

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ, ВОДЯНОГО ПАРА И ВОЗДУХА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ПИЩЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Приведены формулы для определения теплофизических свойств основных теплоносителей: воды, водяного пара и воздуха. Расчеты могут быть выполнены с помощью инженерных микрокалькуляторов.

Рационализация производственных процессов и серьезная экономия энергии невозможны без многовариантных инженерных расчетов с учетом теплофизических свойств (ТФС) рабочих сред. На основе наиболее достоверных исходных данных для часто используемых ТФС получены максимально простые и точные формулы, удобные для массовых расчетов применительно к условиям пищевой технологии, где температуру (t , °С или T , К) выше 140 °С и давление (p , Па) выше 1 МПа обычно не используют.

Вода (масса киломоля $M=18,0152$ кг·кмоль⁻¹, удельная газовая постоянная $R=461,522$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹) вследствие прочных водородных связей молекул обладает рядом аномальных свойств. При $p < 1$ МПа благодаря малому коэффициенту изотермической сжимаемости воды (порядка $5 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹) влияние давления на ее ТФС пренебрежимо мало.

Плотность воды кг·м⁻³, $\rho=1000,33-0,0205(t-4)^{1,67}$. При $t=-15-130$ °С предельная относительная погрешность вычисления плотности $\delta\rho=0,05$ % (983,3). Здесь и после описания всех последующих формул для контроля правильности вычислений в скобках приведено числовое значение ТФС при температуре 60 °С, которая близка к средней для условий пищевой технологии. Единица измерения та же, что указана перед формулой. В данном случае плотность воды при 60 °С равна 983,3 кг·м⁻³.

Коэффициент изобарного термического расширения (К⁻¹) $\beta_p = [(t-4)(29220/|t-4|^{1,67}-0,6)]^{-1}$. При $t=-15-130$ °С $\delta\beta_p=0,5$ % ($5,165 \cdot 10^{-4}$).

Изобарная удельная теплоемкость, Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $c_p = 4218 + 2,8t \lg \times |0,01t|$. При $t=-15-130$ °С $\delta c_p=0,1$ % (4180,7).

Энтальпия, кДж·кг⁻¹, $h = (0,23867t - 2,9 \cdot 10^{-6}t^2)^{-1}$. При $t=10-135$ °С $\delta h=0,2$ % (251,6).

Энтропия, кДж·кг⁻¹·К⁻¹, $s = 4,1898 \ln T - 23,505$. При $t=0-150$ °С $\delta s=0,5$ % (0,8318).

Объемная теплоемкость, кДж·м⁻³·К⁻¹, $c'_p = 4212 - 1,718t$. При $t=-15-130$ °С $\delta c'_p=0,1$ % (4108,9).

Теплопроводность, Вт·м⁻¹·К⁻¹, $\lambda = [0,603 - 28,73/(t+100)]^{0,5}$. При $t=0-130$ °С $\delta\lambda=0,8$ % (0,651).

Температуропроводность, м²·с⁻¹, $a \cdot 10^8 = 20,283 - 700/(t+100)$. При $t=0-130$ °С $\delta a=0,4$ % ($15,91 \cdot 10^{-8}$).

Динамическая вязкость, Па·с, $\lg(\mu \cdot 10^6) = (0,685 - 103,21/T)^{-1}$. При $t=-10-130$ °С $\delta\mu=1,0$ % ($462,6 \cdot 10^{-6}$).

Кинематическая вязкость, м²·с⁻¹, $\lg(\nu \cdot 10^6) = (0,6688 - 98,4/T)^{-1}$. При $t=10-130$ °С $\delta\nu=1,0$ % ($476,2 \cdot 10^{-6}$).

Поверхностное натяжение на границе вода-пар, Н·м⁻¹, $\sigma \cdot 10^3 = (11900 - 22,57T)^{0,5}$. При $t=0-135$ °С $\delta\sigma=0,1$ % ($66,19 \cdot 10^{-3}$).

Числа Прандтля $lg, (Pr \cdot 10^2) = 0,7906 - 128,72/T)^{-1}$. При $t = 0 - 130^\circ C$ $\delta Pr = 0,5\%$ (2,98).

Водяной пар. При $p > 10$ кПа начинают заметно проявляться силы взаимодействия между молекулами H_2O , которые можно учесть с помощью коэффициента сжимаемости $z = (1 - 1,9 \cdot 10^4 p/T^{4,2})^{0,5}$ в уравнении состояния пара $p v = z R T$, где p , Па, а $v = 1/\rho$. При $p \leq 7,5 \cdot 10^5$ Па $\delta z = 0,1\%$, а плотность пара ($кг \cdot м^{-3}$) для $T < 1000$ К $\rho = (461,522 \sqrt{(T/p)^2 - 1,9 \cdot 10^4/(p T^{2,2})})^{-1}$ (0,13018).

Связь между давлением сухого насыщенного пара (Па) и его температурой (К) $p = \exp(23,114 - 3677/T - 241700/T^2)$. При $t = -4 - 156^\circ C$ $\delta p = 0,2\%$ (19915). Давление при $p < 1$ МПа не оказывает существенного влияния на ТФС пара.

Изобарная удельная теплоемкость пара, $кДж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$ $c_p = (0,5367 - 4,64 \cdot 10^{-6} t^2)^{-1}$. При $t = 0 - 150^\circ C$ $\delta c_p = 0,3\%$ (1,923).

Энтальпия, $кДж \cdot кг^{-1}$, $h = 738,37 T^{0,21738}$. При $t = 0 - 140^\circ C$ $\delta h = 0,05\%$ (2610).

Удельная теплота парообразования $кДж \cdot кг^{-1}$, $г = \exp(7,94265 - 1,59 \times 10^{-6} T^2)$. При $t = 0 - 140^\circ C$ $\delta g = 0,1\%$ (2359,4).

Энтропия, $кДж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$, $s = 4,0295(\exp 224,48/T)$. При $t = 0 - 140^\circ C$ $\delta s = 0,1\%$ (7,905).

Теплопроводность, $Вт \cdot м^{-1} \cdot K^{-1}$, $\lambda = \exp(5,9 \cdot 10^{-6} T^2 - 4,5094)$. При $t = 0 - 150^\circ C$ $\delta \lambda = 0,4\%$ (0,0212).

Динамическая вязкость, $Па \cdot с$, $\mu = \exp(2,35 \cdot 10^{-3} T - 12,3745)$. При $t = 0 - 140^\circ C$ $\delta \mu = 0,4\%$ ($10,92 \cdot 10^{-6}$).

Числа Прандтля $Pr = 1,0$ для $t = 0 - 130^\circ C$ при $\delta Pr = 1,0\%$.

Сухой воздух ($M = 28,96$ $кг \cdot кмоль^{-1}$, $R = 287,1$ $Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$). В условиях пищевой технологии он близок к идеальному газу.

Плотность воздуха, $кг \cdot м^{-3}$ $\rho = 3,484 p/T$, где p — кПа. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta \rho = 0,1\%$ ($1,046$ $кг \cdot м^{-3}$ при 100 кПа и $60^\circ C$).

Формулы последующих ТФС воздуха получены для $p = 100$ кПа. Давление не влияет на теплоемкость, энтальпию, теплопроводность и динамическую вязкость идеальных газов. При $p = 100 \pm 50$ кПа его влиянием на эти ТФС воздуха можно пренебречь. Изобарную удельную теплоемкость для $t = -50 - 150^\circ C$ можно принять постоянной $c_p = 1,006$ $кДж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$ при $\delta c_p = 0,5\%$.

Энтальпия, $кДж \cdot кг^{-1}$, $h = 1,006 t$ с той же погрешностью, что и c_p (60,36).

Объемная теплоемкость, $кДж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}$, $c'_p = 3,505 p/T$, где p — кПа. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta c'_p = 0,6\%$ (1,052).

Теплопроводность, $Вт \cdot м^{-1} \cdot K^{-1}$, $\lambda = (5,96 + 9590/T)^{-1}$. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta \lambda = 0,3\%$ (3,0288).

Температуропроводность, $м^2 \cdot с^{-1}$, $a = 6,84 \cdot 10^{-10} T^{1,824}$. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta a = 0,8\%$ ($27,3 \cdot 10^{-6}$).

Динамическая вязкость, $Па \cdot с$, $\mu \cdot 10^6 = (1,133 t^{10^{-2}} + 12,8/T)^{-1}$. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta \mu = 0,2\%$ ($20,1 \cdot 10^{-6}$).

Кинематическая вязкость, $м^2 \cdot с^{-1}$, $\nu = 6,46 \cdot 10^{-10} T^{1,773}$. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta \nu = 0,2\%$ ($19,2 \cdot 10^{-6}$).

Числа Прандтля $Pr = 0,94 T^{-0,05}$. При $t = -50 - 150^\circ C$ $\delta Pr = 1,0\%$ (0,703).

Влажный воздух. В земных условиях воздух всегда бывает влажным и представляет собой механическую смесь сухого воздуха и водяного пара. Давление влажного воздуха (обычно его рассматривают при барометрическом p_b или близком к нему давлении) является суммой парциальных давлений сухого воздуха (p_a) и водяного пара (p_n), а объемная доля пара $\phi_n = p_n/p_b = \phi_n = (0,622/d_n + 1)^{-1}$. Здесь $\phi = p_n/p_n$ — относительная влажность воздуха; p_n и g_n — соответственно парциальное давление пара в насыщенном воздухе и объемная доля пара в нем; d_n — количество килограммов водяного пара, приходящееся на 1 кг сухого воздуха.

Объемная доля пара в насыщенном влажном воздухе при $p_b = 100$ кПа $\phi_n = \exp(11,6011 - 3677/T - 241700/T^2)$. Для $t = -4 - 156^\circ C$ $\delta \phi_n = 0,2\%$ (0,20).

Плотность влажного воздуха, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, $\rho = 3,484\rho_{\text{в}}(1 - 0,378g_{\text{п}}) = \rho_{\text{в}}(1 - 0,378g_{\text{п}}) = \rho_{\text{в}}[1 - 0,378(0,622/d + i)^{-1}]$, где $\rho_{\text{в}}$ — плотность сухого воздуха при давлении смеси. При $t = 0-150^{\circ}\text{C}$ $\delta\rho = 0,1\%$ (для 60°C и $g_{\text{п}} = 0,2$ $\rho = 0,9795 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$). С повышением $g_{\text{п}}$ или $d_{\text{п}}$ уменьшается ρ , т. е. влажный воздух всегда легче сухого. Из пересыщенного влагой воздуха пар конденсируется и образуется туман. Водность туманов, как правило, не превышает $0,001 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$. Она суммируется с ρ , не оказывая на плотность влажного воздуха существенного влияния.

Изобарная теплоемкость, $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, в расчете на 1 кг сухого воздуха $c_{\text{р}} = c_{\text{рв}} + d_{\text{п}}c_{\text{рп}} + d_{\text{ж}}c_{\text{рж}}$, где индекс ж относится к жидкой воде капелек тумана, а $d_{\text{ж}}$ — масса воды, кг, на 1 кг сухого воздуха.

Энтальпия, $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$, в расчете на 1 кг сухого воздуха, $h = h_{\text{в}} + d_{\text{п}}h_{\text{п}} + d_{\text{ж}}h_{\text{ж}}$.

У насыщенного при 60°C влажного воздуха ($d_{\text{п}} = 0,1555$) с капельками жидкости ($d_{\text{ж}} = 0,001$) $c_{\text{р}} = 1,309 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, а $h = 466,5 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$, причем влиянием $d_{\text{ж}}$ на $c_{\text{ср}}$ ($4,18 \cdot 10^{-3} \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) и h ($0,252 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$) можно пренебречь.

Динамическая вязкость μ и теплопроводность λ влажного воздуха не являются аддитивными величинами и линейными функциями $g_{\text{п}}$. На основе аналогии между переносом количества движения и энергии в газовых смесях (при низких давлениях) и аппроксимации Хернинга и Ципера для параметров, учитывающих взаимодействие молекул компонентов, мы получили две идентичные формулы: $\mu = \mu_{\text{в}}/A + \mu_{\text{п}}/B$ и $\lambda = \lambda_{\text{в}}/A + \lambda_{\text{п}}/B$, где $A = 1 + 0,789/C$; $B = 1 + 1,268C$; $C = 1/g_{\text{п}} - 1$. Как и для других газовых смесей, где есть полярный компонент (водяной пар), а молекулярные массы компонентов близки по своим значениям, имеет место положительное отклонение от аддитивности при отсутствии максимума. В насыщенном при 60°C воздухе ($g_{\text{п}} = 0,2$) $\mu = 18,59 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$, а $\lambda = 2,755 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Выводы. Вышеприведенные формулы, несмотря на их простоту, позволяют определять ТФС воды, водяного пара, сухого и влажного воздуха с погрешностью, не превышающей погрешности исходных экспериментальных данных, и значительно облегчают инженерные расчеты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов С. Н., Иванов О. П., Курпирянова А. В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справ.— М.: Агропромиздат, 1985.— 208 с.
2. Воронец Д., Козич Д. Влажный воздух: термодинамические свойства и применение.— М.: Энергоатомиздат, 1984.— 136 с.
3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1975.— 488 с.
4. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара.— М.: Энергия, 1980.— 424 с.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей.— Л.: Химия, 1982.— 592 с.
6. Синат-Радченко Д. Е. Учет реальных свойств водяного пара в тепловых расчетах процессов пищевой технологии // Пром. теплотехника.— 1986.— № 2.— С. 62—65.
7. Таблицы физических величин: Справ./Под ред. И. К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.— 1008 с.
8. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справ.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— Кн. 2.— 560 с.
9. Термодинамические свойства воздуха/В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов и др.— М.: Изд-во стандартов, 1978.— 276 с.