

Расчет режима работы элемента Пельтье, используемого в качестве охладителя в модуле осушки проб воздуха

В.И. Капля, А.Г. Бурцев, С.А. Андриянов, Е.К. Соболева

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета

Аннотация: В статье приведены уравнения для теплового расчета процесса осушки воздушной пробы при помощи охлаждения её элементами Пельтье. Приведенные соотношения могут использоваться в алгоритме управления модулем осушения проб воздуха на основе элементов Пельтье для снижения уровня потребляемой охладителем мощности.

Ключевые слова: элемент Пельтье, газовая проба, осушка, газоанализатор, тепловой баланс, парциальное давление пара.

Современные газоанализаторы имеют в своем составе приборы автоматической подготовки проб воздуха, которые обеспечивают номинальные условия для работы датчиков газа, осуществляющих измерение концентраций газов в воздухе (РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: 1989. 615 с.) [1]. На входе такие системы обычно имеют механические фильтры очистки газовой пробы от взвешенных частиц [2]. В конце газоздушного канала находится датчик концентрации газа [3].

Модуль осушивания проб воздуха состоит из следующих элементов: побудитель расхода (воздушный насос, прокачивающий воздушный поток от места забора проб через трубку зонда), первичный охладитель до температуры окружающей среды, вторичный охладитель с элементом Пельтье, нагреватель до температуры нормальной работы датчика газа и камеру с датчиками газов. Охладители снижают температуру воздушной пробы, повышая при этом уровень относительной влажности, вплоть до выпадения конденсата, то есть до уровня относительной влажности, равного 100%. Уменьшение относительной влажности до допустимого уровня осуществляется последующим нагревом пробы воздуха, что может привести к выходу из диапазона температур нормальной работы датчиков, если

используется только первичный охладитель. Дополнительное охлаждение воздушных проб с помощью элементов Пельтье до температуры, которая обеспечивает в последующем нормальную влажность и температуру в камере датчиков, является известным техническим решением (Газоанализатор содержания O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂ «МАК-2000» ТУ 4215-003-47414006-2006 Паспорт. Руководство по эксплуатации. Техническое описание. М. 2015. 24 с.).

Однако элементы Пельтье являются энергозатратными устройствами, что требует тщательного расчета теплового баланса осушителя и электрических параметров работы элементов Пельтье. Решение этой задачи позволит избежать неоправданных затрат электроэнергии при обеспечении нормальных условий работы датчиков газоанализатора.

Предполагается, что на вход охладителя поступает насыщенный воздушный пар при температуре T_1 атмосферном давлении P_{atm} и относительной влажности $\phi_1 = 1$. Парциальное давление насыщенного пара $P_{ssw}(T)$ (Па) как функцию температуры можно рассчитать по следующей формуле [4-6]:

$$P_{ssw}(T) = e^{-6094.4692 \cdot T^{-1} + 21.1249952 - 0.027245552 \cdot T + 0.000016853396 \cdot T^2 + 2.4575506 \cdot \ln(T)} \quad (1)$$

Приведенная приближенная формула справедлива для интервала температур: 0-50°C. Удельная плотность влажного воздуха ρ_{hal} на входе осушителя может быть вычислена по парциальному давлению насыщенного пара P_{ssw} , вычисленному по формуле (1), и по температуре воздуха T_1 [7, 8]:

$$\rho_{hal} = \frac{P_{atm} - P_{ssw}(T_1)}{R_{da} \cdot T_1} + \frac{P_{ssw}(T_1)}{R_{sw} \cdot T_1} = \frac{P_{atm} - P_{ssw1}}{R_{da} \cdot T_1} + \frac{P_{ssw1}}{R_{sw} \cdot T_1},$$

где $P_{ssw1} = P_{ssw}(T_1)$, $R_{da} = 287$ (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная сухого воздуха, $R_{sw} = 461.6$ (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная водяного пара, $P_{atm} = 101325$ (Па).

Поскольку в охладитель поступает насыщенный водяной пар, то после охлаждения пар останется насыщенным. На выходе охладителя с элементом Пельтье, который должен понизить температуру пробы до величины T_2 , плотность влажного воздуха ρ_{ha2} будет равна:

$$\rho_{ha2} = \rho_{da2} + \rho_{ssw2} = \frac{P_{atm} - P_{ssw2}}{R_{da} \cdot T_2} + \frac{P_{ssw2}}{R_{sw} \cdot T_2}, \quad (2)$$

где $\rho_{da2} = \frac{P_{atm} - P_{ssw2}}{R_{da} \cdot T_2}$, $\rho_{ssw2} = \frac{P_{ssw2}}{R_{sw} \cdot T_2}$ – удельные плотности сухого воздуха и насыщенного водяного пара.

Охлаждение насыщенного пара сопровождается выпадением конденсата, количество которого соответствует следующей величине:

$$\rho_{cond} = \rho_{ssw1} - \rho_{ssw2}$$

Количество конденсата, выпавшего в охладителе и отнесенное к объему пробы, будет равно:

$$m_{cond} = \rho_{cond} \cdot V_{test}, \quad (3)$$

где V_{test} – объем пробы воздуха, который соответствует производительности побудителя расхода, то есть объему воздуха, прокачиваемого через газоанализатор за единицу времени.

Обозначим температуру нормальной работы датчиков газа переменной T_3 . Давление внутри воздуховода осушителя можно считать постоянным. Изобарный нагрев влажного воздуха от температуры T_2 до температуры T_3 не приведет к изменению влагосодержания и, следовательно, парциальное давление водяного пара сохраняет свое значение при прохождении через нагреватель. Но парциальное давление насыщенного водяного пара повышается с ростом температуры и будет равно:

$$P_{ssw3} = P_{ssw}(T_3).$$

Значение относительной влажности на выходе осушителя выражается следующей формулой:

$$\varphi_3 = \frac{P_{ssw2}}{P_{ssw3}}.$$

Критерий нормальной работы осушителя соответствует следующему неравенству:

$$\varphi_3 \leq \varphi_{norm},$$

где φ_{norm} – уровень относительной влажности, обеспечивающий нормальные условия для работы датчиков газа. Данный критерий позволяет по заданной относительной влажности и температуре T_3 вычислить верхнее значение температуры T_2 , до которой должна охладиться проба воздуха с помощью элемента Пельтье. Уравнение для определения температуры T_2 имеет вид:

$$P_{ssw}(T_2) - \varphi_{norm} \cdot P_{ssw}(T_3) = 0. \quad (4)$$

Элемент Пельтье должен обеспечить поглощение следующих тепловых потоков: теплоты конденсации Q_{cond} (3) и теплоты, соответствующей охлаждению смеси сухого воздуха Q_{da2} и водяного пара Q_{ssw2} с удельной плотностью (2). Перечисленные тепловые потоки образуют тепловую нагрузку Q_C элемента Пельтье:

$$Q_C = Q_{cond} + Q_{da2} + Q_{ssw2} =, \\ = c_{cond} \cdot m_{cond} + (c_{da} \cdot \rho_{da2} + c_{sw} \cdot \rho_{ssw2}) \cdot V_{test} \cdot (T_2 - T_1),$$

где $c_{cond} = 2501$ (кДж/кг) – удельная теплота конденсации водяных паров, $c_{sw} = 1.87$ (кДж/(кг · К)) – удельная теплоемкость насыщенного пара, $c_{da} = 1.006$ (кДж/(кг · К)) – удельная теплоемкость сухого воздуха.

В рассматриваемом случае приведены значения удельной теплоемкости для изобарного процесса. Единица измерения результата – $кВт$.

Тепловая нагрузка Q_C является нелинейной функцией от величины напряжения, которое подается на элемент Пельтье и температуры его горячей T_h и холодной T_c стороны [9]. Эти зависимости приводятся в виде номограмм в спецификации элемента Пельтье [10]. В простейшем случае можно считать, что $T_c = T_2$, $T_h = T_3 = T_1$.

Вычислив перепад температуры между горячей и холодной стороной элемента Пельтье $\Delta T = T_h - T_c$, на номограмме определяется точка пересечения уровня Q_C с линией ΔT . Абсцисса точки пересечения дает величину напряжения, подаваемого на элемент Пельтье.

Приведенные соотношения могут использоваться в алгоритме управления модулем осушения проб воздуха на основе элементов Пельтье для снижения уровня потребляемой охладителем мощности.

Литература

1. Расчёт разрешающей способности для автоматической системы измерения концентрации токсичных газов в воздухе на основе электрохимических датчиков / В.И. Капля, А.Г. Бурцев, С.А. Андриянов, Е.К. Соболева // Евразийское Научное Объединение. 2016. № 8. С. 29-30.
2. Т.О. Кондратенко, Е.А. Семенова, Л.Я. Соломахина. Повышение экологической безопасности производства газобетона // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1867.
3. Е.И. Кравченко, В.В. Петров, А.С. Варезников. Разработка методики распознавания образцов газовых смесей с помощью мультисенсорной системы мониторинга // Инженерный вестник Дона. 2012. №4 (2). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1346.

4. N. S. Osborne, C. H. Meyers. A Formula and Tables for the Pressure of Saturated Water Vapor in the Range 0 to 374°C. Journal of research of the National Bureau of Standards. 1934. №13. pp. 2-8.

5. A Compact Form for the Analytic Description of Temperature Dependence of Saturation Vapor Pressure over Plane Surfaces of Water and Ice. N. P. Romanov. Russian Meteorology and Hydrology, 2017, Vol. 42, No. 1, pp. 27–37.

6. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1984. 80 с.

7. Бурдаков В.П., Дзюбенко Б.В., Меснянкин С.Ю., Михайлова Т.В. Термодинамика. Часть 1. Учебное пособие для вузов. М.: Дрофа, 2009. 480 с.

8. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства: Учебное пособие. СПб.: СПбГАХИТ, 1998. 146 с.

9. Покорный, Е.Г. Номографический метод расчета полупроводниковых термоохлаждающих устройств. Л.: Изд-во "Наука", Ленингр.отд. 1968. 59 с.

10. Specification of Thermoelectric Module. TEC1-12705. URL: thermonamic.com/TEC1-12705-English.PDF.

References

1. V.I. Kaplja, A.G. Burcev, S.A. Andrijanov, E.K. Soboleva. Evrazijskoe Nauchnoe Objedinenie. 2016. № 8. pp. 29-30.

2. T.O. Kondratenko, E.A. Semenova, L.Ja. Solomahina. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2013. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1867.

3. E.I. Kravchenko, V.V. Petrov, A.S. Varezhnikov. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012. №4 (2). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1346.

4. N. S. Osborne, C. H. Meyers. Journal of research of the National Bureau of Standards. 1934. №13. pp. 2-8.

5. N. P. Romanov. Russian Meteorology and Hydrology, 2017, Vol. 42, No. 1, pp. 27–37.



6. Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Termodinamicheskie svojstva vody i vodjanogo para [Thermodynamic properties of water and vapour]. Spravochnik. Rek. Gos. sluzhboj standartnyh spravocnyh dannyh. 2-e izd., pererab. i dop. M. Jenergoatomizdat. 1984. 80 p.

7. Burdakov V.P., Dzubenko B.V., Mesnjankin S.Ju., Mihajlova T.V. Termodinamika. Chast' 1. [Thermodynamics. Part 1] Uchebnoe posobie dlja vuzov. M. Drofa, 2009. 480 p.

8. Burcev S.I., Cvetkov Ju.N. Vlazhnyj vozduh. Sostav i svojstva [Wet air. Composition and properties]. Uchebnoe posobie. SPb. SPbGAHPT, 1998. 146 p.

9. Pokornyj, E.G. Nomograficheskij metod rascheta poluprovodnikovyh termoohlazhdajushhih ustrojstv [Nomographic method for calculating semiconductor thermo-cooling devices]. L. Izd-vo "Nauka", Leningr.otd.1968.59 s.

10. Specification of Thermoelectric Module. TEC1-12705. URL: thermonamic.com/TEC1-12705-English.PDF.