

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.40 – (931/96 + 680)

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ИСКРОБЕЗОПАСНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

М. Ханал¹, Р. МакФи¹, Б. Бэйли^{2,3,4}, П. Брисбан⁴, Б. Кафадж⁴

¹Исследовательская программа по добыче угля “CSIRO”, E-mail: Manoj.Khanal@csiro.au,
I Технологическая площадка, г. Брисбен, Австралия

²Компания “Anglo American”, ул. Шарлотте, 201, г. Брисбен, Австралия,

³Преторийский университет, Департамент горной промышленности, г. Претория, ЮАР

⁴Исследовательская программа угольной ассоциации Австралии,
ул. Игл, 167, г. Брисбен, Австралия

Выполнена оценка показаний искробезопасных датчиков измерения температуры и относительной влажности, работающих в режиме реального времени при различных внешних условиях их использования. Дана сравнительная оценка полученных результатов с показаниями цифровых эталонных датчиков и прашевого психрометра при изменении скорости потока воздуха, его влажности и запыленности.

Угольная шахта, температура, влажность, режим реального времени

DOI: 10.15372/FTPRPI20190120

Точное измерение температуры сухого термометра T_{ct} и относительной влажности на различных опасных участках подземных шахт — важная задача в горной промышленности. Значительное изменение T_{ct} и относительной влажности может привести к усталости рабочих, аварии в шахте, отказу оборудования и снижению производительности. Недостаточная информация и неопределенность данных по температуре под землей являются причиной осложнения контроля за такими факторами, как самовозгорание, пожары, проблемы с вентиляцией, негативно влияющими на безопасность в шахте и эффективность производства. Эти факторы требуют внедрения в подземные угольные шахты автоматизированной искробезопасной системы мониторинга температуры в режиме реального времени, в частности для измерения относительной влажности и определения температуры влажного термометра T_{vt} .

В угольных шахтах Австралии температура T_{vt} измеряется вручную с помощью психрометра или прашевого гигрометра на различных участках выработки через определенный интервал времени. Использование системы мониторинга температуры в режиме реального време-

ни может обеспечить надежную, наглядную и постоянную запись температуры на различных горных выработках. На основе полученных температур можно определить различные психрометрические показатели: относительную влажность, точку росы, удельную энтальпию, коэффициент увлажнения воздуха и удельный объем.

Цель мониторинга различных параметров в режиме реального времени в подземных выработках — обеспечение безопасной рабочей среды, которая способствует эффективной работе. На рынке присутствуют несколько приборов, измеряющих температуру в режиме реального времени и требующих минимального вмешательства человека в сравнении с традиционными приборами, такими как прашевой гигрометр. Важность мониторинга параметров в горном деле подчеркнута в [1–4]. В отличие от исследований мониторинга других показателей подземных угольных шахт, изучением мониторинга T_{ct} и относительной влажности в режиме реального времени пренебрегали из-за недоступности искробезопасных систем измерения.

Системы мониторинга температуры широко распространены в производстве и перерабатывающей промышленности, например при обработке порошков, производстве бумаги, стали, лекарственных препаратов, а также в системах сушки. Эти системы хорошо исследованы и используются для точного измерения влажности и подтверждения качества выполняемых операций в сложных пространствах с изменяющимися параметрами. Датчики, работающие в режиме реального времени, могут быть проводными и беспроводными. Главное их преимущество заключается в том, что они позволяют своевременно предпринять необходимые действия или автоматически настроить режим операции в зависимости от обстоятельств [5]. Актуальные вопросы, связанные с недостатком использования измерительных приборов температуры T_{ct} и относительной влажности в угольных шахтах Австралии, изучены в [6].

В настоящей работе представлен обзор возможностей современных систем мониторинга температуры, работающих в режиме реального времени, которые могут применяться в угольных шахтах Квинсленда. Исследовано, насколько точное измерение температуры может быть достигнуто для контроля тепловых смежных факторов, которые встречаются в различных опасных участках угольной шахты. Проведено сравнение точности систем измерения температуры в режиме реального времени с применяемыми на сегодняшний день измерительными приборами и методами, работающем не в режиме реального времени.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Искробезопасные датчики температуры и относительной влажности, работающие в режиме реального времени, выбраны для сравнения их показателей с показателями цифровых калиброванных датчиков (эталонных). Для измерения различных скоростей потока воздуха использовался термоанемометр, для генерации различных уровней влажности в небольшом экспериментальном помещении — комнатный увлажнитель воздуха, а для создания потоков воздуха различных скоростей — электрический вентилятор средних размеров. Эталонные датчики соответствуют требованиям системы менеджмента качества ISO 9001, исследовательская лаборатория — требованиям ISO/IEC 17025. Эталонные датчики проверялись перед экспериментом в лаборатории производителя и показали значения относительной влажности 33.7 и 83.6 % при заданных 33.86 и 85.0 % соответственно.

Эксперимент проводился в комнате размерами $2.8 \times 1.8 \times 2.3$ с различными значениями относительной влажности, температуры, скорости воздушного потока и концентрации пыли. Цель эксперимента — исследование влияния внешних факторов на измерение температуры и относительной влажности в режиме реального времени. Исследуемые измерительные датчики удаленно отслеживались, а полученные показания записывались на компьютер. Передача данных осу-

ществлялась через переходник RS485-USB, а протокол “Modbus” позволял обеспечить управление программируемыми датчиками во время проведения эксперимента. На рис. 1 представлено экспериментальное оборудование, размещенное в лаборатории пылевых сред Квинслендской государственной испытательной и исследовательской станции безопасности шахт.

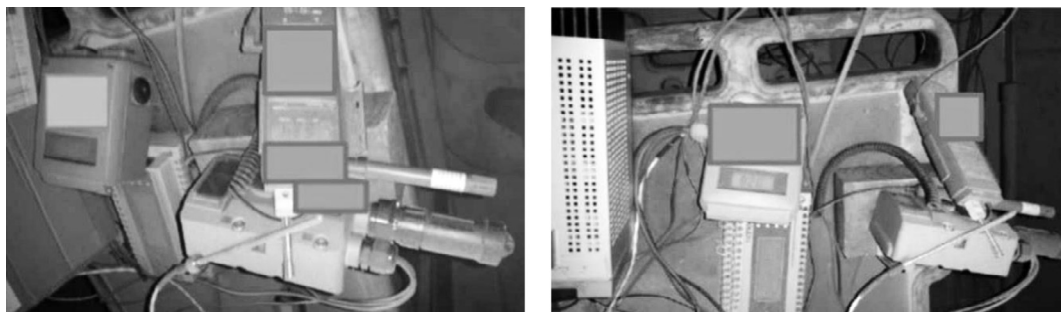


Рис. 1. Экспериментальная установка в условиях пыльной среды в лаборатории “Simtar”

Проведено большое количество опытов в широком диапазоне смоделированных внешних факторов. При всех комбинациях внешних факторов показания температуры и относительной влажности фиксировались измерительными приборами, а полученные результаты записывались вручную. Опыты проводились нескольких дней, а показания снимались с интервалом 2 мин. На рис. 2 показаны непрерывные показания искробезопасных и эталонных датчиков температуры и относительной влажности, работающих в режиме реального времени, снятых в течение 2 дней.

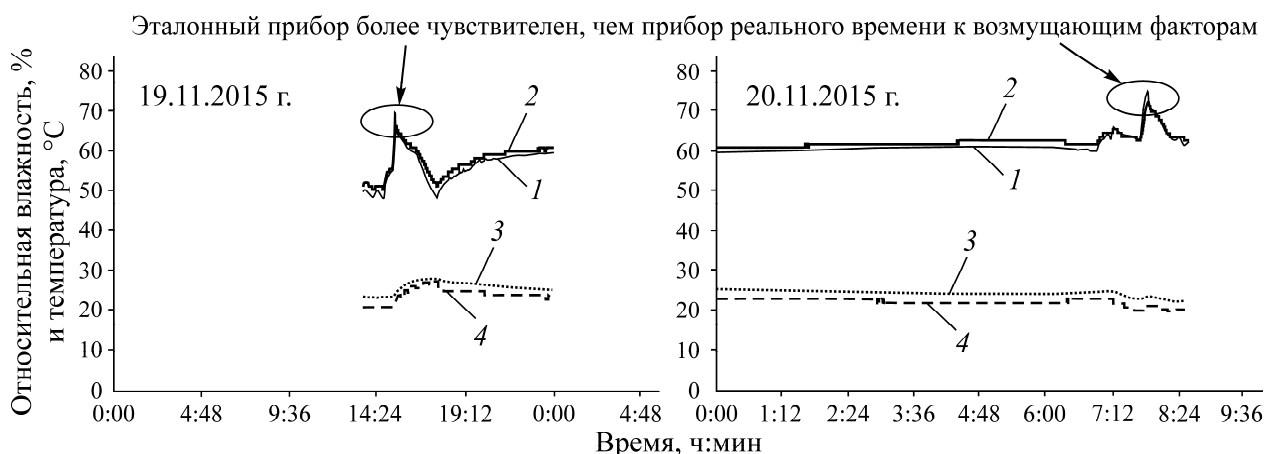


Рис. 2. Непрерывные показания искробезопасных и эталонных датчиков температуры и относительной влажности, работающих в режиме реального времени: 1, 3 — эталонный датчик измерения относительной влажности и температуры соответственно; 2, 4 — прибор измерения относительной влажности в режиме реального времени и температуры соответственно

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Показания температуры T_{rt} и относительной влажности RH_{rt} в реальном времени близки к эталонным показаниям R при измерении температуры и относительной влажности. Датчик температуры R более чувствителен, чем датчик температуры T_{rt} . Следовательно, с появлением неравномерности отклик температуры R будет быстрее с пошаговым повышением относительной влажности, как показано в выделенной области (рис. 2). Показания T_{rt} и RH_{rt} обычно немного выше показаний относительной влажности и показаний T_{ct} при сравнении с эталонными приборами.

На рис. 3 показаны графики точечных показаний температуры и относительной влажности, измеренных двумя приборами при скорости потока воздуха около 0 м/с и концентрации пыли 0 г/м³ через некоторое число интервалов времени.

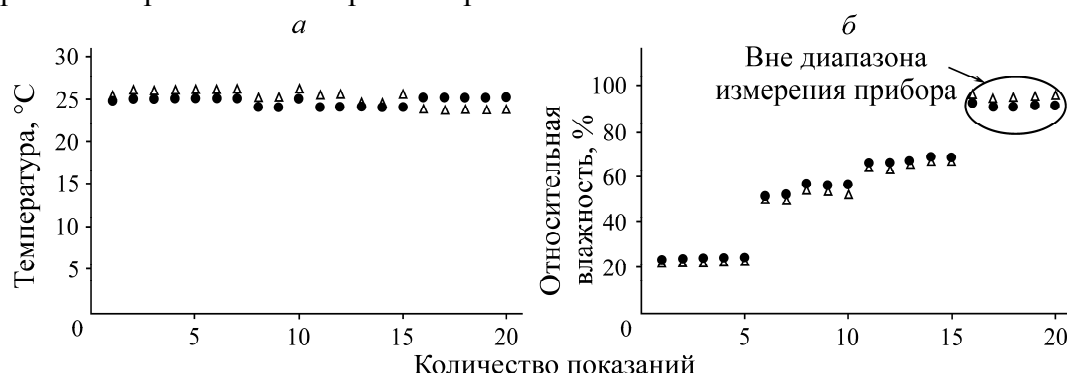


Рис. 3. Сравнение показаний эталонных датчиков (Δ) и датчиков реального времени ($\bullet$) при скорости потока воздуха 0 м/с и концентрации пыли 0 г/м³: *a* — температура; *б* — относительная влажность

В таблице представлены результаты сравнения показаний искробезопасных датчиков с эталонными при различных скоростях потока воздуха и концентрации пыли 0 г/м³.

Результаты сравнения показаний различных датчиков

Номер опыта	Скорость потока воздуха, м/с	Отклонение показаний датчика RH_{rt} относительно эталона, %	Отклонение показаний датчика T_{rt} относительно эталона, %	Относительная влажность, %
1	0	> 6	< 6	При влажности > 90 % результатами можно пренебречь
2	3.5	> 6	– 5 до 3	От 20 до 90
3	6.7	> 4	< 5	От 40 до 60
4	7.2	> 5	< 5	От 40 до 60
5	8.3	> 3	< 3	От 40 до 60

На рис. 4 показано сравнение показаний температуры и относительной влажности, снятых с датчиков при концентрации пыли ~25 г/м³. Так как пылевая камера не оснащена датчиками измерения концентрации пыли, такая концентрация оценивалась по количеству распространения пыли в камере известного размера. Видно, что показания температуры T_{rt} и относительной влажности, снятые с датчиков, близки друг к другу: показания T_{rt} на 3 % ниже эталонных; показания RH_{rt} на 2 % выше показаний, снятых с эталонных датчиков.

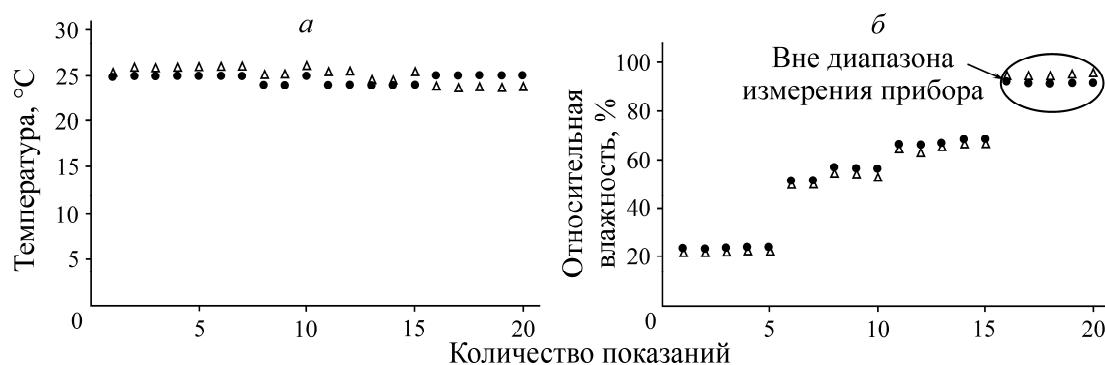


Рис. 4. Сравнение показаний эталонных датчиков (Δ) и датчиков реального времени ($\bullet$) при скорости потока воздуха 0 м/с и концентрации пыли 0 г/м³: *a* — температура; *б* — относительная влажность

СРАВНЕНИЕ С РУЧНЫМ ПРАЩЕВЫМ ПСИХРОМЕТРОМ

На рис. 5 сравниваются показания трех измерительных приборов (пращевого психрометра типа “Бахарач”; искробезопасных датчиков, работающих в режиме реального времени; эталонных датчиков) при скорости потока воздуха 0 м/с и концентрации пыли около 0 г/м³. Показания сняты в один день, в разных временных интервалах, при неконтролируемых внешних факторах.

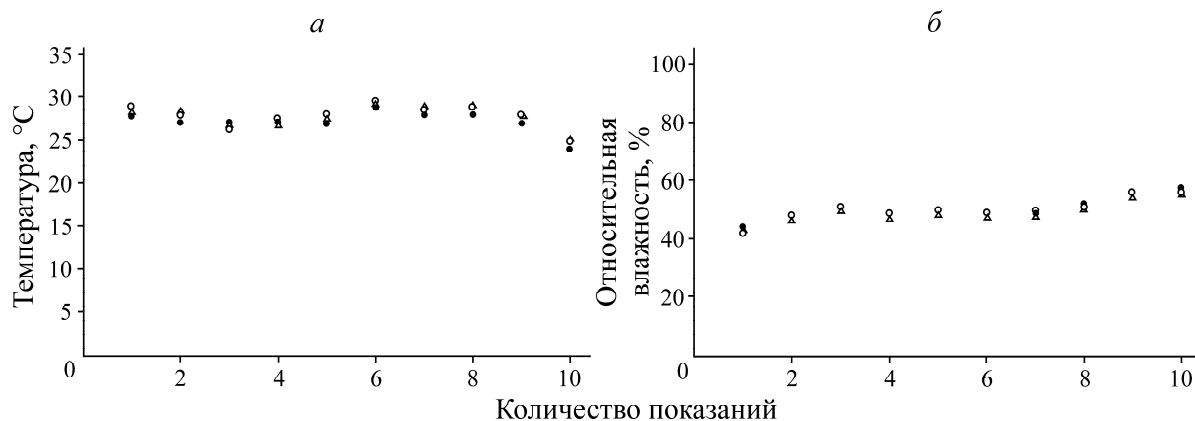


Рис. 5. Показания измерений температуры (а) и относительной влажности (б) с помощью эталонного датчика (Δ), датчика реального режима времени ($\bullet$) и прашевого психрометра ($\circ$)

Из рис. 5 следует, что показания T_{rt} варьируют от -4 до 2% , показания эталонного датчика — от -2 до 2% при сравнении с показаниями прашевого психрометра, снятыми при одинаковых внешних условиях; показания T_{rt} варьируют от -2 до 2% , показания эталонного датчика — от -3 до 1% при сравнении с показаниями прашевого психрометра, снятыми при одинаковых внешних условиях.

После обработки полученных данных можно сделать следующие замечания. Показания с датчиков реального времени и эталонных датчиков отображались на экране, в то время как показания T_{ct} и T_{vt} с прашевого психрометра записывались вручную, поэтому может присутствовать погрешность снятия показаний. При расчете относительной влажности по показаниям температур T_{ct} и T_{vt} , снятых с психрометра, также присутствует погрешность. Во время работы с психрометром прилагались большие усилия, чтобы минимизировать погрешность измерения. Низкое разрешение шкалы и ограничение делений влияют на интерпретацию показаний психрометра. Пращевой психрометр располагался на расстоянии вытянутой руки, другие приборы — вдалеке, следовательно, присутствие человеческого тела могло оказать незначительное влияние на показания психрометра. Заявленная производителем точность датчика в режиме реального времени относительной влажности $\pm 5\%$, точность эталонного датчика — $\pm 2.5\%$. Точность прашевого психрометра — $\pm 5\%$. Точность датчика в режиме реального времени температуры — 1% , точность эталонного датчика — $\pm 0.7^\circ\text{C}$.

СОВОКУПНОЕ СРАВНЕНИЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Сравнение полученных в результате эксперимента при смоделированных условиях показаний искробезопасных и эталонных приборов, работающих в режиме реального времени, позволяет сделать следующие выводы:

- в сравнении с эталонными датчиками, искробезопасный прибор измерения относительной влажности устойчиво показывает небольшое превышение показаний до 6 %, искробезопасный прибор измерения температуры дает вариацию показаний от –6 до 3 %.
- по сравнению с показаниями прачевого психрометра при неконтролируемых внешних факторах, показания относительной влажности в режиме реального времени различаются на $\pm 2\%$, а показания эталонного датчика на –3 %.
- показания температуры T_{ct} в режиме реального времени варьируют от –4 до 2 %, показания эталонного датчика — от –2 до 2 % по сравнению с показаниями T_{ct} психрометра при идентичных внешних условиях.

Поскольку выводы основываются на ограниченном объеме выборки показателей по температуре и относительной влажности, то больший объем выборки при различных внешних режимах обеспечит повышение достоверности показателей рассматриваемых искробезопасных датчиков. В соответствии с характеристиками искробезопасного датчика относительной влажности, работающего в режиме реального времени, диапазон чувствительности находится в пределах 10–90 % с точностью $\pm 5\%$. Данный рабочий диапазон не покрывает весь спектр значений относительной влажности, встречающийся в угольных шахтах. На некоторых участках шахты относительная влажность достигает 100 %. Участки с высокой влажностью — это участки, где находится большинство рабочих в шахте.

ВЫВОДЫ

Показано, что искробезопасные датчики, работающие в режиме реального времени, демонстрируют вариацию показаний температуры сухого термометра в пределах от –6 до 3 % и превышение относительной влажности до 6 % по сравнению с показаниями эталонных датчиков с неподтвержденной искробезопасностью. Для повышения достоверности оценки погрешностей искробезопасных датчиков при создании автоматизированных систем мониторинга на угольных шахтах Австралии необходимо проведение их испытаний в подземных условиях и в более широком диапазоне изменений внешних условий. Отмечена целесообразность разработки нового искробезопасного датчика, способного измерять 100 % относительную влажность.

Авторы выражают благодарность Австралийской исследовательской программе угольной промышленности за финансовую поддержку, 18 респондентам (сотрудникам отдела шахтной вентиляции, академикам и консультантам) за ответы на необходимые вопросы и мистеру Г. Кеннеди из Станции безопасности шахт за возможность провести измерения в условиях запыленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belle B. Underground mine ventilation air methane (VAM) monitoring — an Australian journey towards achieving accuracy, Proc. of 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 2014. — P. 230–242.
2. Haustein K., Widzyk-Capehart E., Wang P., Kirkwood D., and Prout R. The nexsys real-time risk management and decision support system: redefining the future of mine safety, Proc. of 11th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011. — P. 205–213.

3. **Brady D.** The role of gas monitoring in the prevention and treatment of mine fires, Proc. of 2008 Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008. — P. 202–208.
4. **Gillies A. D. S., Wu H. W., Mayes T. I., and Halim A.** The challenge of measuring airflow through mine regulators to allow real time ventilation monitoring, Proc. of Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, Townsville, 2002. — P. 145–150.
5. **Crowley K., Frisby J., Murphy S., Roantree M., and Diamond D.** Web-based real-time temperature monitoring of shellfish catches using a wireless sensor network, Sens. Actuators A, 2005, Vol. 122, No. 2. — P. 222–230.
6. **Khanal M., McPhee R., Belle B., Brisbane P., and Kathage B.** Study of real-time dry bulb and relative humidity sensors in underground coal mines, Int. J. Thermophys., 2016, Vol. 37, No. 12, Paper 117.

Поступила в редакцию 6/II 2017

После доработки 18/IV 2018

Принята к публикации 29/I 2019