

Расчет водяного охладителя

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

В данной статье рассматривается задача расчета характеристик водяного охладителя. По заданным входным параметрам для воздуха (температура входящего воздуха, относительная влажность входящего воздуха и т. д.), теплоносителя (прямая и обратная температура теплоносителя, процентное содержание примеси и т. д.) и самого охладителя (площадь поперечного сечения, площадь теплообмена, количество контуров, расстояние между пластинами и т. д.) требуется вычислить такие величины, как температура воздуха на выходе, относительная влажность воздуха на выходе, полная тепловая мощность батареи, количество конденсата, гидравлическое сопротивление батареи и другие важные физические характеристики.

Ключевые слова: РНР, промышленная вентиляция, теплообменники.

Введение

Конструктивно водяной воздухоохладитель состоит из множества трубок, проходящих через близко расположенные тонкие металлические пластины — ламели. По трубкам движется теплоноситель, в качестве которого выступает вода либо водный раствор гликоля. Воздух, проходя между ламелями, охлаждается в процессе теплообмена с трубками, по которым течет холодная вода, и с самими ламелями. Температура воздуха до прохождения через ламели считается температурой входящего воздуха, а после прохождения — температурой выходящего воздуха. Аналогично определяется температура воды на входе и на выходе. Очевидно, что при работе водяного охладителя выполняются следующие соотношения:

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

$$t_{w1} < t_{w2} < t_{a2} < t_{a1},$$

где t_{w1} — температура воды на входе, t_{w2} — температура воды на выходе, t_{a1} — температура воздуха на входе, t_{a2} — температура воздуха на выходе.

Конкретные значения температур воздуха и теплоносителя на выходе будут зависеть от целого ряда параметров охладителя — площади фронтального сечения, материалов трубок и ламелей, площади сечения трубок и их толщины и др., а также от величин расхода воздуха и воды. Часто используют другой подход — используя заданные температуры воды на входе и на выходе, рассчитывают величину расхода воды.

Трубки, по которым проходит вода, образуют независимые каналы, называемые контурами. Один контур может многократно проходить через ламели, что способствует более эффективному использованию воды как теплоносителя. Зная величину расхода воды, площадь поперечного сечения трубок и количество контуров, можно вычислить другие важные характеристики работы охладителя, например скорость воды в трубках. Используя расход воды и значения ее температуры на входе и на выходе, можно рассчитать количество теплоты, поглощенной водой в результате охлаждения воздуха.

Таким образом, расчет охладителя подразумевает вычисление целого ряда характеристик, связанных как с теплоносителем, так и с воздухом. Для расчета ряда многих из них используются специальные коэффициенты, которые подбираются эмпирически для охладителя и связаны с особенностями его устройства.

Постановка задачи

Входными данными для алгоритма расчета водяного охладителя являются параметры воздуха, теплоносителя и собственно охладителя.

К параметрам воздуха мы будем относить следующие величины:

- Объемный расход воздуха (l_{Air});

Расчет водяного охладителя

- Тип определения объемного расхода воздуха (airCalcType) — подразумевает один из трех вариантов: нормализованный воздух, воздух на входе в батарею, воздух на выходе из батареи;
- Температура входящего воздуха (airInletTemp);
- Относительная влажность входящего воздуха (airInletHumidity);

К параметрам теплоносителя (в случае водяного охладителя это вода или раствор гликоля) мы будем относить следующие величины:

- Температура теплоносителя прямая (waterInletTemp);
- Температура теплоносителя обратная (waterOutletTemp);
- Тип теплоносителя (waterType) — подразумевает один из двух вариантов: вода или гликолевая смесь;
- Процентное содержание гликоля для гликолевых смесей (glycolPercent).

К характеристикам водяного охладителя будем относить следующие величины:

- Площадь поперечного сечения (s_a);
- Площадь теплообмена (s_t);
- Количество контуров (инжекций) (injections);
- Сечение трубки теплообменника (s_w);
- Длина хода (injection_length);
- Коэффициенты — $M_1, A, B, A_h, B_h, A_t, B_t, c, d, s, C_w, R_a, A_{gl}, B_{gl}$.

Используя указанные входные данные, необходимо вычислить следующие величины:

- Температура воздуха на выходе (airOutletTemp);
- Относительная влажность воздуха на выходе (airOutletHumidity);

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

- Полная тепловая мощность батареи (batteryCapacityFull);
- Явная тепловая мощность (batteryCapacitySens);
- Количество конденсата (condensate);
- Скорость воздуха в теплообменнике (airVelocity);
- Аэродинамическое сопротивление охладителя (airPressureDrop);
- Гидравлическое сопротивление батареи (waterPressureDrop);
- Объемный расход теплоносителя (lw).

Алгоритм расчета водяного охладителя

Будем поэтапно рассчитывать все требуемые величины.

Вначале вычислим массовый расход воздуха. Для этого вначале нужно вычислить плотность воздуха. Используем одну из форм уравнения Менделеева-Клапейрона

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

где p — давление, M — молярная масса газа, R — универсальная газовая постоянная, T — температура газа, К. Учитывая, что $T = t + 273.15$, и раскладывая полученную формулу в ряд Тейлора, получим приближенную полиномиальную формулу зависимости плотности воздуха от температуры:

$$\rho = 1.2948 - 4.856 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1.8228 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - \dots$$

В программной реализации будем использовать первые три слагаемых полученного разложения. Далее вычислим массовый расход воздуха по формуле

$$G_a = \rho \cdot l_a,$$

где l_a — объемный расход воздуха.

Расчет водяного охладителя

```
switch ($this->airCalcType) {
  case self::AIR_CALC_NORMALIZED:
    $p_air = 1.205;
    break;
  case self::AIR_CALC_INPUT:
    $p_air = 1.8228E-05 * pow($this->airInletTemp, 2)
      - 4.8560E-03 * $this->airInletTemp + 1.2948;
    break;
  case self::AIR_CALC_OUTPUT:
    $p_air = 1.8228E-05 * pow($this->airOutletTemp,
      2) - 4.8560E-03 * $this->airOutletTemp +
      1.2948;
    break;
}
$this->GAir = $p_air * $this->lAir;
```

В качестве температуры в зависимости от типа определения объема воздуха может подставляться температура входного воздуха либо выходного воздуха. Для нормализованного воздуха плотность — известная физическая константа, удобнее сразу использовать ее значения вместо подсчетов по формуле.

Рассчитываем давление насыщенного пара и влагосодержание входящего воздуха. Давлению насыщенного пара соответствует переменная `p_nas_inlet`, а влагосодержанию — `PWaterVapour`.

```
if ($this->airInletTemp < 0) {
  $p_nas_inlet = 2.498 * pow(10, 11) * exp(-5419 / (
    $this->airInletTemp + 273.15));
} else {
  $p_nas_inlet = 1.8424 * pow(10, 11) * exp(-5331 / (
    $this->airInletTemp + 273.15));
}
$this->PWaterVapour = $p_nas_inlet * $this->
  airInletHumidity / 100;
```

Для дальнейших вычислений будет удобно использовать величину `dryness`, которая вычисляется по формуле

$$d = \frac{M_w p_w}{M_a p_a},$$

где M_w, M_a — молярная масса воды и воздуха соответственно, p_w, p_a — парциальное давление водяного пара и воздуха соответственно. Парциальное давление водяного пара было рассчитано выше, в качестве парциального давления воздуха можно взять атмосферное

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

давление. Осталось подставить в формулу известные физические константы — молярную массу воды и воздуха.

```
$this->dryness = 630 * $this->PWaterVapour / 101000;
```

Вычислим среднее значение температуры воды (среднее арифметическое температуры воды на входе и на выходе):

$$\bar{t}_w = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2}.$$

```
$this->waterTempAverage = ($this->waterInletTemp + $this->waterOutletTemp) / 2;
```

Плотность и теплоемкость воды зависят от температуры, в обоих случаях приближенно зависимость можно описать квадратным трехчленом:

```
$this->Pw = (-4E-03 * pow($this->waterTempAverage, 2) - 2E-03 * $this->waterTempAverage + 999.7);  
$this->Cw = 2.26E-05 * pow($this->waterTempAverage, 2) - 1.8781E-03 * $this->waterTempAverage + 4.1463;
```

Вычислим вспомогательные коэффициенты:

```
$Coef_A1 = $this->cooler->a * Functions::pow($this->lAir, $this->cooler->b);  
$Coef_Ah = $this->cooler->ah * Functions::pow($this->airInletHumidity, $this->cooler->bh);  
$Coef_At = $this->cooler->at * Functions::pow($this->airInletTemp, $this->cooler->bt);  
$this->CoefA = $Coef_A1 * $Coef_Ah * $Coef_At;
```

Далее вычислим энтальпию входящего воздуха.

```
$this->airInletEnthalpy = 1.005 * $this->airInletTemp + 2.49 * $this->dryness;
```

Минимальная температура воздуха считается как средняя температура воды, увеличенная на 3 градуса. Это соответствует многолетнему опыту эксплуатации теплообменных установок.

$$t_{amin} = \bar{t}_w + 3.$$

```
$this->minAirTemp = $this->waterTempAverage + 3;
```

Вычислим парциальное давление насыщенного пара для воздуха с минимальной температурой:

Расчет водяного охладителя

```
$p_nas_min = 1.8424 * pow(10, 11) * exp(-5331 / ($this->minAirTemp + 273.15));  
$this->drynessMin = 630 * $p_nas_min / 101000;
```

Вычислим энтальпию на линии насыщения:

```
$this->enthalpyMin = 1.005 * $this->minAirTemp + 2.49 *  
$this->drynessMin;
```

Вычислим «сухую» начальную температуру воздуха:

```
$this->airInletTempDry = ($this->airInletEnthalpy - 2.49  
* $this->drynessMin) / 1.005;
```

Вычислим коэффициент эффективности теплообменника по воде:

$$O_w = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1} - t'_{a1}},$$

где t'_{a1} — сухая начальная температура воздуха.

```
$this->Ow = ($this->waterInletTemp - $this->  
waterOutletTemp) / ($this->waterInletTemp - $this->  
airInletTempDry);
```

Для определения коэффициентов функции теплообменника по воздуху необходимо получить набор точек функции расхода воды и далее получить аппроксимацию данной функции. В качестве приближения будем использовать полином второй степени.

$$O_a = aO_w^2 + bO_w + c.$$

```
list ($c, $b, $a) = $this->approximation();  
$this->Oair = $a * pow($this->Ow, 2) + $b * $this->Ow +  
$c;
```

Функция `approximation` вычисляет набор точек и с помощью класса `LeastSquareRegression` находит коэффициенты трехчлена.

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

```
protected function approximation() {
    list($a, $b) = $this->func8();
    bcscale(10);
    $leastSquareRegression = new LeastSquareRegression(3)
    ;
    foreach ($a as $key => $val)
        $leastSquareRegression->addData($a[$key], $b[$key
    ]);
    $coefficients = $leastSquareRegression->
        getCoefficients();
    return $coefficients;
}
```

Функция func8 строит точки, по которым будет производиться аппроксимация функции. Для построения точек будем использовать значения расхода воды $G_w[i]$ от 500 до 70500 с шагом 2000 (т.е. всего 36 точек). Для каждого значения расхода вычислим скорость воды в трубках по формуле [1]:

$$v_w = \frac{G_w}{\rho_w \cdot s_w \cdot m},$$

где G_w — расход воды, ρ_w — плотность воды, s_w — площадь сечения одной трубки охладителя, m — число трубок, подключаемых к подающему коллектору (количество контуров). Далее вычислим относительный водяной эквивалент [1]:

$$w = \frac{c_a \cdot G_a}{c_w \cdot G_w}.$$

Вычислим коэффициент теплопередачи [1]:

$$k = A \cdot (v\rho)^n \cdot w^p = \left(\frac{G_w}{s}\right)^n \cdot v_w^p,$$

где A, n, p — эмпирические коэффициенты теплообменника, s — площадь поперечного сечения теплообменника, $v\rho$ — массовая скорость движения воздуха во фронтальном сечении теплообменника. Далее вычислим количество единиц переноса теплоты [1]:

$$NTU = \frac{3.6 \cdot k \cdot s_2}{c_a \cdot G_a},$$

где s_2 — площадь теплообмена. Вычислим коэффициент эффективности теплообменника по воздуху [1]:

Расчет водяного охладителя

$$O_a = \frac{1 - \exp(-(1 - \exp(-NTU)) \cdot w)}{w}.$$

Наконец, вычислим коэффициент эффективности теплообменника по воде [1]:

$$O_w = O_a \cdot w.$$

```
protected function func8(){
  $Oair = $Ow = $Gw = array();
  for ($i = 500; $i <= 70500; $i += 2000) {
    $Gw[$i] = $i;
    $water_velocity[$i] = $Gw[$i] / (3600 * $this->
      cooler->injections * $this->Pw * $this->cooler
      ->fw);
    $W[$i] = self::CAIR * $this->GAir / ($this->Cw *
      $Gw[$i]);
    $K[$i] = $this->CoefA * pow($this->GAir / (3600 *
      $this->cooler->s1), self::COEF_N) * pow(
      $water_velocity[$i], self::COEF_P);
    $NTU[$i] = 3.6 * $K[$i] * $this->cooler->
      surface_area / (self::CAIR * $this->GAir);

    // ЯЯЯЯЯЯЯЯЯЯ яяяяяяяяяяяяяя ЯЯ
    $Oair[$i] = (1 - exp(-(1 - exp(-$NTU[$i])) * $W[
      $i])) / $W[$i];

    $Ow[$i] = $Oair[$i] * $W[$i];
  }
  return array($Ow, $Oair);
}
```

Итак, мы получили эффективность теплообменника по воздуху. Теперь мы можем вычислить температуру воздуха на выходе при сухом охлаждении:

$$t'_{a2} = t'_{a1} - O_a \cdot (t'_{a1} - t_{w1}).$$

```
$this->airOutletTempDry = $this->airInletTempDry - $this
->Oair * ($this->airInletTempDry - $this->
waterInletTemp);
```

Рассчитываем энтальпию на выходе:

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

```
$this->enthalpyOutletDry = 1.005 * $this->
  airOutletTempDry + 2.49 * $this->drynessMin;
```

Теперь мы можем вычислить рабочую температуру воздуха на выходе. Так как температура линейно зависит от энтальпии, то нам необходимо вычислить два коэффициента a и b .

$$t_{a2} = a \cdot H_2 + b.$$

Для этого у нас уже есть две точки — для воздуха на входе и для воздуха с минимальной температурой. Находим коэффициенты прямой, проходящей через эти две точки, подставляем значение энтальпии `enthalpyOutletDry` и получим значение температуры на выходе.

$$a = \frac{t_{a1} - t_{amin}}{H_1 - H_{min}},$$
$$b = t_{a1} - a \cdot H_1.$$

```
$Aenthalpy = ($this->airInletTemp - $this->minAirTemp) /
  ($this->airInletEnthalpy - $this->enthalpyMin);
$Benthalpy = $this->airInletTemp - $Aenthalpy * $this->
  airInletEnthalpy;
$this->airOutletTemp = $Aenthalpy * $this->
  enthalpyOutletDry + $Benthalpy;
$this->airOutletEnthalpy = $this->enthalpyOutletDry;
```

Рассчитываем влагосодержание исходящего воздуха и давление водяного пара:

```
$this->drynessOutlet = ($this->enthalpyOutletDry - 1.005
  * $this->airOutletTemp) / 2.49;
$this->PWaterVapourOut = $this->drynessOutlet * 101 *
  1000 / 630;
```

Вычислим относительную влажность воздуха на выходе:

```
if ($this->airOutletTemp < 0) {
  $p_nas_outlet = 2.498 * pow(10, 11) * exp(-5419 / (
    $this->airOutletTemp + 273.15));
} else {
  $p_nas_outlet = 1.8424 * pow(10, 11) * exp(-5331 / (
    $this->airOutletTemp + 273.15));
}
$this->airOutletHumidity = $this->PWaterVapourOut * 100 /
  $p_nas_outlet;
```

Расчет водяного охладителя

Вычислим аэродинамическое сопротивление (падение давления воздуха) для охладителя. Будем использовать вспомогательные коэффициенты r_a и m_1 :

```
$Coef_Cond = 0.0147 * $this->airInletEnthalpy + 0.51;  
$this->airPressureDrop = $this->cooler->ra * pow($this->  
    GAir / (3600 * $this->cooler->s1), $this->cooler->m1)  
    * $Coef_Cond;
```

Вычислим полную и явную тепловые мощности батареи:

```
$this->batteryCapacityFull = $this->GAir * ($this->  
    airInletEnthalpy - $this->airOutletEnthalpy) / 3600;  
$this->batteryCapacitySens = $this->GAir * ($this->  
    airInletTemp - $this->airOutletTemp) / 3600;
```

Явная тепловая мощность батареи не может превосходить полную тепловую мощность:

```
if ($this->batteryCapacitySens > $this->  
    batteryCapacityFull) $this->batteryCapacitySens =  
    $this->batteryCapacityFull;
```

Вычислим расход теплоносителя:

$$G_w = \frac{O_a \cdot c_a \cdot G_a}{O_w \cdot c_w}.$$

```
$this->Gw = self::CAIR * $this->Oair * $this->GAir / (  
    $this->Cw * $this->Ow);  
if ($this->waterType == self::WATER_TYPE_GLYCOL) {  
    $this->Gw = $this->Gw * (0.201 * pow($this->  
        glycolPercent / 100, 2) + (-0.0517) * $this->  
        glycolPercent / 100 + 1.0039);  
}
```

Вычислим скорость воздуха:

$$v_a = \frac{l_a}{s_a}.$$

```
$this->airVelocity = $this->lAir / $this->cooler->sAir /  
    3600;
```

Рассчитаем величину конденсата воды:

```
$this->condensate = $this->GAir * ($this->dryness - $this  
->drynessOutlet) / 1000;  
if ($this->condensate < 0) $this->condensate = 0;
```

В. В. Осокин, Р. Ф. Алимов, Т. Р. Сытдыков

Вычислим среднюю скорость воды в трубках:

```
$this->waterVelocity = $this->Gw / (3600 * $this->cooler->injections * $this->Pw * $this->cooler->sw);
```

Вычислим гидравлическое сопротивление батареи (изменение давления теплоносителя):

$$\Delta p_w = c_w \cdot l \cdot v_w^s,$$

где c_w, s — коэффициенты охладителя, l — длина трубки теплообменника. Для гликолевых смесей сопротивление домножается на коэффициент, зависящий от процентного содержания гликоля.

```
$waterPressureDrop = $this->cooler->cw * $this->cooler->cooler_length / 1000 * $this->cooler->injection_length * Functions::pow($this->waterVelocity, $this->cooler->s);
if ($this->waterType == self::WATER_TYPE_GLYCOL) {
    $waterPressureDrop = $waterPressureDrop * (0.6757 * $this->glycolPercent / 100 + 0.9108);
}
```

Осталось рассчитать последнюю величину — объемный расход теплоносителя:

```
$this->lw = $this->Gw / $this->Pw;
```

Таким образом, все необходимые величины рассчитаны.

Заключение

В результате в данной статье была получена программная реализация расчета водяного охладителя. По заданным характеристикам воздуха, теплоносителя и теплообменника, используя уравнения термодинамики, их точные и приближенные решения, последовательно рассчитываются все необходимые величины. Результирующие показатели дают всю необходимую информацию для конечного потребителя. Просмотрев рассчитанные показатели для некоторого количества охладителей, он сможет подобрать устройство, наилучшее как с точки зрения полученных характеристик, так и с другой стороны (стоимость установки, индивидуальные предпочтения и т. п.)

Список литературы

- [1] Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования в зданиях. — М.: Евроклимат, 2006.
- [2] Осокин В. В., Алимов Р. Ф., Абдулпотиев А. А. Конфигуратор промышленного вентиляционного оборудования // Интеллектуальные системы. — 2014. — Т. 18, № 4. — С. 145–158.

Calculation of the water cooler

V.V. Osokin, R.F. Alimov, T.R. Sitdikov

In this article we consider the problem of calculating the characteristics of the water cooler. For a given input parameters for air (inlet air temperature, the relative humidity of the incoming air, etc.), coolant (direct and reverse the flow temperature, the percentage of impurities, etc.) and of the cooler (cross-sectional area, the heat transfer area, number of circuits, the distance between the plates, etc.) necessary to calculate values such as the outlet air temperature, the relative humidity of the outlet air, total thermal battery power, the amount of condensate, the hydraulic resistance of the battery and other important physical characteristics.

Keywords: PHP, industrial ventilation, heat exchanger.