

УДК 658.264(075.32)

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА СВОЙСТВ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ ИДЕАЛЬНО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Бурмич А.Д., Лазарь А.С., Бойко Е.Г.

Научный руководитель – профессор, д.т.н. Романюк В.Н.

**Введение.** Влагосодержащие идеально-газовые смеси широко распространены в инженерной практике. Наиболее характерными примерами таких смесей могут быть дымовые газы и влажный воздух. Расчетные соотношения для нахождения свойств дымовых газов и влажного воздуха отличаются лишь коэффициентами, вычисляемыми на основе молярных масс, газовых постоянных, изобарных теплоемкостей водяных паров и компонентов данных идеально-газовых смесей. Естественно, различие указанных характеристик для влажного воздуха и множества вариаций состава дымовых газов. Расчетные соотношения идентичны для тех и других упомянутых смесей, что позволяет в основу расчетов положить соотношения для смесей идеальных газов и также использовать соотношения для влажного воздуха. Свойства влажного воздуха и математические модели расчета его свойств общедоступны, признаны и распространены [1–3], как, впрочем, и алгоритмы расчета свойств [4, 5]. Сегодня не приходится говорить о проведении неавтоматизированных расчетов, без использования ПК. Общедоступные программные комплексы для расчета свойств веществ, вообще, и влажного воздуха, в частности, либо предполагают использование сред программирования неприемлемых по тем или иным причинам, либо требуется соответствующее финансовое обеспечение. В то же время, для проведения расчетов в учебном процессе очень удобно использовать общеизвестную для пользователей ПК расчетную среду *Excel*. Однако, в связи с отсутствием прикладных программ специфических для нужд пользователя в каждом конкретном случае, теряется привлекательность выполнения расчетов в этой среде. Этот пробел необходимо ликвидировать, для чего, прежде всего, требуется обеспечить расчеты теплофизических свойств гаммы веществ, используемых в расчетах. Одним из таких веществ, широко используемым в инженерной практике, является влажный воздух, для расчета свойств которого в данной работе и рассматривается разработка пакета прикладных программ. Другим вопросом, лежащим в начале работы, является выбор языка программирования. Пакет *Excel*, как известно, разработан на базе языке программирования *VBA (Visual Basic for Applications)*, что объясняет использование его для написания прикладных программ, поскольку обеспечивается беспрепятственная интеграция их в среду *Excel*.

**Математическая модель и диапазон изменения параметров для расчета свойств.** Как известно, влагосодержащие идеально-газовые смеси в контексте данной задачи рассматриваются как бинарные смеси, образованные парами воды в состоянии перегретый пар или в состоянии насыщенный пар и сухой компонентой, объединяющей в своем составе все прочие компоненты упомянутых смесей более сложных составов. Для сухой компоненты использованы уравнение состояния идеального газа Клапейрона–Менделеева, смеси идеальных газов и процессов с идеальными газами [7]. Характеристики сухого воздуха определены и неизменны во всех случаях, представляющих интерес для данной задачи [1–5]. Характеристики дымовых газов рассчитывались по общеизвестным соотношениям в соответствии с составом газообразных, твердых и жидких топлив с учетом коэффициента избытка воздуха, подаваемого на горение [6].

Расчет свойств водяного пара для температур больших температуры основной тройной точки воды не вызывает вопросов и в общем случае рассчитывается по международным уравнениям, предлагаемым ассоциацией по свойствам воды (МАСВП), приведенных на сайте организации, либо в русскоязычном варианте [8–11].

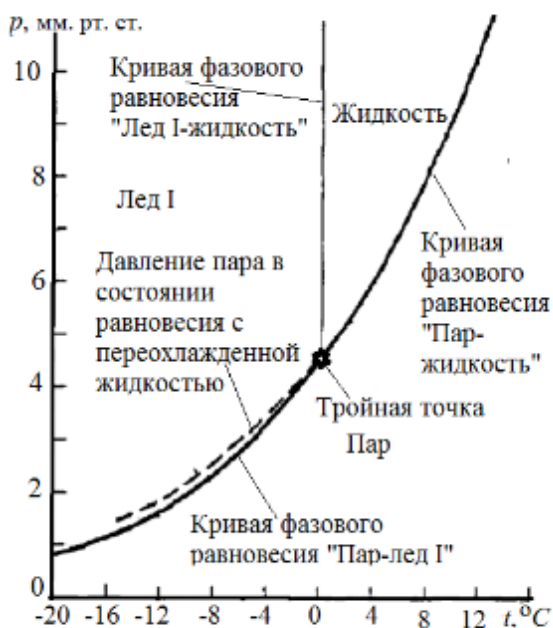


Рисунок 1– Фазовая диаграмма воды в области тройной точки

Необходимо более подробно остановиться на расчете свойств воды в области параметров, при температурах ниже температуры основной тройной точки, рисунок 1.

Расчетной областью состояний влажного воздуха при температурах ниже температуры тройной точки является зона, лежащая правее кривой фазового равновесия «Пар-лед I» и непосредственно на этой кривой, соответственно состояния «Влажный ненасыщенный воздух» и «Влажный насыщенный воздух». Температура воздуха, в этом случае, должна превышать или быть равной температуре фазового равновесия воды на кривой «Пар-лед I» при давлении равном парциальному давлению паров воды во влажном воздухе. Эту температуру можно рассчитать по уравнению Уэшбурну [12]

$$Lg(p) = A/T + B \cdot Lg(T) + C \cdot T + D \cdot T^2 + E, \tag{1}$$

где  $p$  – давление насыщенного пара в мм. рт. ст. в состоянии равновесия с льдом I при  $t$  в °C;  $T = t + 273,1$  – температура влажного воздуха, K;  $A = -2445,5646$ ;  $B = 8,2312$ ;  $C = -1677,006 \cdot 10^{-5}$ ;  $D = 120514 \cdot 10^{-10}$ ;  $E = -6,757169$ .

Состояние на кривой равновесия пара с переохлажденной жидкостью может быть рассчитано по соотношению Осборна–Майерса, рекомендуемое к применению при температурах выше (-5) °C [12]. Вопрос выбора кривой равновесия для проведения расчетов влажного воздуха лежит за пределами данной работы, вместе с тем, следует отметить, что поскольку давление насыщенного пара на кривых равновесия «Пар-жидкость» и «Пар-лед» ( $p_n$ ) отличается от давления пара в насыщенном влажном воздухе ( $p_{пн}$ ), выбор между соотношениями Уэшбурну и Осборна–Майерса оказывается на втором плане. Соотношение давлений  $p_n$  и  $p_{пн}$

$$p_{пн} = p_n \cdot \chi \tag{2}$$

таково, что поправкой  $\chi$  в диапазоне температур от (-40) до 50 °C при давлении влажного воздуха порядка 100 кПа можно пренебречь. При этом, погрешность определения не превысит 0,55 % [4]. Наконец, для расчета давления  $p_n$  в Па в диапазоне температур 0–(-100) °C предлагается использовать соотношение [4]

$$Ln(p_n) = C_1/T + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot Ln(T), \tag{3}$$

где  $T$  – абсолютная температура, K;  $C_1 = -5,6745359 \cdot 10^3$ ;  $C_2 = 6,3925247$ ;  $C_3 = -5,6745359 \cdot 10^{-3}$ ;  $C_4 = 6,2215701 \cdot 10^{-7}$ ;  $C_5 = 2,0747825 \cdot 10^{-9}$ ;  $C_6 = -9,484024 \cdot 10^{-13}$ , а для температур 0–(-60) °C можно использовать более простое соотношение [4]

$$Ln(p_n) = (C_1 \cdot t + C_2) / (C_3 \cdot t + C_4), \tag{4}$$

где  $t$ – температура водяных паров, °C;  $C_1 = 18,74$ ;  $C_2 = -115,72$ ;  $C_3 = 0,881$ ;  $C_4 = 233,77$ .

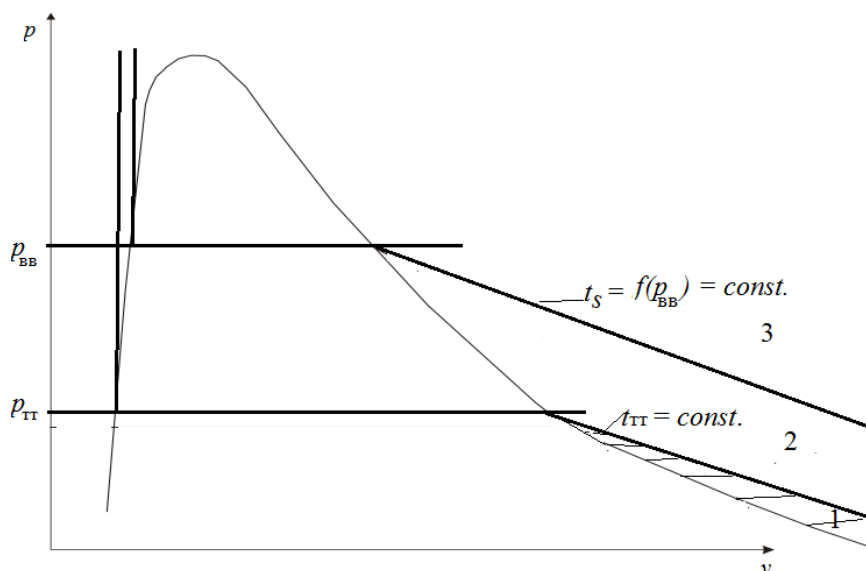


Рисунок 2 - Расчетные области состояний водяных паров во влажном воздухе: 1 - область отрицательных температур; 2 - область положительных температур ниже температуры насыщения водяных паров при давлении равном давлению влажного воздуха; 3 - область температур, превышающих температуру насыщения при давлении равном давлению влажного воздуха.

Интересующая нас область оказывается достаточно небольшой, на рисунке 2 она обозначена штриховкой. Во всех точках рассматриваемой области 1 свойства пара воды можно рассчитывать по соотношениям идеального газа. Удельная теплота фазового перехода «пар – лед I» (сублимация или возгонка) практически постоянна и с погрешностью менее 0,1 % может быть принята равной 2835 кДж/кг [3]. Теплоемкость пара, сухого воздуха и составляющих сухой компоненты дымовых газов во всем диапазоне

рассматриваемых состояний удобно рассчитывать по соотношениям, предложенным в нормативном методе для расчета котлов [6], представленной полиномом пятой степени от температуры с использованием прикладных программ. Свойства водяных паров при температурах выше температуры тройной точки, при наличии соответствующих прикладных программ, можно рассчитывать по соотношениям МАСВП [8–11]. В этом случае, диапазон давлений «сверху» не ограничивается справедливостью тех или иных аппроксимирующих соотношений, его определяют взвешенные, разумные пределы давлений применимости соотношений идеальных газов и их смесей для расчета свойств сухой компоненты. Диапазон давлений «снизу» можно ограничить давлением атмосферного воздуха на высоте 20 тыс. метров. Для определения атмосферного давления ( $B$ , кПа) и температуры ( $t$ , °C) на высотах до 20 тыс. метров можно использовать соотношения [4]

$$B = C_1 \cdot (1 + C_2 \cdot H)^{C_3}, \tag{5}$$

$$t = C_4 + C_5 \cdot H, \tag{6}$$

где –  $C_1 = 101,325$ ;  $C_2 = -2,25577$ ;  $C_3 = 5,2559 \cdot 10^{-5}$ ;  $C_4 = 15$ ;  $C_5 = -0,0065$ .

За нулевую точку отсчета энтальпии влажного воздуха принята энтальпия сухой компоненты ( $d = 0$ ) при температуре равной 0 °C [4]. Для расчета энтальпии влажного воздуха используется соотношение

$$h_{\text{вв}} = \bar{c}_p \Big|_0^{t_{\text{вв}}} \cdot t_{\text{вв}} + h_{\text{п}} \cdot d, \tag{7}$$

где  $\bar{c}_p \Big|_0^{t_{\text{вв}}}$  – теплоемкость сухой компоненты, изобарная, удельная массовая, средняя в интервале температур 0– $t_{\text{вв}}$ ;  $t_{\text{вв}}$  – температура влажного воздуха, °C;  $d$  – влагосодержание, кг/кг;  $h_{\text{п}}$  – энтальпия пара, кДж/кг. Рассчитывается по соотношениям МАСВП для положительных температур.

В случае температур ниже температуры тройной точки для расчета энтальпии влажного воздуха можно использовать соотношение

$$h_{\text{вв}} = c_{p,\text{л}} \cdot t_{\text{вв}} + (q_{\text{сбл}} - \lambda + q_{\text{пп}}), \tag{8}$$

где  $c_{p,\text{л}}$  – теплоемкость льда, изобарная, удельная массовая, в данном случае постоянная, равная 1,96 кДж/(кг·°С);  $t_{\text{вв}}$  – температура влажного воздуха, °С;  $q_{\text{сбл}}$  – удельная массовая теплота сублимации воды, в данном случае постоянная, равная 2835 кДж/кг;  $\lambda$  – удельная массовая теплота плавления льда, в данном случае постоянная, равная 334,11 кДж/кг;  $q_{\text{пп}}$  – удельная массовая теплота перегрева пара, определяемая соотношением

$$q_{\text{пп}} = c_{p,\text{п}} \cdot (t_{\text{вв}} - t_{\text{сбл}}), \tag{9}$$

где  $c_{p,\text{п}}$  – теплоемкость пара воды, изобарная, удельная массовая, которую в данном случае можно принимать постоянной и равной 1,86 кДж/(кг·°С);  $t_{\text{вв}}$  – температура влажного воздуха, °С;  $t_{\text{сбл}}$  – температура сублимации воды при давлении водяных паров во влажном воздухе, °С.

Температуру мокрого термометра  $t_{\text{м}}$  при известных значениях  $d$ ,  $h_{\text{вв}}$ ,  $t_{\text{вв}}$  можно рассчитать из решения системы уравнений

$$(c_{p,\text{ск}} + c_{p,\text{п}} \cdot d) \cdot (t_{\text{вв}} - t_{\text{м}}) = r_{\text{м}} \cdot (d_{\text{н}} - d), \tag{10}$$

$$h_{\text{н}} = h_{\text{вв}} + (d_{\text{н}} - d) \cdot c_{p,\text{ж}} \cdot t_{\text{м}}, \tag{11}$$

где  $c_{p,\text{ск}}$ ,  $c_{p,\text{п}}$ ,  $c_{p,\text{ж}}$  – соответственно изобарные теплоемкости, удельные массовые сухой компоненты, водяного пара и жидкости, кДж/(кг·°С) при температуре влажного воздуха;  $t_{\text{вв}}$ ,  $t_{\text{м}}$  – соответственно температуры влажного воздуха и мокрого термометра в нем, °С;  $d$ ,  $d_{\text{н}}$  – соответственно влагосодержания воздуха в данном состоянии и в состоянии насыщенного влажного воздуха при температуре равной температуре влажного воздуха;  $r_{\text{м}}$  – теплота парообразования или сублимации при температуре, равной температуре мокрого термометра;  $h_{\text{вв}}$ ,  $h_{\text{н}}$  – соответственно удельные массовые на кг сухой компоненты энтальпии влажного воздуха при заданной температуре и температуре, равной температуре мокрого термометра, кДж/кг.

Уравнение (10) представляет баланс теплоты процесса адиабатного увлажнения воздуха. Соотношение (11) соответствует определению температуры мокрого термометра [4]: «Температура мокрого термометра  $t_{\text{м}}$  – температура, которую принимает влажный воздух с начальными параметрами  $h_{\text{вв}}$  и  $d$  в результате адиабатного тепло- массообмена с водой в жидком или твердом состоянии, имеющей постоянную температуру, равную  $t_{\text{м}}$ , после достижения им насыщенного состояния».

Возможные 17 сочетаний задания начальных двух параметров влажного воздуха, в дополнение к заданному давлению  $p_{\text{вв}}$ , для которых требуется проводить расчет других пяти, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты задания исходных данных для расчета состояний влажного воздуха

Но мер варианта	Параметры влажного воздуха (подлежащие расчету отмечены –, заданные – +,)						
	$t_1$ , °С	$\varphi_1$ , %	$d_1$ , кг/кг	$h_{\text{вв},1}$ , кДж/кг	$p_{\text{п},1}$ , кПа	$t_{\text{п},1}$ , °С	$t_{\text{м},1}$ , °С
1.	+	+	–	–	–	–	–
2.	+	–	–	–	–	+	–
3.	+	–	+	–	–	–	–
4.	+	–	–	–	+	–	–
5.	+	–	–	+	–	–	–
6.	+	–	–	–	–	–	+
7.	–	+	–	–	+	–	–

8.	–	+	–	+	–	–	–
9.	–	–	+	+	–	–	–
10.	–	–	–	–	–	+	+
11.	–	+	+	–	–	–	–
12.	–	–	–	–	+	–	+
13.	–	+	–	–	–	+	–
14.	–	+	–	–	–	–	+
15.	–	–	+	–	–	–	+
16.	–	–	–	+	+	–	–
17.	–	–	–	+	–	+	–

### Литература

1. Богословский, В.Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение / В.Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров. – М.: Стройиздат, 1985. – 369 с.
2. Бурцев, С.И. Влажный воздух. Состав и свойства: Учебное пособие / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков. – СПб.: СПбГФХПТ, 1998. – 146 с.
3. Белоусов, В.С. Термодинамические свойства и процессы влажного воздуха / В.С. Белоусов, С.А. Нейская, Н.П. Ширяева, Г.П. Ясников. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. – 22 с.
4. Тарабанов, М.Г. Влажный воздух. Справочное пособие – 1-2004 / М.Г. Тарабанов, В.Д. Коркин, В.Ф. Сергеев. – М.: НП «АВОК», 2004. – 72 с.
5. Гаврилкин, В.П. Аналитическое определение параметров влажного воздуха / В.П. Гаврилкин, Е.А. Куранов // Вестник АГТУ. – 2007. – № 2. – с. 148–151
6. Кузнецов, Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский и др. Под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
7. Хрусталева, Б.М. Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – Ч. 1. – 487 с.
8. Александров, А.А. Международное уравнение состояния воды и водяного пара / А.А. Александров // Теплоэнергетика. – № 10. – 1997. – С. 68–72.
9. Александров, А.А. Система уравнений *IAPWS-IF97* для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 1. Основные уравнения / А.А. Александров // Теплоэнергетика. – № 9. – 1998. – С. 69–77.
10. Александров, А.А. Система уравнений *IAPWS-IF97* для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 2. Дополнительные уравнения / А.А. Александров // Теплоэнергетика. – № 10. – 1998. – С. 64–72.
11. Александров, А.А. Система уравнений *IAPWS-IF97* для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 3. Оценка точности величин. Сравнение с *IFC-67* / А.А. Александров // Теплоэнергетика. – № 1. – 1999. – С. 67–70.
12. Эйзенберг, Д. Структура и свойства воды / Д. Эйзенберг, В. Кауцман. Перевод с англ. А.К. Шемелина. Под ред. В.В. Богородского. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 280 с.