

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 620.179

С. В. Болотов, Н. В. Герасименко

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ С ЦИФРОВЫМИ ДАТЧИКАМИ ВЛАЖНОСТИ

UDC 620.179

S. V. Bolotov, N. V. Herasimenko

SYSTEM FOR REMOTE MONITORING OF FOAMED POLYURETHANE INSULATION OF HEAT SUPPLY PIPELINES BY MEANS OF DIGITAL HUMIDITY SENSORS

Аннотация

Предложена новая система с цифровыми датчиками влажности вместо существующей системы контроля состояния пенополиуретановой теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей бесканальной прокладки, основанной на измерении сопротивления изоляционного слоя между стальной трубой и медным проводником. На основе проведенных исследований разработаны методика контроля степени увлажнения теплоизоляции и программно-аппаратные средства для её реализации.

Ключевые слова:

датчик влажности, система контроля, пенополиуретановая изоляция, увлажнение, трубопроводы тепловых сетей.

Abstract

The current system for monitoring foamed polyurethane thermal insulation of heat supply pipelines, which is based on the measurement of electrical resistance between the metal pipe and the copper wire, can be replaced by a new system that uses digital humidity sensors. The technique of monitoring the humidity level of thermal insulation, as well as the computer appliance for its implementation, has been developed based on the conducted research.

Key words:

humidity sensor, non-destructive testing system, foamed polyurethane insulation, humidification, pipelines of heat supply network.

В настоящее время для прокладки тепловых сетей получили распространение трубы с пенополиуретановой (ППУ) изоляцией в полиэтиленовой оболочке. Применение для бесканальной прокладки теплотрасс этих труб должно обеспечивать значительное увеличение рабочего ресурса тепловых

сетей до 30...50 лет, снижение повреждаемости в 10 раз, резкое сокращение тепловых потерь до 2...3 %, что обусловит соответствующие экономические выгоды.

При этом необходимо учитывать дополнительные требования фирм-производителей труб с ППУ-изоляцией к

транспортировке, хранению и монтажу труб, а также обеспечивать высокий уровень выполнения проектных работ.

Практический опыт показывает, что уже через 3...5 лет эксплуатации труб теплосетей с ППУ-изоляцией имеют место аварийные ситуации, связанные с истечением теплоносителя. Причинами сквозного повреждения металла труб являются некачественное выполнение сварных швов в местах стыковки труб; локальная язвенная коррозия внутренних поверхностей из-за дефектов металла и нарушений водно-химического режима; нарушение герметичности муфтовых соединений и концевых заглушек изоляции с попаданием коррозионно-агрессивной влаги на наружную поверхность труб; попадание влаги в ППУ-изоляцию при производстве монтажных работ; слабая адгезия и отслоение пенополиуретана от поверхности труб с образованием пустот, где может скапливаться влага, что приводит к существенным энергетическим потерям [1].

Наружная поверхность труб в ППУ может подвергаться коррозионному воздействию, в частности, из-за попадания влаги в тепловую изоляцию при некачественном монтаже трубопроводов – негерметичные муфтовые соединения труб в местах расположения сварных швов, отсутствие концевых заглушек изоляции на торцах труб или дефекты их конструкции и т. п. Кроме того, нарушения целостности полиэтиленовой оболочки возможны при проведении земляных, строительных и других работ сторонними организациями в районах прохождения теплотрасс [2].

В Беларуси, к сожалению, отсутствуют четкие статистические данные по анализу причин поломок на трубопроводах. Однако статистический анализ неисправностей, возникающих на эксплуатируемых ПИ-трубопроводах в России, показывает, что около 60 % всех неисправностей связано с дефектами на стыковых соединениях, в част-

ности с разгерметизацией ПИ-трубопроводов. В Германии аналогичный показатель составляет около 54 % [3].

Для отслеживания начала увлажнения изоляции и определения мест повреждений полиэтиленовой оболочки на трубопроводах с ППУ-изоляцией служит система оперативного дистанционного контроля (СОДК). Степень увлажнения определяется детектором повреждений по сопротивлению теплоизоляционного слоя $R_{из}$ между стальной трубой и проводником СОДК. $R_{из}$ должно составлять не менее 300 МОм/м, пороговое значение срабатывания детектора – 1 кОм [4]. Снижение $R_{из}$ обусловлено не только проникновением влаги, но и качеством ППУ, точностью монтажа СОДК. По сопротивлению изоляции невозможно установить характер повреждения (стальная труба или гидрозащитная оболочка).

Для определения места увлажнения теплоизоляции используют локализатор повреждений – импульсный рефлектометр. Данный прибор предназначен для работы в кабельных линиях и при работе в неоднородной ППУ-изоляции недостаточно эффективен. На точность локализации также оказывает влияние соблюдение расстояния между стальной трубой и сигнальным проводником, квалификация персонала. Кроме того, локализатор определяет место намокания изоляции при снижении её сопротивления до 5 кОм, что позволяет выявить участки только сильного увлажнения.

СОДК позволяет обнаружить такие дефекты, как намокание слоя изоляции, контакт сигнального проводника со стальной трубой, обрыв сигнального проводника, нарушение целостности изоляции, и определить их расположение.

СОДК не позволяет указать причину намокания изоляции, т. е. определить, произошла утечка изнутри (повреждена стальная труба) либо протечка снаружи (повреждена оболочка). К серьезным недостаткам СОДК следует отнести низкую помехозащищенность и

погрешность при определении места аварии.

В связи с этими недостатками существующей методики измерений можно сделать вывод, что такая СОДК пригодна лишь при монтаже и начальной стадии эксплуатации теплотрасс с ППУ-изоляцией. Это же подтверждается и специалистами других организаций, занимающихся монтажом и эксплуатацией трубопроводов с ППУ-изоляцией [5, 6].

Таким образом, разработка способа контроля, предполагающего непосредственный контроль влажности ППУ-изоляции, позволяющего определить точное место и характер повреждения, является актуальной задачей.

Для количественной оценки степени увлажнения изоляции предлагается использовать цифровые датчики влажности, устанавливаемые в слое ППУ-изоляции по всей длине трубопровода [7]. Каждый датчик имеет свой индивидуальный код и привязан к плану теплотрассы.

Основу цифрового датчика влажности (ЦДВ) представляет серийный датчик влажности и температуры SHT21 (Швейцария) с цифровым выходом. В одном корпусе интегрированы датчики температуры и влажности с точностью измерения $\pm 0,3$ и ± 2 % соответственно. Датчики работают от напряжения 1,5...3,6 В, что позволяет использовать их в беспроводных или малопотребляющих устройствах для обеспечения энергоэффективности и увеличения срока службы аккумуляторов. Высокое разрешение 12 бит для датчика влажности и 14 бит для датчика температуры позволяет реагировать на самые незначительные отклонения влажности или температуры. Цифровой выход 1^2C упрощает подключение к микроконтроллеру. Датчики имеют небольшие габариты (SMD-исполнение) и выдерживают рабочие температуры до плюс 125 °C [8].

Для определения условий эксплуатации цифровых датчиков влажности

проведено исследование распределения температур в процессе реакции компонентов ППУ. Экспериментальные исследования были выполнены на базе предприятия ЗАО «Завод полимерных труб», г. Могилев. Проведенные исследования показали, что максимальная температура реакции ППУ-компонентов может достигать 120 °C и зависит от объема ППУ-состава, конфигурации изделия, расстояния от места ввода компонентов, внешних температурных условий [9].

Эффективность использования системы контроля с датчиками влажности существенно зависит от скорости увлажнения изоляционного материала. Как известно, скорость увлажнения пористого изоляционного материала уменьшается при уменьшении размеров пор, особенно хорошо противостоят увлажнению ячеистые материалы с закрытыми порами; к материалам такого типа относится пенополиуретан.

Для экспериментального исследования скорости увлажнения ППУ были использованы датчики влажности модели SHT21, размещенные внутри образца ППУ (120 × 100 × 30 мм с плотностью от 60 до 80 кг/м³ по ГОСТ 30732-2006) на расстоянии 20 мм друг от друга [10]. Увлажнение образцов осуществлялось с одной из сторон, исследования проводились при температурах воды, равных 60 и 90 °C. Проведенные исследования показали, что для ППУ плотностью $\rho = 60$ кг/м³ при температуре теплоносителя $T_H = 60$ °C (рис. 1) скорость увлажнения составляет 4 мм/мин. Повышение температуры теплоносителя до $T_H = 90$ °C увеличивает скорость увлажнения до 9 мм/мин, что в первую очередь обусловлено интенсивным парообразованием. Повышение плотности ППУ до 80 кг/м³ приводит к снижению скорости увлажнения. Так, при температуре теплоносителя $T_H = 60$ °C скорость увлажнения уменьшается до 3 мм/мин.

График изменения скорости увлажнения изоляционного слоя от плотности

ППУ-состава при различных температурах теплоносителя представлен на рис. 2.

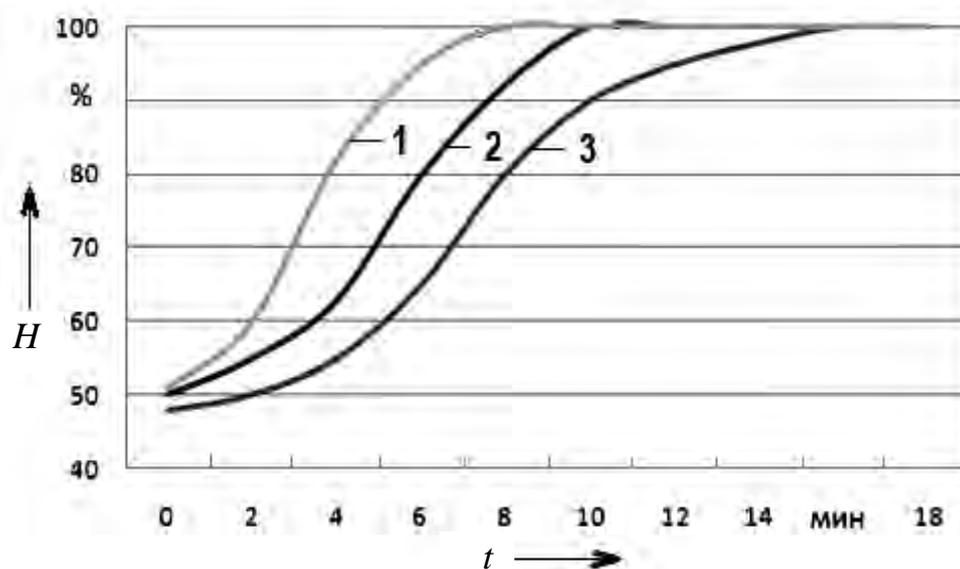


Рис. 1. График изменения влажности при $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$, $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 – датчик на расстоянии 20 мм; 2 – датчик на расстоянии 40 мм; 3 – датчик на расстоянии 60 мм

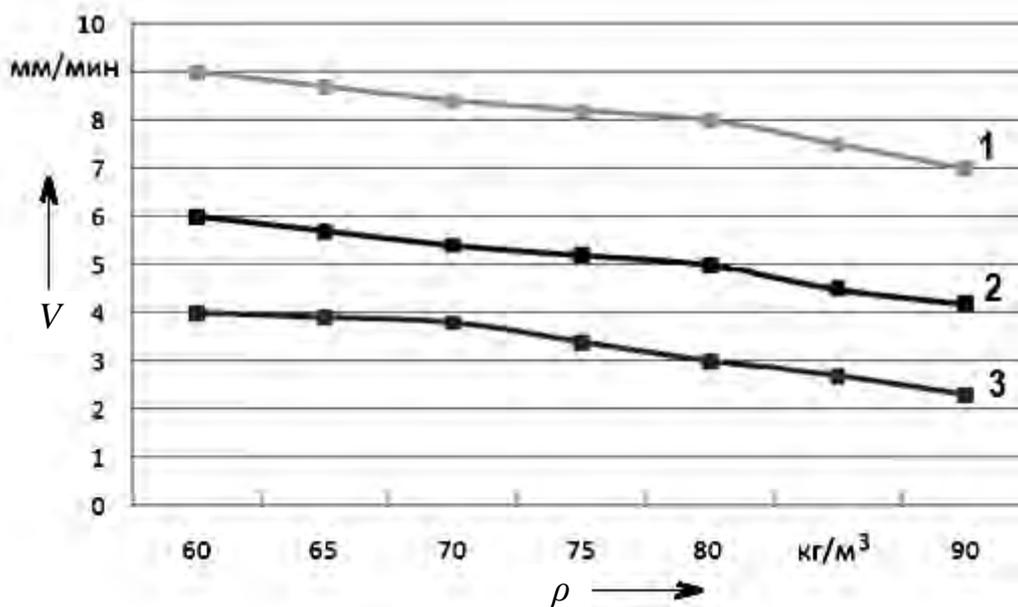


Рис. 2. Изменение скорости увлажнения изоляционного слоя в зависимости от плотности ППУ: 1 – $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Полученные экспериментальные зависимости носят линейный характер. Данные использованы для оптимизации системы контроля с ЦДВ, определения

требуемого количества датчиков и их расположения в изоляционном слое.

Разработанная система оперативного дистанционного контроля состоя-

ния изоляции конструктивно состоит из:

- цифровых датчиков влажности (ЦДВ);
- блока управления (БУ), осуществляющего опрос датчиков;
- проводников системы контроля (ПСК), соединяющих ЦДВ и БУ;
- персонального компьютера, на который по GSM-связи поступает информация о состоянии каждого датчика.

ЦДВ представляет собой устройство, смонтированное на одной печатной плате и заключённое в термовлагодостойкий корпус. ЦДВ располагают в слое ППУ-изоляции труб, фасонных изделий на этапе производства и монтажа стыков. Основой ЦДВ является датчик влажности и температуры в SMD-исполнении, имеющий непосредственный контакт

чувствительной области с ППУ-изоляцией трубопровода. Считывание информации с датчика влажности и температуры осуществляется контроллером, выполненным на микроконтроллере серии AVR по протоколу I²C.

Электрическая принципиальная схема цифрового датчика влажности представлена на рис. 3. Микроконтроллер ATtiny25 (микросхема DD1) обеспечивает первичную обработку сигналов, поступающих с чувствительного элемента датчика SHT21 (микросхема B1), а также взаимодействие с другими звеньями системы контроля. Соединение звеньев системы контроля осуществляется при помощи стандартных разъемов типа RJ11 (X1.1, X1.2).

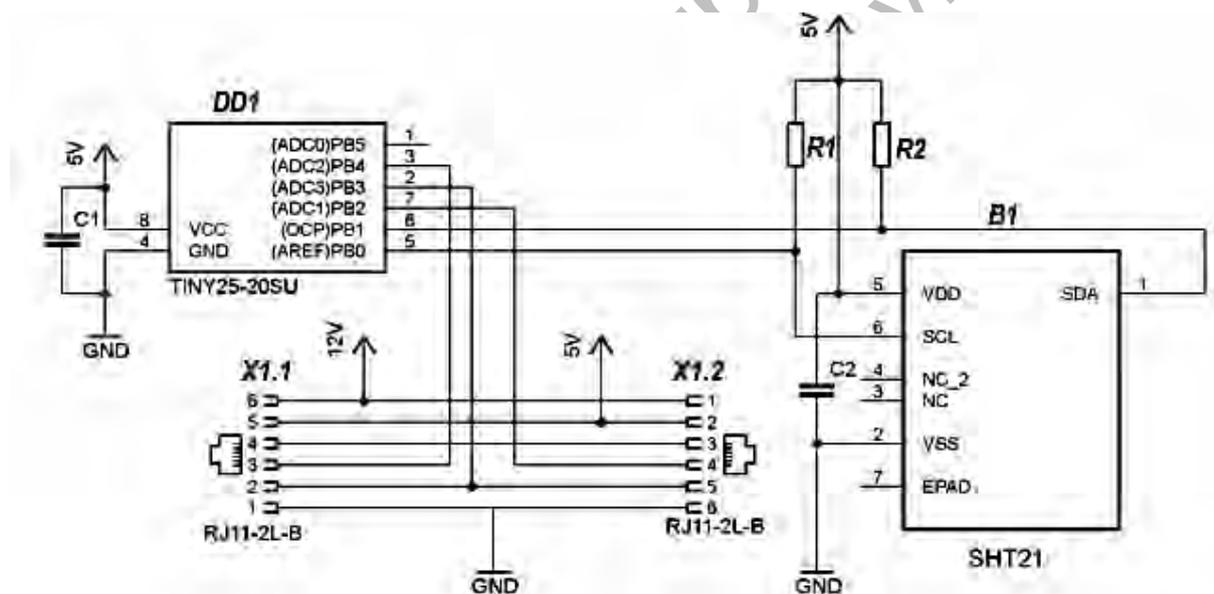


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема цифрового датчика влажности (ЦДВ)

На рис. 4 представлена структурная схема блока управления (БУ). Блок управления является центральным звеном всей системы контроля и осуществляет сбор, обработку и передачу оперативной информации о состоянии изоляции трубопровода.

Центральный процессор (ЦП) в составе БУ выполнен на базе микро-

контроллера и управляет всеми элементами системы. Питание процессора, модуля беспроводной связи (GSM), а также датчиков (ЦДВ) осуществляется от аккумуляторной батареи (АКБ), подключенной через стабилизатор напряжения (СН). Уровень заряда АКБ контролируется микросхемой со встроенным индикатором заряда (ИЗ). Модуль

GSM обеспечивает информирование операторов о состоянии трубопроводов путём отправки SMS-сообщений на ЭВМ, установленную в диспетчерском

пункте. БУ может подключаться к ЭВМ посредством USB.

Технические характеристики блока управления представлены в табл. 1.

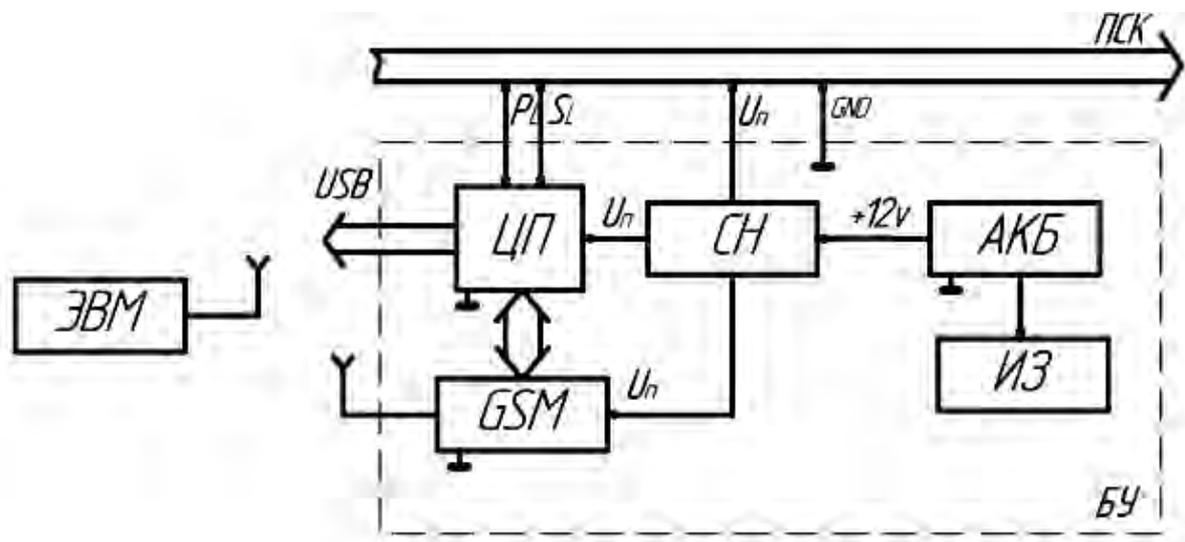


Рис. 4. Структура блока управления

Табл. 1. Технические характеристики блока управления

Параметры	Значение
Тип микроконтроллера	АТmega2560
Напряжение питания, В	10...14
Максимальный потребляемый ток, мА	140
Потребляемый ток, мА	50
Температура эксплуатации, °С	-20...+40
Тип энергонезависимой памяти	Flash
Объем энергонезависимой памяти	256
Частотный диапазон GSM-канала передачи, МГц	880...915
Габаритные размеры корпуса блока управления, мм	125 × 85 × 142
Масса блока управления, кг	1,8

Проводники системы контроля (ПСК) служат для питания ЦДВ и передачи данных с ЦДВ на блок управления. ПСК содержит четыре жилы: двухпроводную шину питания +5 В (U_n, GND), шину синхронизации контроллеров S_L и шину передачи данных P_L. ПСК реализо-

ваны в термостойком исполнении для исключения повреждения изоляции при заливке компонентов ППУ.

На рис. 5 представлен внешний вид системы оперативного дистанционного контроля.

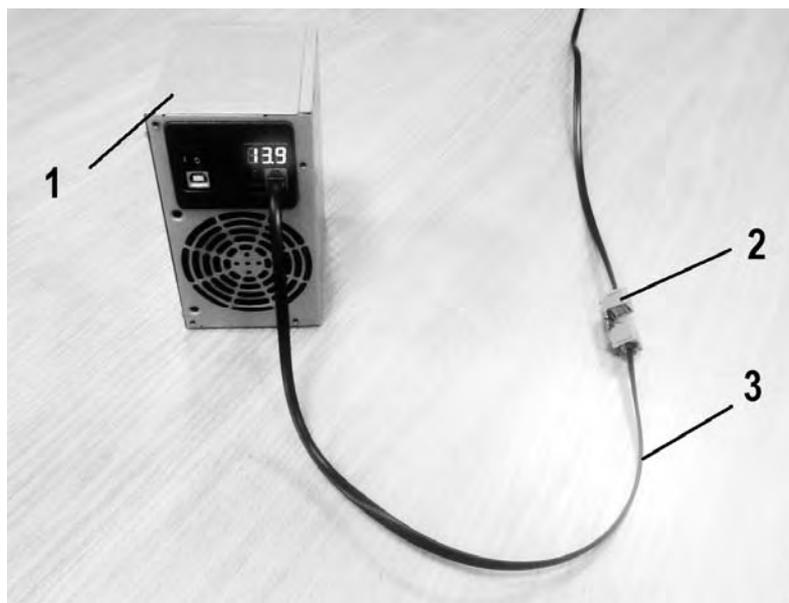


Рис. 5. Внешний вид системы оперативного дистанционного контроля состояния ППУ изоляции: 1 – блок управления (БУ); 2 – цифровой датчик влажности (ЦДВ); 3 – проводник системы контроля (ПСК)

Алгоритм работы системы контроля следующий. После инициализации датчиков осуществляется посылка команды измерения, далее каждый ЦДВ последовательно, через шину синхронизации S_L , выставляет на параллельную шину данных P_L текущие значения относительной влажности и температуры. Приём и хранение данных с ЦДВ осуществляется устройством ARDUINO MEGA 2560 блока управления. После 50 измерений производится контроль заряда аккумуляторной батареи (УЗБ), формирование текста SMS-сообщения с данными о номере блока управления (№ БУ), значении относительной влажности (Д №_в) и температуры (Д №_т).

Разработано программное обеспечение для контроллера цифрового датчика влажности и блока управления ARDUINO MEGA 2560, позволяющее осуществлять сбор и передачу на диспетчерский пункт информации о состоянии ППУ-изоляции трубопровода.

Монтаж системы контроля производится в следующей последовательности.

1. Установка проводников системы контроля ПСК производится в ПИ-трубе и фасонных изделиях на стадии

производства на расстоянии не менее 20 мм от стальной трубы.

2. ЦДВ устанавливаются на стыках ПИ-труб в процессе монтажа элементов трубопровода. ЦДВ предварительно помещают в ППУ-изоляцию размерами $40 \times 30 \times 40$ мм, затем устанавливают на стальную трубу вблизи сварного шва и фиксируются при помощи стяжки или ленты.

3. Подключение ЦДВ к системе контроля осуществляется при помощи стандартных разъемов типа RJ11. В случае отсутствия разъема на конце ПСК следует установить его согласно маркировке элементов ПСК и обжать при помощи кримпера.

4. После монтажа всех ЦДВ выполняется проверка целостности ПСК. Проверка осуществляется при помощи прибора MASTER NSHL468.

5. Производится соединение ЦДВ с проводниками системы контроля (ПСК).

6. ПСК подключается к блоку управления, установленному в ящике ковера или тепловой камере, при помощи герметичного кабельного вывода.

Методика контроля состояния ППУ-изоляции трубопровода заключа-

ется в последовательном считывании данных о значении относительной влажности и температуры с цифровых датчиков влажности, соединённых последовательно по всей длине теплотрассы. Расстояние между ЦДВ может составлять от 1 до 6 мм. К одному блоку управления может подключаться до 1024 датчиков. Максимальное время опроса всех датчиков блока управления составляет 6,2 с. Межопросный интервал датчиков должен составлять не более 30 мин. Данные с ЦДВ хранятся в памяти блока управления.

Перед заделкой стыков при монтаже трубопроводов необходимо провести проверку корректности функционирования системы контроля. Для этого следует включить источник питания,

установив переключатель «Сеть» в положение «I», убедиться в достаточном заряде аккумуляторной батареи.

Далее нужно подключить блок управления к персональному компьютеру (или планшету) с установленным программным обеспечением (рис. 6), содержащим предварительно заложенную схему трубопровода, через интерфейс USB, убедиться в работоспособности всех ЦДВ на контролируемом участке трубопровода, дождаться получения SMS-сообщения с данными о состоянии трубопровода в диспетчерском пункте (или на устройстве оператора). После монтажа трубопровода следует повторно убедиться в работоспособности системы контроля.

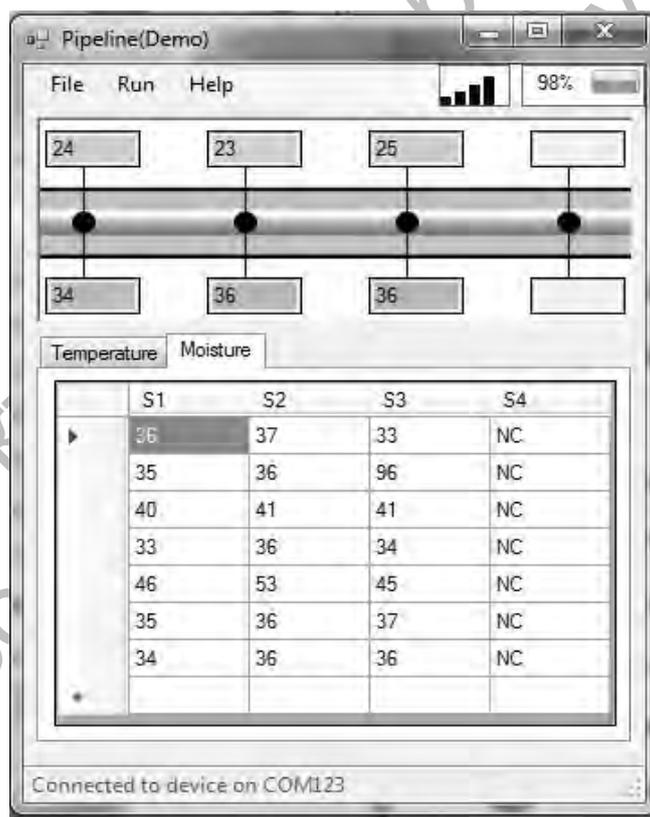


Рис. 6. Интерфейс программы контроля состояния трубопровода

Программным обеспечением предусмотрен порог относительной влажности 60 %, при котором осуществляется световая и звуковая инди-

кация повреждения изоляции трубопровода с указанием места установки датчиков. При этом рост температуры ППУ при повышенной влажности свидетель-

ствует о нарушении герметичности стальной трубы с теплоносителем и подлежит немедленному реагированию.

Основные преимущества разработанной системы контроля по отношению к существующей:

– факт и степень увлажнения ППУ-изоляции определяется датчиками, измеряющими влажность, а не сопротивление изоляции, что повышает достоверность контроля и исключает ложные срабатывания системы;

– привязка цифрового кода каждого ЦДВ к схеме трубопровода позволяет с точностью установки датчиков обнаружить место намокания изоляции без использования дополнительного локатора;

– наличие в составе ЦДВ датчика температуры дает возможность осуществлять температурную коррекцию показаний относительной влажности, а также определять характер повреждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цыганкова, Ю. В.** Оценка транспортных потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Цыганкова. – Красноярск, 2012. – 19 с.
2. **Хворостов, И. В.** К вопросу о надежности теплосетей с трубами в пенополиуретановой изоляции / И. В. Хворостов // Новости теплоснабжения. – 2000. – № 1. – С. 10–14.
3. **Умеркин, Г. Х.** Пути повышения надежности трубопроводов тепловых сетей в промышленной тепловой изоляции из пенополиуретана / Г. Х. Умеркин, И. Л. Майзель // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 4. – С. 40–42.
4. **ГОСТ 30732-2006.** Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2007. – 48 с.
5. **Голубков, С. К.** Опыт эксплуатации труб в ППУ-изоляции с системой оперативного дистанционного контроля (ОДК) / С. К. Голубков // Тепловые сети. Современные решения : материалы конф. – СПб. : Ленэнерго, 2005. – С. 1–6.
6. **Дашкевич, Д. И.** Проблемы эксплуатации и ремонта ПИ-трубопроводов / Д. И. Дашкевич // Энергетическая стратегия. – 2011. – № 3. – С. 62–66.
7. **Болотов, С. В.** Контроль состояния ППУ-изоляции трубопроводов тепловых сетей цифровыми датчиками влажности / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // Неразрушающий контроль композиционных материалов : сб. тр. 1-й дистанционной науч.-техн. конф. НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля композиционных материалов». – СПб., 2015. – С. 177–183.
8. **Болотов, С. В.** О возможности использования датчиков влажности для контроля состояния трубопроводов тепловых сетей / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, М. Акпануром // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2015. – С. 281.
9. **Болотов, С. В.** Контроль температуры полимерного покрытия при производстве ПИ-труб / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко // Неразрушающий контроль композиционных материалов: сб. тр. 1-й дистанционной науч.-техн. конф. НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля композиционных материалов». – СПб., 2015. – С. 172–176.
10. **Герасименко, Н. В.** Исследование скорости увлажнения пенополиуретановой изоляции / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 167.

Статья сдана в редакцию 11 апреля 2016 года

Сергей Владимирович Болотов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-99-31-56.

Никита Васильевич Герасименко, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Sergey Vladimirovich Bolotov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-296-99-31-56.

Nikita Vasilyevich Herasimenko, MSc student, Belarusian-Russian University.