Научная статья
УДК 697.93:533.275.08

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПСИХРОМЕТРА И РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Е.А. Оленев[1,*]

[1] Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия
[*] E-mail: olenevea@mail.ru

Аннотация. Получение психрометрических данных с помощью новой конструкции психрометра. Предлагается аналитический метод расчета параметров влажного воздуха для определения его значений в помещении. Этот метод может быть использован для расчета устройств и систем кондиционирования воздуха, не пользуясь *i-d* диаграммой влажного воздуха. Погрешность разработанных формул приемлема для практических расчетов.

Ключевые слова: *температура; влажность; воздух; кондиционер; искусственный климат*.

Для цитирования: Оленев Е.А. Совершенствование конструкции психрометра и разработка метода расчета влажности воздуха // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2024. Т. 10. № 4. С. 50–60.

Original article

IMPROVING THE PSYCHROMETER DESIGN AND DEVELOPING THE METHOD FOR CALCULATING THE AIR HUMIDITY

E.A. Olenev[1,*]

[1] Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Vladimir, Russia
[*] E-mail: olenevea@mail.ru

Abstract. Receipt of psychrometric information with the help of new construction psychrometer. An psychrometric method is proposed for calculation of parameters humid air to definition of it significants in living accommodation. This method it is possible for calculation of the arrangements and air-condition systems without *i-d* diagram of humid air. The error of working out formulas is acceptability for practical calculations.

Key words: *temperature; humidity; air; air-condition; artificial climate.*

For citation: Olenev E.A. Improving the psychrometer design and developing the method for calculating the air humidity. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. Vol. 10, No. 4, pp. 50–60.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется созданию благоприятного для человека микроклимата в различных производственных и жилых помещениях. Этой проблеме посвящено много научных публикаций (см. [1-4] и библиографию). Создание

© Оленев Е.А. 2024

микроклимата в помещении осуществляется системами кондиционирования воздуха, расчет и работа которых основываются на данных о влажности воздуха. Поэтому проблема совершенствования различных приборов и методов определения влажности является весьма актуальной, что подтверждается большим количеством статей в научных журналах [5-9]. Тем не менее, одним из самых надежных и востребованных является метод определения влажности с помощью психрометра. При этом расчет ведется с помощью *i-d* диаграммы влажного воздуха, что затрудняет применение компьютера на этом этапе, а получение необходимых параметров с помощью известных аспирационных психрометров связано с неудобством, обуславливаемым необходимостью продува фитиля влажного термометра воздухом в течение определенного времени[1] [10].

Как известно, испарение воды приводит к её охлаждению, тем большему, чем меньше влажность воздуха, контактирующего с водой. По разнице температур воздуха (называемой в психрометрии температурой сухого термометра) и поверхностного слоя воды (называемой температурой влажного термометра, или температурой смоченного термометра [11], или температурой мокрого термометра [12]) можно определить влажность воздуха. При это приходится учитывать то обстоятельство, что испарившаяся влага остаётся в окрестностях датчика температуры (например, колбы влажного жидкостного термометра), локально увеличивая там влажность воздуха. Для устранения этого эффекта при измерении влажности применяют аспирацию, обдувая термометры анализируемым газом (воздухом)[2]. Конструкция аспирационного психрометра может включать в себя вентилятор для обдува воздухом обоих термометров. Скорость обдува обычно составляет 0,5 – 2 м/с.

Например, в аспирационном психрометре [13, 14] одинаковые ртутные термометры расположены в специальной никелированной оправе, защищающей их от повреждений и теплового излучения окружающих предметов, где обдуваются потоком исследуемого воздуха с постоянной скоростью около 2 м/сза счёт просасывания (аспирации) воздуха посредством механического или электрического вентилятора.

Наличие принудительной аспирации – очень важный параметр, оказывающий наиболее сильное влияние на погрешность измерения, которая увеличивается до 10 – 15% без аспирации. Однако наличие внешнего вентилятора, обеспечивающего постоянную скорость аспирации, обуславливает большое потребление энергии и требует еще прибора для измерения скорости создаваемого вентилятором потока воздуха, что усложняет конструкцию и делает неудобным психрометр в эксплуатации. В электронных психрометрах фирмы QuestTech (США)«смоченный» термометр обдувается встроенным вентилятором, что позволяет обеспечить более высокую точность измерений, но такая конструкция сложна и потребляет относительно много электрической энергии.

Для устранения указанных недостатков был разработан новый способ работы психрометра, облегчающий получение необходимых данных [15], а также выведены аналитические зависимости, позволяющие находить параметры окружающей среды без применения *i-d* диаграммы влажного воздуха, что не только способствует проводить весь расчет на компьютере, но и моделировать с помощью последнего работу системы кондиционирования, т. е. моделировать микроклимат в помещении.

Способ работы психрометра

Психрометр содержит закрепленные на основании сухой 1 термометр и влажный 2, конец которого охвачен частично погруженным в воду 3 фитилем 4, и осциллятор, на оси 5

[1]Гигрометр психометрический ВИТ. Инструкция по эксплуатации Мб.2.844.000.ИЭ.
[2]Рекомендации по межгосударственной стандартизации. РМГ 75-2014. Измерения влажности веществ. Термины и определения. Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2015. 20 с.

которого неподвижно закреплен один конец спиральной пружины (волоска) 6, другой конец которого закреплен в заделке, и – баланс, имеющий магнитопроводы 7, на одних концах которых неподвижно размещены плоскости (лопатки, балансиры) 8 и 9, а на других концах – магниты 10 (рис. 1).

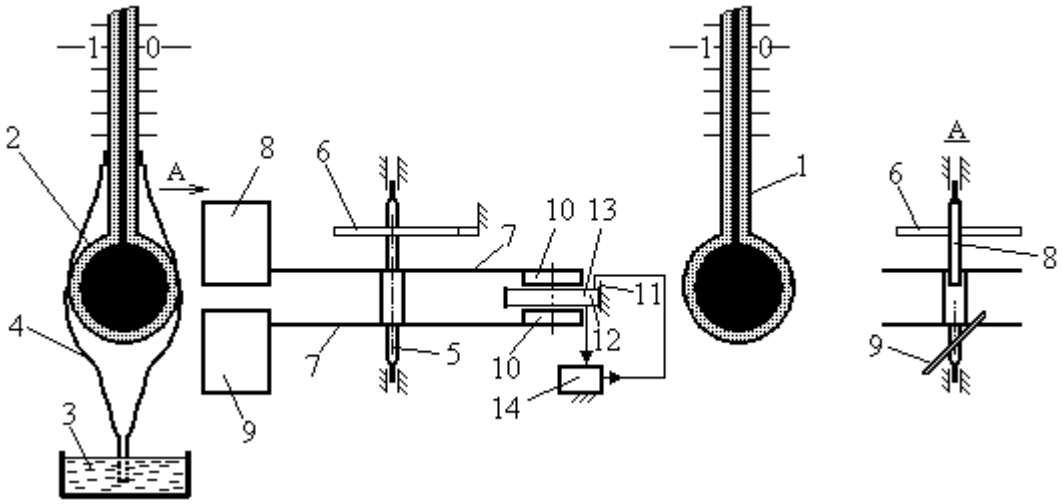


Рис. 1. Схема обдува воздухом влажного термометра

В магнитном поле магнитов на неподвижном кронштейне 11 размещены бифилярно намотанные катушка освобождения 12 и катушка импульса 13, подключенные соответственно к входу и выходу усилителя-формирователя 14, который может быть выполнен в виде транзистора 15, эмиттер которого соединен с минусом источника питания и одним концом катушки освобождения 12 ($W_о$), другой конец которой через конденсатор 16 подключен к базе транзистора, коллектор которого через катушку импульса 13 ($W_и$), подключен к плюсу источника питания (рис. 2).

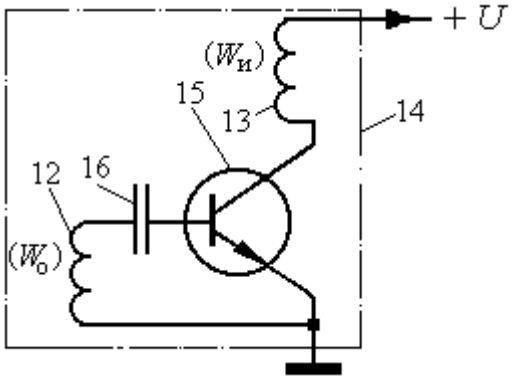


Рис. 2. Схема возбуждения

Создание потока воздуха автоколебательным движением осциллятора позволяет значительно сократить потребление энергии, поскольку в режиме колебаний на собственной частоте осциллятор использует очень мало энергии. Благодаря этому обдув термометра можно осуществлять постоянно (без перерыва), в результате чего более насыщенный влагой воздух будет постоянно отгоняться от термометра, а поэтому показания с термометров можно снимать в любой момент времени. Это сокращает время съема показаний и повышает точность определения относительной влажности, поскольку термометр обдувается всегда воздухом окружающей среды, т.е. как бы постоянно находится в этой среде, а не в более влажном воздухе, который может скапливаться находится около фитиля и самого термометра, если не производить такой обдув.

Направление плоскостью 8 потока поперек термометра, а плоскостью 9 – вдоль термометра позволяет убрать от последнего более влажный воздух, который образуется около фитиля при испарении с него влаги. Кроме того, создаваемый вертикальный (вдоль термометра) поток, удаляя влажный воздух, обеспечивает подсасывание к осциллятору свежего окружающего воздуха, который затем направляется поперек и вдоль термометра, что повышает точность измерения.

Выполнение осциллятора в виде системы «баланс-спираль» позволяет устанавливать осциллятор в любом положении в пространстве, что упрощает конструкцию психрометра. Кроме того, плоскостями, посредством которых производится обдувка влажного термометра, можно частично обдувать и сухой термометр, если его расположить вблизи осциллятора, поскольку, как правило, амплитуда колебаний системы «баланс-спираль» составляет 270˚. Это повышает точность измерений.

Питатель с дистиллированной водой 3 устанавливают на основание таким образом, чтобы конец фитиля 4 оказался в воде (рис. 1), подают напряжение на усилитель формирователь 14 и, например пальцем, выводят осциллятор из положения равновесия, а затем убирают палец от осциллятора. Возвращаясь за счет пружины 6 и проходя положение равновесия, магнитная система осциллятора, образованная магнитами 10 и магнитопроводами 7, перекрывает силовыми линиями витки катушки освобождения 12 ($W_о$), благодаря чему в ней индуцируется напряжение, которое поступает через конденсатор 16 на базу транзистора 15 и открывает его (рис. 2).

В результате этого в катушке импульса 13 ($W_и$) формируется импульс тока, который создает в ней магнитное поле, взаимодействующее с полем постоянных магнитов магнитной системы, при этом магниты притягиваются к катушке, создавая момент импульса. После прохождения магнитами катушек напряжение на катушке освобождения 12 пропадает, и транзистор 15 усилителя-формирователя 14 закрывается. В результате осциллятор входит в режим автоколебаний. Такой режим для психрометра будет рабочим. Заметим, что в режиме автоколебаний от источника потребляется мало энергии, например часы от одной батарейки работают больше года.

Заметим, что если амплитуда колебаний осциллятора будет больше 180˚, то обдуву будет подвергаться и сухой термометр 1, если его расположить подобно влажному термометру рядом с осциллятором.

Силы и моменты, действующие на баланс осциллятора

При повороте магнитопороводов 7 на угол φ магнитная система, движущаяся по радиусу R, перекрывает силовыми линиями витки катушки 12 (на рис. 3 заштрихованная часть), благодаря чему в ней индуцируется напряжение U_m.

Предположим на угле α, равным половине угловой ширины катушки, формируется положительная полуволна напряжения, а на угле λ – отрицательная. Положительная полуволна напряжения открывает транзистор 15 усилителя-формирователя, переводя его в режим глубокого насыщения. В результате этого в катушке импульса $W_и$ формируется импульс тока, который создает в них магнитное поле, взаимодействующее с полем постоянных магнитов магнитной системы, при этом магниты подтягиваются к центру катушки, создавая момент вращения на балансе. После прохождения магнитами угла α в катушке 12 формируется отрицательная полуволна напряжения, при этом транзистор 15 закрывается, и ток в катушке $W_и$ станет равным нулю.

Такое состояние будет продолжаться до тех пор, пока магнитная система вновь не начнет перекрывать катушку $W_о$, и цикл работы повторится.

При движении магнитов магнитной системы относительно катушек $W_о$ и $W_и$ в них возникает индукционное напряжение, максимальная величина которого равна [16]

$$U_m = B\pi\frac{R_к+r_к}{2}nR\,\dot{\varphi} \qquad (1)$$

где B– магнитная индукция в зазоре магнитной системы, Тл = В·с/м^2; R – радиус магнитной системы, м; $R_к$ и $r_к$ – наружный и внутренний радиусы катушки соответственно, м;n– число витков катушки; $\dot{\varphi}$– угловая скорость вращения баланса, с$^{-1}$.

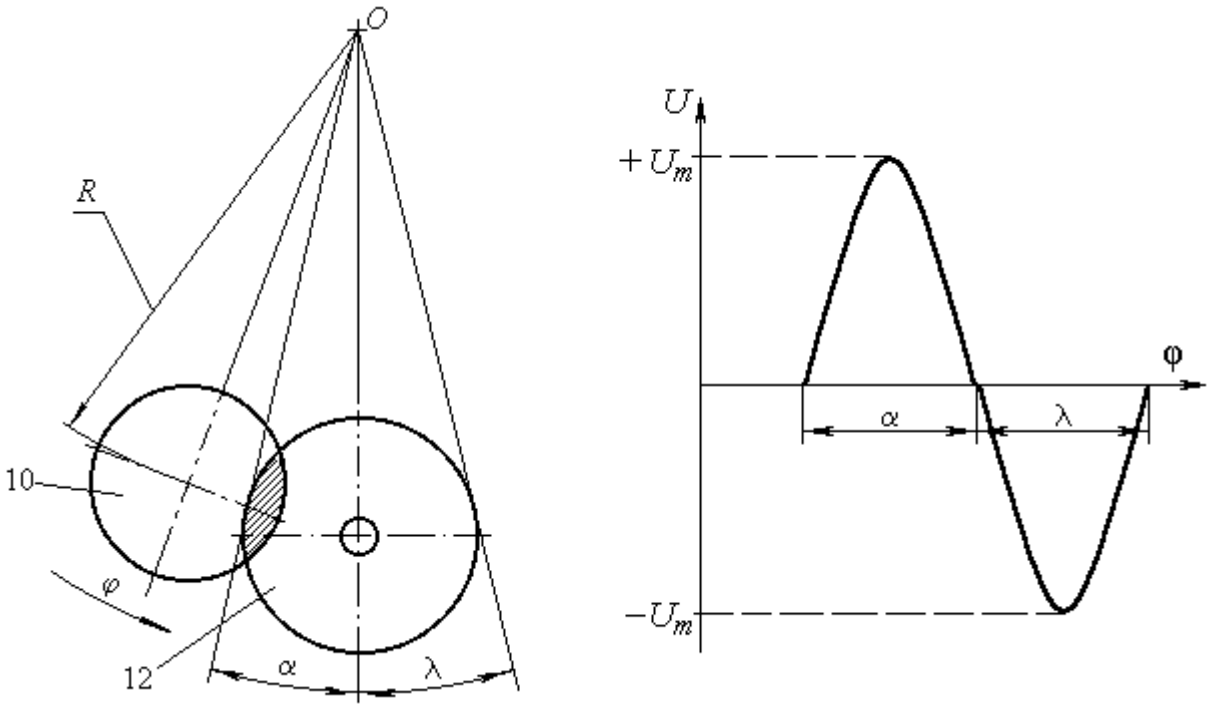


Рис. 3. Схема формирования напряжения в катушке привода

Текущее же напряжение U, индуцированное в катушках, будет определяться функцией $A_i = f(\varphi)$, гдеA_i – эффективная площадь перекрытия катушек постоянными магнитами; φ – угол поворота магнитной системы в интервалах: угла α (полуволна напряжения одной полярности) и угла λ, причем $0 \leq \varphi \leq (\alpha + \lambda)$. Указанная зависимость с достаточной степенью точности может быть описана функцией

$$A_i = \frac{a(\sin\varphi)^2}{\sigma^4+(\sin\varphi)^4} A_0, \quad (2)$$

где a, б – коэффициенты, зависящие от размеров магнитной системы и катушки; A_0– площадь катушки, м^2.

На рис. 4 показана функция изменения A_i от угла поворота магнитной системы на катушками.

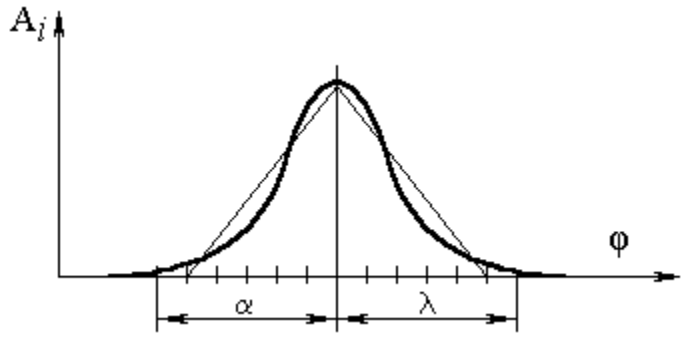


Рис. 4. Функция эффективной площади перекрытия катушекмагнитами

Следует заметить, что несмотря на то, что значение A_i увеличивается при изменении φ от 0 до α, величина U после прохождения магнитами приблизительно угла α/2 начинает уменьшаться (рис. 3). Объясняется это тем, что индуцированный ток, направление которого определяется правилом правой руки, начинает уменьшаться вследствие возникновения противотока во второй половине катушки, направление витков которой изменяется на противоположное относительно вектора движения магнитов. Для упрощения выражения (2) его можно заменить функцией, имеющий вид треугольника (показан на

рисунке 4 тонкой линией. Стороны треугольника отсекают от A_i и прибавляют к ней одинаковые по площади элементы, в результате чего площадь, определяемую выражением (2) можно заменить соответствующей площадью треугольника.

С учетом изменения эффективной площади перекрытия магнитов и катушки индукционное напряжение будет равно

$$U = B\pi\frac{R_к+r_к}{2}nR\ \dot{\varphi}\ \frac{A_i}{A_0}. \quad (3)$$

Число витков катушки может быть найдено из выражения

$$n = k\frac{4h(R_к-r_к)}{\pi d^2}, \quad (4)$$

где k– коэффициент укладки провода катушки; h– высота катушки, м; $R_к$ и $r_к$ – наружный и внутренний радиусы катушки соответственно, м; d– диаметр провода катушки, м.

При прохождении по катушке 12 управляющего тока возникает противодействующая движению магнитной системы сила, максимальное значение которой с учетом (1) равно

$$F_д = \frac{1}{R_д+R_{вх}}\left(B\pi\frac{R_к+r_к}{2}n\right)^2 R\ \dot{\varphi}. \quad (5)$$

где $F_д$ – сила, противодействующая движению магнитной системы, Н; $R_д$, $R_{вх}$ – соответственно, активное сопротивление катушки датчика и входное сопротивление усилителя, Ом.

Поскольку, как правило, активное сопротивление катушки датчика и входное сопротивление усилителя велики, то первый сомножитель в уравнении (5) мал, а поэтому силой $F_д$ можно пренебречь.

При движении магнитной системы, на участке угла α, в катушке привода $W_и$ протекает ток J, сформированный транзистором усилителя-формирователя. Для магнитоэлектрического привода можно пренебречь индуктивностью этой катушки и принять (полагая, что транзистор работает в режиме ключа)

$$J = \frac{U_A-U}{R_И+R_{ВЫХ}}, \quad (6)$$

гдеU_A– напряжение источника питания, В; U – соответствует формуле (3); $R_И, R_{ВЫХ}$– соответственно, активное сопротивление катушки привода ($W_и$) и сопротивление транзистора, Ом;.

С учетом выражения (6) сила импульса для катушки $W_и$ может быть выражена

$$F_И = \frac{B\pi\frac{R_к+r_к}{2}n}{R_И+R_{ВЫХ}}\left(U_A - B\pi\frac{R_к+r_к}{2}nR\ \dot{\varphi}\ \frac{A_i}{A_0}\right). \quad (7)$$

Среднее значение этой силы может быть найдено упрощено, путем вычисления половины площади треугольника, изображенного на рис. 4 тонкой сплошной линией.

Сила, обозначенная выражением (7), действуют периодически. Период действия зависит от периода колебаний осциллятора и может составлять величину, например 0,2 с. Из этой формулы видно, что сила импульса пропорциональна току и магнитной индукции. Импульс тока имеет форму, близкую к прямоугольной с небольшим симметричным «провалом» на вершине, обусловленным явлением самоиндукции.

Умножив величину силы на радиус *R*магнитной системы, получим значение момента вращения, действующего на баланс посредством магнитоэлектрического привода.

Определение относительной влажности воздуха с помощью формул

В соответствии с *i-d* диаграммой автором были разработаны аналитические зависимости, позволяющие для характерной для помещений температуры (от 10 до 35 ˚С) производить вычисление необходимых параметров воздуха.

Если известны значения температур сухого и влажного термометров, то влагосодержание воздуха можно вычислить по формуле (8) ($d = f(t_{\text{сух.}}, t_{\text{вл.}})$)

$$d = 5{,}4857\text{e}^{0{,}056t_{\text{вл.}}} - (t_{\text{сух.}} - t_{\text{вл.}})(1{,}97 \cdot 10^{-3}(t_{\text{вл.}} - 10) + 0{,}039) - 1{,}962, \quad (8)$$

гдеd – влагосодержание воздуха, г/кг; $t_{\text{сух.}}, t_{\text{вл.}}$ – соответственнотемпературы сухого и влажного термометров, ºС; $\text{e} = 2{,}7182818$.

Зависимость влажности воздуха от величины влагосодержания и температуры сухого термометра выражается формулой (9) $\left(\varphi = f(d, t_{\text{сух.}})\right)$

$$\varphi = \frac{d}{5{,}4857\text{e}^{0{,}056t_{\text{сух.}}} - 1{,}962}, \quad (9)$$

где φ – влажность воздуха, %; d – его влагосодержание, г/кг; $t_{\text{сух.}}$ – температура сухого термометра, ºС; $\text{e} = 2{,}7182818$.

Если известны значения температуры сухого термометра и влагосодержания, то энтальпия может быть найдена из выражения (10) $\left(i = f(t_{\text{сух.}}, d)\right)$

$$i = 0{,}2247\left[225 - 4{,}5(36 - t_{\text{сух.}}) + 11{,}259d\right] - 14, \quad (10)$$

где i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; $t_{\text{сух.}}$ – температура сухого термометра(или, что тоже самое,температура воздуха), ºС; d – влагосодержание воздуха, г/кг.

Для быстрой оценки («прикидки») энтальпии воздуха при данных значениях его температуры и влагосодержания можно воспользоваться более простой формулой (11)

$$i = 1{,}01(t + 2{,}5d) \quad (11)$$

или, если принять $1{,}01 \approx 1$, то

$$i = t + 2{,}5d, \quad (12)$$

где i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; t – температура воздуха, ºС; d – влагосодержание воздуха, г/кг.

Зная два параметра воздуха, можно получить его остальные данные, необходимые для расчета системы кондиционирования.

Приложение

Приведем вычисления параметров воздуха по разработанным формулам, для чего воспользуемся примерами, приведенными в работе [17], в которой вычисления в примерах проводились с использованием графоаналитического метода расчета параметров воздуха.

Пример 1. Воздух в количестве 24000 кг/ч с начальными параметрами $t_1 = 34$˚С, φ_1 = 35 %, i_1 = 65 кДж/кг, d_1 =11,7 г/кг поступает в камеру для охлаждения. Определить параметры воздуха после камеры.

Посредством графоаналитического расчета в указанной работе были получены следующие значения: температура воздуха после камеры $t_2 = 16{,}75$℃ (индексы 1 и 2 относятся соответственно к параметрам воздуха до и после камеры), i_2 = 43 кДж/кг, φ_2 = 82 % иd_2 =10,3 г/кг.

Определим эти параметры по соответствующим формулам без применения *I-d* диаграммы и оценим относительную погрешность δ расчета по ним.

Поскольку температура влажного термометра нам не известна, то из формулы (8) методом дихотомии получим $t_{вл.1}$ = 22 ˚С. Тогда из выражения (9) $\varphi_1 = 34$ %. ($\delta = 3$ %), а из формулы (10) i_1= 64,3 кДж/кг ($\delta = 1$ %). Соотношения (11), (12) соответственно дают 63,9 ($\delta = 1{,}7$ %) и 63,3 ($\delta = 2{,}6$ %) кДж/кг.

Аналогично после камеры: из формулы (8) $t_{вл.2}$ = 15,2 ˚С; из выражения (9) $\varphi_2 = 85$ %. ($\delta = 3{,}6$ %), а из формулы (10) i_2= 43 кДж/кг ($\delta = 0$ %), а соотношения (11), (12), соответственно, дают 42,9 ($\delta = 0{,}2$ %) и 42,5 ($\delta = 1{,}2$ %) кДж/кг.

Пример 2. Воздух в количестве 48000 кг/ч с начальными параметрами $t_1 = 28{,}5$ ℃, φ_1 = 40 %, i_1 = 54 кДж/кг, d_1 =9,8 г/кг поступает в камеру для охлаждения. Определить параметры воздуха после камеры.

В указанной работе посредством аналитического расчета в примере сначала были получены значенияi_2 = 33,75 кДж/кг и $t_2 = 12{,}54$ ℃, после чего с помощью *I-d* диаграммы были найдены остальные параметры: d_2 =8,3 г/кг и φ_2 = 90 %.

Методом дихотомии определим из формулы (8) $t_{вл.1}$ = 18,9 ˚С, после чего по формулам (9) и (10) получаем: $\varphi_1 = 39$ %. ($\delta = 2{,}5$ %) и i_1= 53,9 кДж/кг ($\delta = 0{,}2$ %), при этом выражения (11), (12), соответственно, дают 53,5 ($\delta = 0{,}9$ %) и 53 ($\delta = 1{,}8$ %) кДж/кг.

После камеры эти параметры будут иметь следующие значения. Из уравнения (10) методом дихотомии находим $d_2 = 8{,}26$ г/кг ($\delta = 0{,}5$ %). Подставляя это значение в формулу (9), будем иметь $\varphi_2 = 90{,}7$ %. ($\delta = 0{,}8$ %). Соотношения (11), (12) соответственно дают 33,5 ($\delta = 0{,}7$ %) и 33,2 ($\delta = 1{,}6$ %) кДж/кг.

Пример 3. В камере осушается и охлаждается 10800 кг/ч воздуха с начальными параметрами $t_1 = 30$℃, φ_1 = 50 %, i_1 = 64,5 кДж/кг, d_1 =13,5 г/кг, p_1 = 2,1 кПа. Определить параметры воздуха после камеры.

Посредством аналитического расчета в примере указанной работы были получены сначала значения p_2 = 1,346 кПа и $t_2 = 23{,}3$ ℃, после чего с помощью *I-d* диаграммы были найдены остальные параметры:i_2 = 45 кДж/кг d_2 =8,5 г/кг и φ_2 = 47 %.

Из формулы (8) методом дихотомии находим $t_{вл.1}$ = 22 ˚С. Тогда по формуле (9) $\varphi_1 = 49$ %. ($\delta = 2$ %), а из уравнения (10) энтальпия будет равна i_1= 64,6 кДж/кг ($\delta = 0{,}6$ %).

После камеры параметры воздуха получаем следующие. Из формулы (8) методом дихотомии находим $t_{вл.2}$ = 16 ˚С. Из формулы (9) $\varphi_2 = 46{,}4$ %. ($\delta = 1{,}3$ %), а из уравнения (10) энтальпия равна i_2= 45,2 кДж/кг ($\delta = 0{,}4$ %). Соотношения (11), (12) соответственно дают 45 ($\delta = 0$ %) и 44,6 ($\delta = 0{,}9$ %) кДж/кг.

Пример 4.В помещении без теплоизбытков при начальных параметрах наружного воздуха t_1 = 30 ˚С, φ_1 = 50 %, i_1 = 64,5 кДж/кг, d_1 = 13,5 г/кг прямоточная система кондиционирования воздуха должна поддерживать параметры:t_2 = 20 ˚С, φ_2 = 40 %, i_2 = 35 кДж/кг, d_2 = 5,8 г/кг.

Из формулы (8) получаем $t_{вл.1}$ = 22 ˚С. Из уравнения (9) $\varphi_1 = 49$ %. ($\delta = 2$ %), а из выражения (10) i_1= 64,6 кДж/кг ($\delta = 0{,}6$ %).

Находим параметры воздуха после камеры. Из формулы (8) методом дихотомии находим $t_{вл.2}$ = 12,3 ˚С. Из формулы (9) $\varphi_2 = 39{,}4$ %. ($\delta = 1{,}5$ %), а из уравнения (10)

энтальпия равна i_2= 35,1 кДж/кг ($\delta = 0{,}1$ %). Соотношения (11), (12) соответственно дают 34,8 ($\delta = 0{,}4$ %) и 34,5 ($\delta = 1{,}4$ %) кДж/кг.

Пример 5. При температуре наружного воздуха t_1 = 28,5 ˚С, влажности φ_1 = 40 %, энтальпии i_1 = 53,6 кДж/кг влагосодержании d_1 = 9,8 г/кг прямоточная система кондиционирования воздуха должна поддерживать параметры:t_2 = 12 ˚С, φ_2 = 90 %, i_2 = 32,25 кДж/кг, d_2 = 8 г/кг.

Из формулы (8) методом дихотомии находим $t_{вл.1}$ = 18,85 ˚С. Далее из уравнения (9) находим $\varphi_1 = 39$ %. ($\delta = 2{,}5$ %). Затем из формулы (10) получаем i_1= 53,7 кДж/кг ($\delta = 0{,}2$ %).

Аналогично для параметров воздуха после обработки его системой кондиционирования получаем: $t_{вл.2}$ = 11,15 ˚С, $\varphi_2 = 90$ %. ($\delta = 0$ %), i_2= 32,37 кДж/кг ($\delta = 0{,}4$ %).

Таким образом, во всех приведенных примерах мы получаем в результатах вполне приемлемые для инженерных расчетов погрешности.

Заключение

1. Получено выражение для силы импульса, действующей в магнитоэлектрической колебательной системе «баланс-спираль», применяемой для обдува влажного термометра психрометра.

2. Предложенные уравнения (8) – (10) позволяют аналитическим путем с достаточной для практических расчетов точностью определять параметры воздуха, не пользуясь при этом *i-d*диаграммой. Это дает возможность также моделировать работу систем кондиционирования воздуха в зависимости от изменяющихся параметров окружающей среды, и выполнять прогнозирование их работы.

3. Появляется возможность автоматизации расчетов на компьютере.

4. Формулы (11), (12) позволяют оценить энтальпию воздуха путем несложных вычислений в уме или на калькуляторе, который не имеет функции возведения числа в дробную степень.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кокорин О.Я. Современные системы кондиционирования воздуха. Москва: Физматлит, 2003. 350 с.

2. Назарова М.В., Романов В.Ю. Разработка алгоритма автоматизированного расчета систем кондиционирования и доувлажнения воздуха на текстильных предприятиях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 12. С.36-38.

3. Буренин В.В., Воробьев Д.К. Системы кондиционирования воздуха и воздушные кондиционеры для производственных помещений // Холодильная техника. 2017. № 7. С. 30-36.

4. Стоякин Г. М., Костин А. В., Науменко С. Н. Разработка системы кондиционирования с индивидуальным регулированием температуры и расхода воздуха в купе пассажирского вагона // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 1. С. 30 – 34.

5. Perovnik J., Bajsić I. A Review of air humidity measurement methods // Journal of Mechanical Engineering. 1993. Vol. 39, No. 3-4. P .99-114.

6. Vorobets, G.I., Zhuk, O.P., Ilarionov, O.E. *et al.* Measurement of air humidity inside electronic devices // Instruments and Experimental Techniques. 2001. Vol. 44. P. 266-268.

7. Rübner K, Balköse D., Robens E. Methods of humidity determination. Part I: Hygrometry // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2008. Vol. 94, No. 3. P. 669–673.

8. Li B., Du C., Tan M. *et al.* A modified method of evaluating the impact of air humidity on human acceptable air temperatures in hot-humid environments // Energy and Buildings. 2018. Vol. 158. P. 393-405.

9. Guo M., Li Y., Gao J. Relative humidity measurement of air in low-temperature ranges using low-frequency acoustic waves and correlation signal processing techniques // Sensors. 2022. Vol. 22. Paper Number 6238. DOI:10.3390/s22166238.

10. Изельт П., Арндт У., Вильке М. Увлажнение воздуха. Системы и применение. Москва: Техносфера, Евроклимат, 2007. 106 с.

11. Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2009. 500 с.

12. Филоненко Г. К., Лебедев П. Д. Сушильные установки. Москва: Госэнергоиздат, 1952. 263 с.

13. Алешкевич В. А. Молекулярная физика. Москва: Физматлит, 2016. 308 с.

14. Бухарова Г. Д. Молекулярная физика и термодинамика. Методика преподавания. Москва: Юрайт, 2017. 221 с.

15. Способ работы психрометра. Пат. Рос. Федерация: МПК G01N 25/62 / Оленев Е.А.; патентообладатель Оленев Е.А. № 2024104647/28; заявлено 22.02.2024; опубликовано 27.08.2024, Бюл. № 24.

16. Шарыгин Л.Н., Сорокин А.А. Автоколебательные системы в средствах измерения и контроля. Владимир: Изд-во «Атлас», 2016. 205 с.

17. Баркалов Б.В, Карпис Е.Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. Москва: Стройиздат, 1982. 312 с.

REFERENCES

1. Kokorin O.Ya. *Sovremennye sistemy kondicionirovaniya vozduha* [Modern air conditioning systems]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 350 p.

2. Nazarova M.V., Romanov V.Yu. *Razrabotka algoritma avtomatizirovannogo rascheta sistem kondicionirovaniya i douvlazhneniya vozduha na tekstil'nyh predpriyatiyah*[Development of an algorithm for automated calculation of air conditioning and dewatering systems at textile enterprises].*Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 2014. No. 12,pp.36-38.

3. Burenin V.V., Vorob'ev D.K. *Sistemy kondicionirovaniya vozduha i vozdushnye kondicionery dlya proizvodstvennyh pomeshchenij*[Air conditioning systems and air conditioners for industrial premises].*Holodil'naya tekhnika*. 2017. No. 7,pp. 30-36.

4. Stoyakin G.M., Kostin A.V., Naumenko S.N. Razrabotka sistemy kondicionirovaniya s individual'nym regulirovaniem temperatury i raskhoda vozduha v kupe passazhirskogo vagona [Development of an air conditioning system with individual control of temperature and air flow in a compartment of a passenger car].*Vestnik VNIIZHT*. 2021. Vol. 80,No. 1,pp. 30–34.

5. Perovnik J., Bajsić I. A Review of air humidity measurement methods. Journal of Mechanical Engineering. 1993. Vol. 39, No. 3-4, pp.99-114.

6. Vorobets, G.I., Zhuk, O.P., Ilarionov, O.E. *et al.* Measurement of air humidity inside electronic devices.Instruments and Experimental Techniques. 2001. Vol. 44, pp. 266-268.

7. Rübner K, Balköse D., Robens E. Methods of humidity determination. Part I: Hygrometry. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2008. Vol. 94, No. 3, pp. 669–673.

8. Li B., Du C., Tan M. *et al.* A modified method of evaluating the impact of air humidity on human acceptable air temperatures in hot-humid environments, Energy and Buildings. 2018. Vol. 158, pp. 393-405.

9. Guo M., Li Y., Gao J. Relative humidity measurement of air in low-temperature ranges using low-frequency acoustic waves and correlation signal processing techniques. Sensors. 2022. Vol. 22. Paper Number 6238. DOI:10.3390/s22166238.

10. Izel't P., Arndt U., Vil'ke M. *Uvlazhnenie vozduha. Sistemy i primenenie* [Humidification of the air. Systems and applications]. Moscow: Tekhnosfera, Evroklimat, 2007. 106 p.

11. Barmasov A. V., Holmogorov V. E. *Kurs obshchej fiziki dlya prirodopol'zovatelej. Molekulyarnaya fizika i termodinamika* [Course of general physics for nature users. Molecular physics and thermodynamics]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009. 500 p.

12. Filonenko G. K., Lebedev P. D. *Sushil'nye ustanovki* [Drying plants]. Moscow: Gosenergoizdat, 1952. 263 p.

13. Aleshkevich V. A. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. Moscow: Fizmatlit, 2016. 308 p.

14. Buharova G. D. *Molekulyarnaya fizika i termodinamika. Metodika prepodavaniya* [Molecular physics and thermodynamics. Teaching methods]. Moscow: Yurait, 2017. 221 p.

15. *Sposob raboty psihrometra* [The way the psychrometer works]. Pat. Ros. Federaciya: MPK G01N 25/62 / Olenev E.A.; patentoobladatel' Olenev E.A. № 2024104647/28; zayavleno 22.02.2024; opublikovano 27.08.2024, Byul. № 24.

16. Sharygin L.N., Sorokin A.A. *Avtokolebatel'nye sistemy v sredstvah izmereniya i kontrolya* [Self-oscillating systems in measuring and control devices]. Vladimir: Izd-vo «Atlas», 2016. 205 p.

17. Barkalov B.V, Karpis E.E. *Kondicionirovanie vozduha v promyshlennyh, obshchestvennyh i zhilyh zdaniyah* [Air conditioning in industrial, public and residential buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1982. 312 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Оленев Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail:olenevea@mail.ru)	*Olenev Evgeny Alexandrovich*–Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, (600000, Russia, Vladimir, 87 Gorky Street, e-mail:olenevea@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 15.11.2024, принята к публикации 30.11.2024.
The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 22.11.2024.