕНКОВ А.С. д.т.н., профессор, профессор
(НИУ «МИЭТ»)
г. Москва

РАСЧЕТ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОПОДГОТОВКИ ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ МИКРОЭЛЕК- ТРОНИКИ

В настоящее время исследования в области микроэлектронной инфраструктуры в нашей стране не отвечают требованиям мирового прогресса. Отсутствие научно-методического обоснования вопросов, связанных с проектированием и эксплуатацией чистых помещений (ЧП), а также недостаточное количество системных исследований новых явлений и проблем — основные факторы, которые препятствуют развитию в этом направлении. В то же время наблюдается постоянное ужесточение требований к качеству рабочей среды в ЧП микроэлектроники. Для обеспечения и поддержания требуемого класса ЧП в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14644-1 необходима высокоэффективная система воздухоподготовки, результативность работы которой зависит от качества атмосферного наружного воздуха природно-технической геосистемы (ПТГ), технологических особенностей самой системы, а также от аэро- и термодинамических процессов, происходящих в ней [1].

Традиционно эффективность системы оценивается по уже известным показателям — например, по заданному классу ЧП, скорости потоков воздуха в нем, частоте воздухообмена и другим. Однако с недавнего времени авторы научных исследованиях начинают рассматривать эффективность системы с точки зрения её энергетических расчетов во взаимосвязи с изменяющимися параметрами внешнего атмосферного воздуха ПТГ, в рамках которой и функционирует ЧП [2, 3].

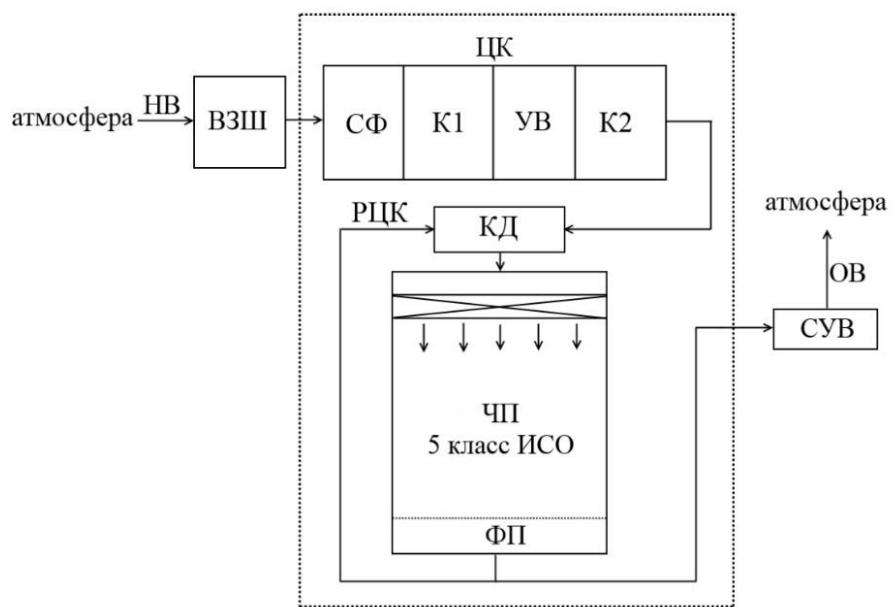
Изучение термодинамических потенциалов, известное как эксергетический подход, позволяет оценить эффективность вещества в различных точках системы. Эксергетический подход предоставляет информацию о эффективности системы, ее основных компонентах, а также взаимодействии с окружающей средой и находящимися в ней объектами. Использование этого подхода предполагает, что предметом исследования будут являться эксергетические потери (разность термодинамических потенциалов) основных элементов системы, а объектом исследования — сама система.

Сбор данных параметров наружного воздуха ПТГ г. Зеленограда производился как в теплый (ТПГ), так и в холодный периоды года (ХПГ) (см. табл. 1).

Таблица 1. Исходные значения параметров наружного воздуха

Параметры	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Влагосодержание, г/кг	Энталпия, кДж/кг
Наиболее повторяющаяся температура воздуха в ТПГ	14	69	6,84	31,39
Наиболее повторяющаяся температура воздуха в ХПГ	-2	84	2,68	4,65
Наименьшая (экстремально-минимальная) температура воздуха в ХПГ	-25	67	0,26	-24,61

Схема исследуемой системы воздухоподготовки относится к типу рециркуляционных и представлена на рис. 1. В данной схеме используется рециркуляционный контур, в который повторно направляется часть отработанного воздуха в ЧП через кондиционер-доводчик. Исходными данными для дальнейших расчётов служат следующие: параметры технологического микроклимата — для ЧП 5 класса по ГОСТ Р ИСО 14644-1; размер контролируемых аэрозольных частиц — 0,1 мкм; счётная концентрация частиц — менее 100000 шт.; температура воздуха в ЧП — $21 \pm 0,3^\circ\text{C}$; относительная влажность — $45 \pm 3\%$.

**Рисунок 1 – Исследуемая рециркуляционная схема системы воздухоподготовки**

(НВ – наружный воздух, ВЗШ – воздухозаборная шахта, ЦК – центральный кондиционер, СФ – стартовые фильтры, К1 – первый калорифер, УВ – модуль увлажнения воздуха, К2 – второй калорифер, КД – кондиционер-

доводчик, ЧП – чистое помещение, ФП – фальшпол, РЦК – рециркуляционный контур, СУВ – система удаления воздуха, ОВ – очищенный воздух)

Для определения эффективности функционирования системы проводится анализ всех потоков эксергии, входящих ($\sum e_{\text{вх}}$) и выходящих ($\sum e_{\text{вых}}$) из нее, с учетом рассмотрения внутренних и внешних потерь ($\sum e_{\text{п}}$). Этот анализ осуществляется путем составления эксергетического баланса:

$$\sum e_{\text{вх}} = \sum e_{\text{вых}} + \sum e_{\text{п}} \quad (1)$$

Применяя данную формулу по отношению к исследуемой схеме (рис. 1), входной следует считать удельную эксергию наружного воздуха ($e_{\text{нв}}$), выходной — на выходе в ЧП из КД $e_{\text{кд}}$, а внутренними потерями — потери эксергии в элементах контрольной поверхности. Тогда эксергетический баланс может быть представлен в виде:

$$e_{\text{нв}} = e_{\text{кд}} + \Delta e_{\text{сф}} + \Delta e_{\text{к1}} + \Delta e_{\text{ув}} + \Delta e_{\text{к2}} + \Delta e_{\text{кд}} + \Delta e_{\text{чп}} + \Delta e_{\text{фп}} + \Delta e_{\text{рцк}} \quad (2),$$

где $e_{\text{нв}}$ — удельная эксергия воздушного потока на входе в систему воздухоподготовки; $e_{\text{кд}}$ — удельная эксергия потока на выходе в ЧП из КД; $\Delta e_{\text{сф}}, \Delta e_{\text{к1}}, \Delta e_{\text{ув}}, \Delta e_{\text{к2}}, \Delta e_{\text{кд}}, \Delta e_{\text{чп}}, \Delta e_{\text{фп}}, \Delta e_{\text{рцк}}$ — потери удельной эксергии в указанных элементах системы воздухоподготовки.

Удельная эксергия e установившегося потока влажного воздуха с начальными термодинамическими параметрами (энталпийей i_1 , температурой T_1 , энтропией S_1) до достижения равновесия с окружающей средой с параметрами i_0, T_0, S_0 определяется по следующим формулам:

$$- \quad \text{для начального состояния } e_1 = (i_1 - i_0) - T_0 \cdot (S_1 - S_0); \quad (3)$$

$$- \quad \text{для конечного состояния } e_2 = (i_2 - i_0) - T_0 \cdot (S_2 - S_0). \quad (4)$$

Разность формул (4) и (3) и представляет собой потери удельной эксергии. Определить эти потери можно из выражения:

$$\Delta e = e_2 - e_1 = (i_2 - i_1) - T_0 \cdot (S_2 - S_1) = (i_2 - i_1) - T_0 \cdot c_p \ln (T_2/T_1), \quad (5)$$

где Δe — максимальная (теоретическая располагаемая) полезная внешняя работа, которую можно было бы получить при адиабатическом обратном переходе потока из состояния 1 в состояние 2; c_p — удельная теплоемкость влажного воздуха. Для пара (перегретого) средняя изобарная теплоемкость при атмосферном давлении и невысоких степенях перегрева может быть принята постоянной и равной 1,96 кДж/(кг · К) [4].

В данной работе проведено исследование рециркуляционной схемы в ХПГ по наименьшей (экстремально-минимальной) температуре наружного

воздуха в этот период. Используя данные i-d диаграммы (см. рис. 2) по формуле (5) рассчитаны эксергетические потери в каждом элементе схемы (см. табл. 2).

При температуре наружного воздуха (-25°C) отрезок (AB) соответствует процессу нагрева НВ до (-20°C) в СФ, отрезок (BC) соответствует нагреву воздуха до 29°C калорифере 1, на отрезке (CD) идет процесс увлажнения до 80% в модуле увлажнения, на (DE) — нагрев воздуха в калорифере 2 до 20°C. На отрезке (EF) проводится доводка воздуха в КД до температуры 21°C и влажности 45%; далее на (FG) воздух нагревается в ЧП вследствие технологических процессов и нахождения людей, а на (GH) часть воздуха из ФП направляется на рециркуляцию и часть — в СУВ.

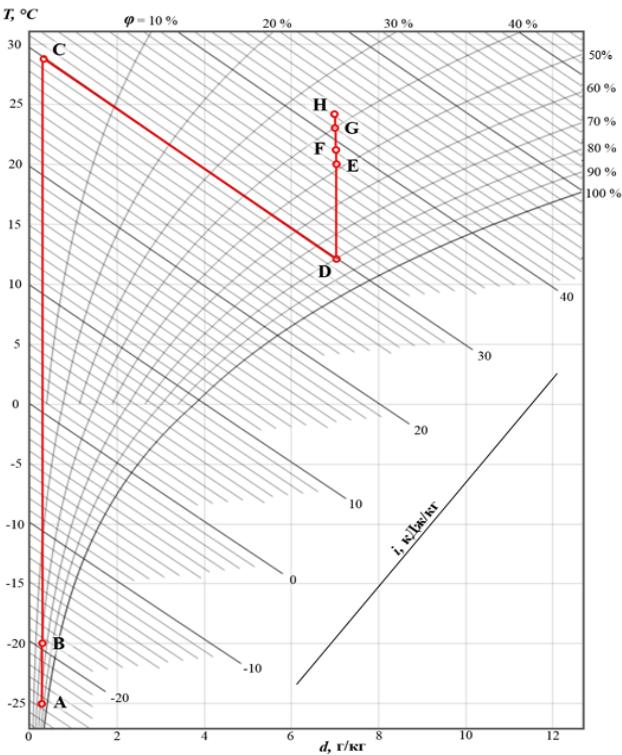


Рисунок 2. i-d диаграмма влажного воздуха при $T = (-25^\circ\text{C})$

Таблица 2. Распределение потерь удельной эксергии в элементах системы

Элементы схемы системы	Эксергетические потери в элементе, кДж/кг
В СФ	4,65
В К1	36,54
В УВ	28,16
В К2	5,58
В КД	0,67
В ЧП	1,25
В ФП	0,54
В РЦК	1,78
Суммарные потери	79,17

Для визуализации полученных данных была построена диаграмма Грасмана (рис. 3), а также рассчитано процентное соотношение потерь эксергии в каждом элементе системы к подаваемой эксергии в чистое помещение.

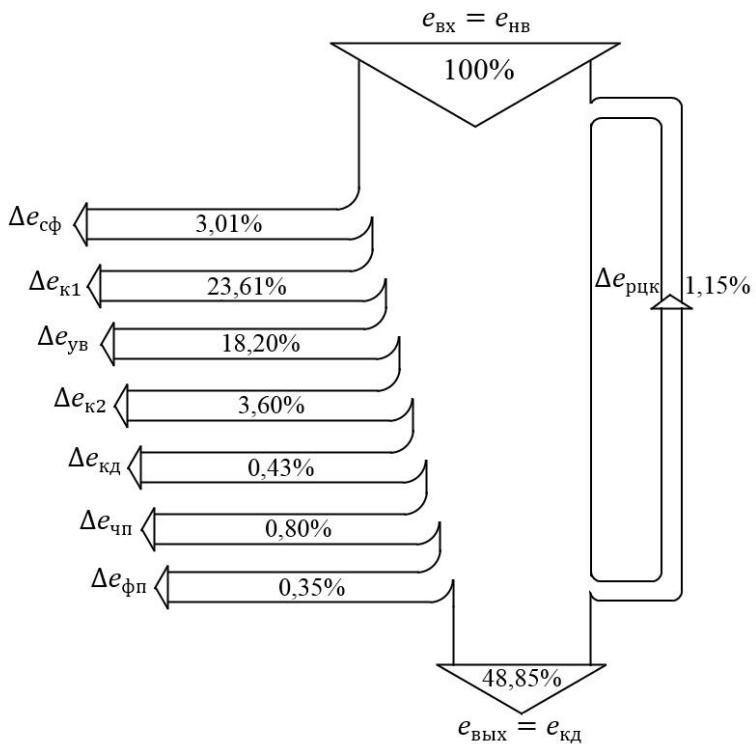


Рисунок 3. Диаграммы Грассмана эксергетических потерь при экстремально-минимальной температуре наружного воздуха в ХПГ (-25 °С) (e_{нв} — удельная эксергия наружного воздуха; e_{кд} — удельная эксергия на выходе из КД и входе в ЧП; Δe_{сф} — потери эксергии в СФ; Δe_{к1} — потери эксергии в первом калорифере; Δe_{ув} — потери эксергии в модуле увлажнения; Δe_{к2} — потери эксергии во втором калорифере; Δe_{кд} — потери эксергии в кондиционере-доводчике; Δe_{чп} — потери эксергии в чистом помещении; Δe_{фп} — потери эксергии в подфальшпольном пространстве; Δe_{рцк} — потери эксергии рециркуляционном контуре)

Проведённый анализ диаграммы Грассмана в ХПГ при $T = -25^{\circ}\text{C}$ показал, что наибольшие эксергетические потери наблюдаются при процессах нагревания воздуха в первом калорифере (23,61%) и при увлажнении воздуха в модуле увлажнения (18,20%).

Аналогичные расчеты проведены также и по другим погодно-климатическим параметрам:

- в ХПГ при $T = -2^{\circ}\text{C}$ определено, что наибольшие эксергетические потери имеются при процессах нагревания воздуха в первом калорифере (20,63%) и при увлажнении в модуле увлажнения (19,47%);
- в ТПГ при $T = 14^{\circ}\text{C}$ определено, что наибольшие эксергетические потери имеются при процессе нагревания воздуха во втором калорифере (23,29%).

Таким образом, эксергетический метод расчета системы воздухоподготовки позволяет наглядно и достаточно точно определить малоэффективные её элементы. На основе полученных результатов эксергетического расчета

можно предложить некоторые практические рекомендации по совершенствованию схемы, а именно: в ХПГ процессы нагрева воздуха в первом калорифере и увлажнения в модуле увлажнения следует проводить не в 2, а в 4 этапа последовательно, — т.е. следует изменить конфигурацию системы, добавив еще один калорифер и модуль увлажнения (последовательный нагрев наружного воздуха в первом калорифере до 5°C, затем увлажнение воздуха в первом модуле увлажнения, далее нагрев воздуха во втором калорифере до 25°C и, наконец, увлажнение воздуха во втором модуле увлажнения).

Полученные в работе результаты могут стать основой для разработки новой или модернизации действующей системы воздухоподготовки.

Список литературы:

1. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. – М.: Стандартинформ, – 2017. – 35 с.
2. Каракеян В.И., Ларионов Н.М., Рябышенков А.С., Штерн Ю.И. Технология микроклимата чистых помещений микроэлектроники: учеб. пособие. – М.: МИЭТ, – 2019. – 120 с.: ил.
3. Рябышенков, А. С. Анализ влияния параметров наружного воздуха на эффективность функционирования чистых помещений / А. С. Рябышенков, Н. М. Ларионов, У. Тхеин Хтут, Пью Тху. под ред. В. И. Каракеяна. – М.: МИЭТ. – 2016. – с. 64 – 71.
4. Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Гундарцев М.А. Эксергетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях // Известия вузов. Электроника. 2019. №6. – с. 573 – 580.