

Измерение комплексных параметров микроклимата в помещениях и рабочих зонах приборами серии ТКА

Юрий БАРБАР,
к. т. н.
Максим ГОЛИКОВ
Сергей СОЛОВЬЕВ

В десятом номере журнала за 2008 год [1] приведены сведения о приборах, которые выпускает научно-техническое предприятие «ТКА». Они предназначены для измерения световых и микроклиматических параметров в производственных помещениях и на рабочих местах. Комплексная оценка качества микроклимата связана с измерениями теплового излучения, температуры и влажности воздуха и расчетом индекса тепловой нагрузки исследуемой среды. Представляется целесообразным рассмотреть более подробно вопросы приборной реализации измерений таких параметров микроклимата.

Измерение температуры и относительной влажности воздуха производится термогигрометрами, оснащенными, как правило, твердотельными датчиками измерения соответствующих физических величин. Для этой цели нами используются датчики относительной влажности серии ННН-4000-004 производства корпорации Honeywell [2, 3]. Конструктивно такие датчики выпускаются в плоских корпусах SIP, кристалл датчика совмещает в себе чувствительный емкостной элемент из термоактивного полимера с микросхемой усиления сигнала. Многослойная структура чувствительного элемента обеспечивает высокие рабочие характеристики приборов в сложных условиях эксплуатации при наличии высокой влажности, загрязненности, следов масла и химических реактивов.

Датчики ННН-4000-004 выдают линейный выходной аналоговый сигнал и непосредственно подключаются к любому устройству, способному обрабатывать сигнал по напряжению (АЦП, микроконтроллер). Малый ток потребления, порядка 0,2 мА, обеспечивает их энергоэкономичное использование в автономных термогигрометрах серии ТКА, имеющих батарейное питание.

Датчики ННН-4000-004 поставляются с индивидуальной калибровкой, в паспорте на каждый датчик изготовителем указаны напряжение смещения нуля U_{zero} , крутизна линейного преобразования S . Типовая погрешность таких датчиков составляет $\pm 3,5\%$ относительной влажности. Датчики этой серии взаимозаменяемы, с погрешностью $\pm(5-8)\%$, если не проводится перекалибровка измерительного тракта прибора.

Уравнение для линейной выходной шкалы прибора (в процентах относительной влажности RH) имеет вид:

$$RH(\%) = (U_{out} - U_{zero})/S, \quad (1)$$

где RH(%) — показания прибора по каналу измерения влажности; U_{out} — напряжение на выходе датчика влажности; U_{zero} , S — паспортные параметры датчика.

Рекомендуемый рабочий температурный диапазон при измерении влажности датчиками этой серии составляет от 0 до 85 °С.

Датчик откалиброван изготовителем при температуре 25 °С, уравнение температурной компенсации (поправки) имеет вид:

$$RH_{true} = RH(\%)/(1,0546 - 0,0216 \times t), \quad (2)$$

где RH_{true} — истинное значение относительной влажности при температуре воздуха t ; RH(%) — показание прибора без учета температурной поправки.

При отклонении измеряемой температуры воздуха на ± 10 °С от температуры калибровки датчика (25 °С) температурная поправка, согласно уравнению (2), меняется в пределах от 1,1% RH до -1,1% RH, при уровне измеряемой влажности RH = 50%, и в пределах от +2,2% RH до -2,2% RH, при уровне измеряемой влажности RH = 100%.

Измерение температуры воздуха производится с помощью малогабаритных тонкопленочных платиновых датчиков производства корпорации Heraeus Sensor Technology, имеющих градуировку Pt 1000, [1, с. 254]. Эти датчики имеют высокую стабильность, точ-

ность (порядка $\pm(0,2-0,3)$ °С), долгий срок службы и полную взаимозаменяемость, без необходимости подстройки измерительного тракта прибора.

Применение датчиков ННН-4000-004 и Heraeus в термогигрометрах производства НТП «ТКА» обеспечивает требуемые диапазоны и точности измерений относительной влажности (от 10 до 98% RH, с погрешностью не хуже $\pm 5\%$ RH) и температуры воздуха (от 0 до 50 °С, с погрешностью не хуже $\pm 0,5$ °С).

В линейке датчиков серии ННН-4000 есть датчик типа ННН-4602-С, представляющий собой интегрированное устройство измерения температуры и влажности воздуха, однако этот датчик имеет, в силу своей конструкции, большую инерционность установления показаний, достигающую сотен секунд, тогда как инерционность датчика 4000-004 составляет порядка 15 с. Такой датчик целесообразно применять при конструировании термогигрометров повышенной точности, используемых в решении метрологических задач, когда доминирует точность измерений, а быстрдействие процесса измерения отодвигается на второй план. Следует отметить, что датчики серии ННН-4000 являются по своей сути аналоговыми устройствами.

Значительный интерес вызывает новое поколение цифровых датчиков влажности со встроенным каналом измерения температуры серии SHT, производства корпорации Sensirion AG, которые, несмотря на их относительно высокую цену, находят все более широкое применение в приборостроении [1, с. 251]. Такой датчик включает в себя емкостной измеритель влажности и измеритель температуры, которые объединены в одном корпусе с 14-битным

АЦП и схемой последовательного интерфейса I²C [4]. Высокая степень интеграции обеспечивает стабильное качество сигнала, малое время отклика, порядка 3 с, и нечувствительность к внешним воздействиям ЭМП. По оценке изготовителя, используемая инновационная технология CMOSens позволила достичь небывалой долговременной стабильности измерений (0,5% в год) при максимальном удобстве эксплуатации.

Каждый такой датчик индивидуально калибруется при изготовлении, коэффициенты калибровки записываются в его память. Двухпроводной последовательный I²C интерфейс и внутренняя схема регулировки напряжения обеспечивают удобство и надежность интеграции такого датчика в состав термогигрометра.

Наиболее точный датчик в серии SHT обеспечивает измерение относительной влажности с погрешностью ±1,8% RH в диапазоне от 10% RH до 90% RH и с погрешностью ±3,5% RH в расширенном диапазоне влажности от 0% RH до 100% RH. При этом погрешность измерения температуры в диапазоне от 0 до 50 °C не хуже ±0,3 °C. Заявленный диапазон рабочих температур — от -40 до +123 °C. Конструктивно такой датчик представляет собой корпус размером 3,7×6,4 мм, соединенный с 4-выводной линейкой контактов с шагом 1,27 мм. Общие габариты датчика — 5,1×19,5 мм.

Линейный выходной сигнал влажности такого датчика вычисляется по соотношению, приведенному в [4]:

$$RH_{linear} = C_1 + C_2 \times SO_{RH} + C_3 \times SO_{RH}^2 \quad (3)$$

где SO_{RH} — число, пропорциональное влажности на выходе (I²C)-интерфейса датчика; C_1, C_2, C_3 — константы, значения которых зависят от разрядности обработки сигнала.

Уравнение температурной компенсации (поправки) имеет вид:

$$\Delta RH(t) = (t-25) \times (t_1 + t_2 \times SO_{RH}), \quad (4)$$

где $\Delta RH(t)$ — поправка по температуре при отклонении измеренной температуры t от температуры калибровки датчика, равной 25 °C; t_1, t_2 — константы, значения которых зависят от разрядности обработки сигнала.

Значение истинной (фактической) влажности RH_{true} при температуре t определяется соотношением:

$$RH_{true} = (t-25) \times (t_1 + t_2 \times SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (5)$$

При отклонении измеренной прибором температуры t на ±10 °C от температуры калибровки датчика поправка температурной компенсации, согласно уравнению (4), меняется в пределах от +1,3% RH до -1,3% RH при уровне измеряемой влажности 50% RH и в пределах от +2,8% RH до -2,8% RH при уровне измеряемой влажности 100% RH.

Линейный выходной сигнал по каналу измерения температуры t вычисляется по формуле:

$$t = d_1 + d_2 \times SO_t, \quad (6)$$

где SO_t — число, пропорциональное температуре на выходе (I²C)-интерфейса датчика; d_1, d_2 — константы, значения которых зависят от величины напряжения питания и разрядности обработки сигнала.

Датчики серии SHT установлены в цифровых термогигрометрах ТКА-ПКМ-23 и ТКА-ПКМ-24.

Для комплексной оценки воздействия на организм человека всех факторов микроклимата также используется параметр тепловой нагрузки среды: ТНС (WBGT)-индекс. Такой подход регламентирован на территории РФ Санитарными нормами и правилами [5], гармонизированным ГОСТ Р ИСО-7243-2007 [6] и все более широко применяется на практике, что ставит задачу создания соответствующего приборного парка.

Согласно нормативным документам [5, 6], в помещениях, при отсутствии солнечной радиации, ТНС-индекс определяется как:

$$ТНС = WBGT = 0,7 \times t_{вл} + 0,3 \times t_{ш}, \quad (7)$$

где $t_{вл}$ — температура влажного (смоченного) шарика термометра, °C; $t_{ш}$ — температура, измеренная внутри черного шара, °C.

Обычно температуру влажного шарика термометра определяют с помощью либо аспирационного психрометра Ассмана, либо электронного аспирационного психрометра. В обоих случаях необходимо обеспечить как процесс смачивания водой термометра влажного канала, так и его принудительную аспирацию (обдув потоком воздуха, поступающего с определенной скоростью).

Такой способ определения температуры влажного термометра в практических измерениях представляется нам неэффективным в силу сложности и неудобства, связанных с необходимостью тщательного ухода за каналом влажного термометра. Наши наблюдения показывают, что при практических измерениях комплекс требований по правильной эксплуатации влажного термометра зачастую не соблюдается, что приводит к значительным погрешностям в определении температуры влажного термометра $t_{вл}$ и, как следствие, к ошибкам при оценке ТНС-индекса. Подробно эти вопросы изложены нами в [7].

Другой возможный способ определения температуры $t_{вл}$ заключается в использовании психрометрических таблиц, при условии, что в процессе измерений определены значения температуры воздуха t и его относительной влажности RH. Этот способ также удобен по понятным причинам.

На основе математического анализа психрометрических таблиц нами было предложено структурно простое и достаточно точ-

ное выражение, параметрическим образом связывающее искомую величину $t_{вл}$ в функции от измеренных величин t и RH [7]:

$$t_{вл} = (A \times RH + B) \times t + C \times RH - D \times (0,01 \times RH - 0,5)^2 - E, \quad (8)$$

где A, B, C, D, E — константы.

Предложенное уравнение (8) позволяет вычислять значения $t_{вл}$ с погрешностью $\delta t_{вл}$ не более ±0,5 °C в диапазоне температуры воздуха t от 0 до 50 °C и его относительной влажности RH от 30 до 100%. При уровнях RH ниже 30% погрешность $\delta t_{вл}$ меняется в пределах от -0,8 до +2,0 °C, в зависимости от температуры воздуха t [7].

Для измерения температуры $t_{ш}$ используется черный шар нашего производства диаметром 90 мм со степенью черноты $\epsilon = 0,95$, который устанавливается на зонд с датчиком температуры таким образом, чтобы датчик температуры находился в центре шара.

Возможность вычисления температуры $t_{вл}$ по формуле (8) позволила нам создать прибор модели ТКА-ПКМ(24)“ТНС”, который обеспечивает измерение и отображение в режиме реального времени температуры и влажности воздуха, температуры внутри черного шара, температур влажного термометра и точки росы, ТНС и WBGT-индексов. Внешний вид этого серийно выпускаемого прибора приведен на рис. 14 в [1].

Необходимо отметить, что при наличии солнечной радиации индекс тепловой нагрузки среды WBGTs, согласно нормативному документу [8], вычисляется по уравнению:

$$WBGTs = 0,7 \times t_{вл} + 0,2 \times t_{ш} + 0,1 \times t, \quad (9)$$

где t — температура воздуха.

При оценке состояния тепловой среды необходимо также знать величину средней температуры излучения (средней радиационной температуры) $t_{рад}$ и интенсивности теплового облучения (плотности теплового излучения) W .

Средняя температура излучения $t_{рад}$, с учетом параметров черного шара производства НТП «ТКА», вычисляется, согласно [8], как:

$$t_{рад} = [(t_{ш} + 273,2)^4 + 0,48 \times 10^8 \times (t_{ш} - t)^{5/4}]^{1/4} - 273,2 \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (10)$$

Выражение (10) справедливо при соблюдении условия естественной конвекции, когда скорость потока окружающего воздуха не превышает 1 м/с.

При форсированной конвекции, когда скорость воздуха, обдувающего шар, превышает 1 м/с, выражение для вычисления средней температуры излучения имеет вид:

$$t_{рад, v} = [(t_{ш} + 273,2)^4 + 3,03 \times 10^8 \times V^{0,6} \times (t_{ш} - t)^{1/4}]^{1/4} - 273,2 \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (11)$$

где V — скорость окружающего воздуха, м/с.

Таблица. Перечень измеряемых и вычисляемых параметров микроклимата прибором ТКА-ПКМ(24)“ТНС”

Обозначение	Параметр	Диапазон	Погрешность
Изменяемые параметры			
t	Температура воздуха	0...+50 °С	±0,5 °С
t _ш	Температура внутри черного шара	0...+100 °С	±0,5 °С в диапазоне от 0 до 50 °С, ±1,0 °С в диапазоне свыше 51 °С
RH	Относительная влажность воздуха	10–100% RH	±5% RH
Вычисляемые параметры			
THC	Индекс тепловой нагрузки среды	0...+70 °С	±0,8 °С
WBGTS	Индекс тепловой нагрузки среды при наличии солнечной радиации	0...+75 °С	±0,8 °С
t _{вл}	Температура влажного термометра	–10...+50 °С	±0,5 °С
t _{тр}	Температура точки росы	–40...+50 °С	±1,0 °С
t _{рад}	Средняя температура излучения	0...+160 °С	±1,5 °С
W	Плотность теплового излучения	0–1700 Вт/м ²	±5% от значения W

Плотность теплового излучения, с учетом соотношений, приведенных в [8], можно определить как:

$$W = 5,67 \times 10^{-8} \times [(t_{\text{рад}} + 273,2)^4 - (t + 273,2)^4], \text{ Вт/м}^2. \quad (12)$$

Следует отметить, что применение черного шарового термометра для нахождения значений средней температуры и плотности потока теплового излучения корректно лишь в случае стационарной (неизменной или мало меняющейся во времени) тепловой обстановки, поскольку время измерения температуры внутри черного шара может достигать десятков минут в силу инерционности установления показаний t_ш.

Для реализации возможности измерения тепловых параметров t_{рад} и W, расширения функциональных возможностей, большего удобства в эксплуатации предприятием НТП «ТКА» подготовлена к выпуску модернизированная модель прибора ТКА-ПКМ(24)“ТНС”, внешний вид которой приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид новой версии прибора ТКА-ПКМ(24)“ТНС”

Начало серийного выпуска — I квартал 2009 года.

Основные отличия новой версии прибора от базовой модели:

1. Зонд для измерения температуры черного шара имеет большую длину, что улучшает тепловую развязку между корпусом прибора и шаром.
2. Расширен диапазон измерения температуры внутри черного шара — от 0 до 100 °С.
3. Установлен графический дисплей взамен символьного, что увеличило информационную емкость прибора.

4. Введена функция установки времени экспозиции при измерении тепловых индексов и параметров, в пределах от 5 до 60 мин, с дискретностью 5 мин.

5. Введена функция подачи звукового сигнала по окончании процесса измерения тепловых параметров с запоминанием результатов на дисплее прибора.

6. Введены дополнительные функции обработки информации: запоминание, усреднение, выделение максимальных и минимальных значений, графическое отображение измеряемых и вычисляемых величин. В таблице приведен перечень измеряемых и вычисляемых параметров микроклимата, реализованных в новой версии прибора ТКА-ПКМ(24)“ТНС”.

На рис. 2 представлены фотографии дисплея (экрана) прибора, отображающие различные режимы работы, которые задаются с помощью трех функциональных клавиш (кнопок), расположенных на лицевой панели прибора (рис. 3).

Приводим подробное описание рис. 2:

- (А) — экран настроек, переход к нему осуществляется после нажатия первой функциональной клавиши (символ ключа в левом нижнем углу экрана) во время отоб-

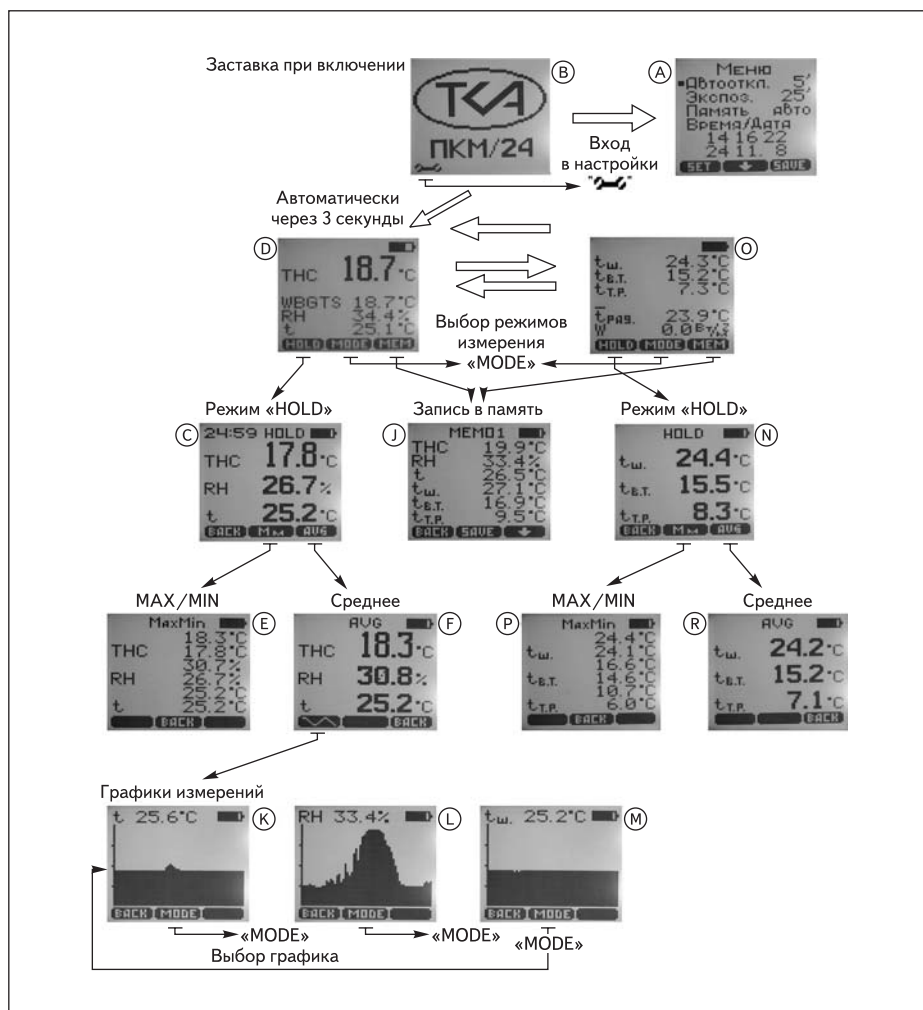


Рис. 2. Фотографии дисплея прибора ТКА-ПКМ(24)“ТНС”

ражения стартового экрана (В). В меню настроек можно задать: время срабатывания отключения прибора (5 мин или Выкл.), время экспозиции (от 5 до 60 мин с шагом 5 мин), включить/выключить режим «дата логгера» (запись измеренных параметров с временными метками в память прибора с интервалом 5 мин, для последующего сброса данных в ПК и построения необходимых графиков, реализовано 3000 ячеек, позволяющих проводить непрерывную запись данных на протяжении более двух суток). В режиме логгера при работе прибора в левом верхнем углу экрана отображается метка «лог».

- (В) — стартовый экран, появляется после включения прибора, задержка 3 с на отображение номера модели прибора, логотипа фирмы и возможности войти в режим настроек.
- (С) — экран (HOLD) отображает мгновенные значения ТНС-индекса, относительную влажность, температуру воздуха, время экспозиции, по завершении которой будут показаны выдержанные параметры, при отсутствии необходимости в выдержанных параметрах возможен возврат в предшествующий экран (клавиша BACK) или переход в экран (Е) или (F), (минимумы/максимумы или средние значения).
- (D) — первый экран после стартового, отображает ТНС и WBGT-индексы, относительную влажность, температуру воздуха.
- (E) — экран (Max/Min) отображает максимальные и минимальные значения ТНС-индекса, относительной влажности, температуры воздуха.
- (F) — экран (AVG) отображает средние значения ТНС-индекса, относительной влажности, температуры воздуха.
- (J) — экран (MEMO) отображает память прибора, переход в него возможен из экранов (D) и (O).

В памяти прибора девять ручных ячеек для данных, сохранение в них информации осуществляется пользователем нажатием второй функциональной клавиши (SAVE),



Рис. 3. Расположение функциональных клавиш на лицевой панели прибора

переход к следующей ячейке осуществляется нажатием третьей функциональной клавиши (стрелка вниз). Временные метки к сохраненным данным в этом режиме не ставятся.

Одна ячейка может хранить ТНС-индекс, данные об относительной влажности, температуре воздуха, температуре черного шара, температуре влажного термометра и температуре точки росы.

- (K), (L), (M) — экраны графиков, отображающие соответственно температуру воздуха, относительную влажность, температуру черного шара.
- (N) — экран (HOLD) второго режима работы прибора, отображает мгновенные значения температуры шара, температуры влажного термометра, температуры точки росы.
- (O) — экран второго режима работы прибора, отображает температуру шара, температуру влажного термометра, температуру точки росы, среднюю температуру излучения, плотность потока излучения.
- (P) — экран (Max/Min) второго режима работы прибора, отображает максимальные и минимальные значения температуры шара, температуры влажного термометра, температуры точки росы.
- (R) — экран (AVG) второго режима работы прибора, отображает средние значения температуры шара, температуры влажного термометра, температуры точки росы.

Чтобы включить режим «дата логгера» (записи информации), необходимо в настройках прибора задействовать одноименный пункт меню, установив его в положение «Вкл», после чего по выходу из режима настроек (клавиша SAVE) прибор начнет запись измеренных параметров в память (появится символ «лог») до момента его выключения (пункт меню «автовывключение» должен быть выключен) или до полного заполнения памяти. Далее, при последующем включении прибора и подключении его к ПК, можно считать с прибора сохраненные данные либо повторить процедуру включения режима «логгера» для новых измерений.

Прибор поставляется в комплекте с черным шаром, настольным штативом, щелочной батареей повышенной емкости, паспортом, руководством по эксплуатации, сумкой и транспортной коробкой.

По отдельному заказу поставляется комплект подключения прибора к ПК.

Межповерочный интервал работы прибора — 1 год.

Литература

1. Томский К., Кузьмин В., Барбар Ю. Российская измерительная техника. Приборная серия ТКА // Компоненты и технологии. 2008. № 10.
2. Платан. Электронные компоненты. Каталог 2008.
3. HIH-4000 SERIES. Humidity Sensors. Honeywell International Inc. USA March 2005.
4. SHT1x/SHT7x Humidity and Temperature Sensor. Senserion AG. Switzerland. v2 04, May 2005.
5. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Сан. П. и Н. 2.2.4.548-96.
6. Расчет тепловой нагрузки на работающего человека, основанный на показателе WBGT (температура влажного шарика психрометра). ГОСТ Р ИСО-7243-2007.
7. Барбар Ю. А., Голиков М. Н. Определение температуры влажного термометра и ТНС-индекса // Индустрия. 2004. № 3 (37).
8. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. ISO 7726: 1998 (E) Geneva, Switzerland, 1998.