

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. х. н. Р. А. Апакашев, д. т. н. Н. Г. Валиев,  
А. А. Кутенёв, Н. А. Евсеев

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,  
Екатеринбург, Россия

УДК 621.644.07:658.562.64

## АКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Рассмотрены температурные режимы транзитных трубопроводов перемещения пара и горячей воды. Предложено новое устройство теплоизоляции высокотемпературных трубопроводов с изогнутым по спирали шлангом. Самый эффективный контроль — это визуальный осмотр при проведении плановых технических осмотров с целью своевременного выявления дефектов герметичности. Прозрачная теплоизоляция позволяет визуально контролировать состояние защищаемого трубопровода без демонтажа теплоизоляции. Предложены критериальное уравнение подобия конвективной теплоотдачи изогнутого по спирали шланга, заполненного воздухом, и уравнение снижения температуры охлаждающего агента.

**Ключевые слова:** магистральные трубопроводы, теплоизоляция, прозрачный спиралевидный шланг.

**В** настоящее время на территории Российской Федерации протяженность водопроводных и тепловых сетей составляет 270 тыс. км. Эксплуатируется более 250 тыс. км трубопроводов нефтегазового комплекса. Магистральные конструкции (рис. 1) относятся к транзитным трубопроводам, у них отсутствуют ответвления. По ним пар и вода перемещаются от источника до распределительной системы. Температура в трубопроводах может находиться в пределах от 90 до 150 градусов при сечении труб 525–1020 мм<sup>2</sup> (Какие бывают трубопроводы пара и горячей воды, их особенности и правила монтажа. <https://trubaspec.com/dlya-otopleniya/kakie-byvayut-truboprovody-para-i-goryachey-vody-ikh-osobennosti-i-pravila-montazha.html>). В свою очередь, распределительные системы предназначены для перемещения тепла от магистральных конструкций к потребителям — в квартиры и дома. Диаметр этих трубопроводов не превышает 525 мм, допустимая температура для них 85–110 градусов.

При столь внушительных объемах трубопроводной инфраструктуры и ее существенном износе остро встает вопрос корректного определения и анализа рисков наступления предельного состояния, ведущего к выходу оборудования из строя или его разрушению. Трубопроводы подвержены воздействию агрессивных коррозион-



Рис. 1. Прокладка магистральных трубопроводов

ных сред и нуждаются в постоянном контроле теплоизоляционного покрытия. Старая тепло-гидроизоляционная защита (см. рис. 1) трубопроводов (отечественная минеральная вата с наружным покрытием металлическим листом, асбоцементной коркой по металлической сетке или стеклотканью) со временем выходит из строя и становится малоэффективной. При эксплуатации новой теплоизоляции основной причиной выхода ее из строя является увлажнение теплоизоляционного покрытия или возникновение в его структуре несплошностей [1].

В некоторых случаях скорость коррозии теплопроводов может превышать 1 мм/год, что приводит к выходу из строя отдельных участков теплопроводов уже через 5–7 лет. Другим возможным источником потери функциональности теплоизоляции является ее намокание вслед-

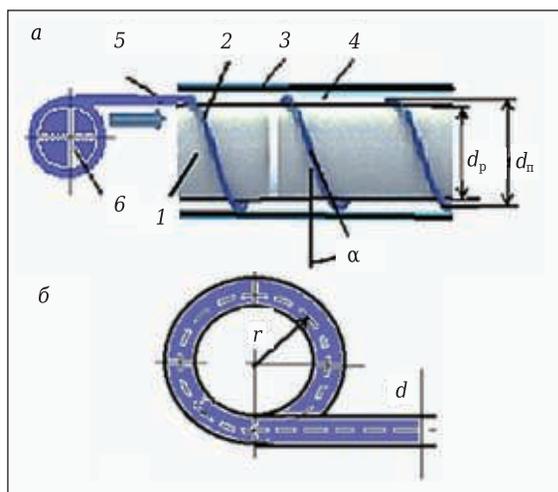


С. Я. Давыдов  
E-mail: davidovtrans@mail.ru

ствии коррозионного разрушения внутренней поверхности металла трубопровода. Коррозионный износ приводит к возникновению микропротечек, выявление которых на первоначальном этапе в ходе визуального осмотра маловероятно.

Риск разрушения оборудования и трубопроводов в процессе их эксплуатации и возникающие при этом вероятные аварийные ситуации ставят перед современной наукой актуальные задачи, связанные с точной идентификацией причин этих разрушений. При определении главных причин повреждения оборудования и оценке их значимости специалист должен провести комплексный анализ всех возможных деградационных процессов, в том числе: коррозии, усталости металла, превышения рабочего давления, износа, эрозии, перегрева, дефектов изготовления и монтажа, отклонения от технических условий на материал объекта, несовершенства конструкции, отклонения от проектных условий эксплуатации и т. п. [2, 3].

Значительная часть затрат времени и сил персонала, обслуживающего теплоизоляционные покрытия трубопроводов, тратится на то, чтобы планово или срочно произвести осмотр и ревизию, чтобы убедиться в исправности оборудования для уменьшения потерь технологического тепла или поддержания стабильного температурного режима. Применяемые с этой целью традиционные теплоизоляционные материалы, как правило, непрозрачны в видимом для человека оптическом диапазоне и закрывают от прямого обзора защищаемую теплоизоляцией поверхность, затрудняя контроль. Естественным желанием видеть «насквозь» продиктовано предложение о применении теплоизоляции всех элементов оборудования, подвергающихся осмотру.



**Рис. 2.** Устройство теплоизоляции трубопроводов (а):  $\alpha$  — угол подъема спиралевидного шланга 2;  $d_n$  — наружный диаметр спиралевидного шланга;  $d_p$  — диаметр стенки трубопровода; б — элемент изогнутого шланга-змеевика;  $d$  — диаметр спиралевидного шланга;  $r$  — радиус изгиба шланга; остальные обозначения — в тексте

Таким образом, появляется возможность сэкономить на сохранении материальных ценностей, рабочей среды, уменьшении трудоемкости и создании комфортных условий работы обслуживающего персонала.

Предлагаемая авторами настоящей статьи разработка относится к теплоизоляционным покрытиям трубопроводов и может быть использована в машиностроении, железнодорожном транспорте, огнеупорной отрасли, а также в промышленности строительных материалов для изготовления теплоизоляции трубопроводов и другого оборудования цилиндрического сечения любой конфигурации. Задачи разработки: эффективный контроль оборудования (трубопроводов, баков, котлов и т. д.) и периодическое наблюдение за его состоянием (наличие протечек, в том числе в резьбовых соединениях, возможность появления будущих свищей в местах сварки стенки и т. д.); проведение плановых технических осмотров для своевременного выявления дефектов герметичности; регулирование теплового режима для охлаждения поверхности трубопроводов; уменьшение затрат на устранение последствий протечки, упрощение контроля.

На рис. 2 схематично показано разработанное авторами настоящей статьи устройство теплоизоляции трубопроводов [4, 5], которое содержит поверхность трубопровода 1 или иного объекта цилиндрической формы, нуждающегося в теплоизоляции. Прозрачный шланг 2 намотан по спирали на наружную поверхность трубопровода 1 с определенным шагом и углом  $\alpha$  навивки. Полость прозрачного шланга заполнена сжатым агентом, например воздухом или водой. Поверх прозрачного шланга 2 смонтирован покрывной материал в виде тонкостенного прозрачного цилиндра 3. Между цилиндрической поверхностью трубопровода и тонкостенным съемным прозрачным цилиндром 3 создается пространство (зазор) 4 спиралевидной формы. Полость прозрачного шланга 2 соединена патрубком 5 с источником 6 сжатого агента, например воздуха или жидкости.

Намотанный по спирали с достаточным шагом прозрачный гибкий шланг 2 позволяет своим наружным диаметром создавать необходимый зазор (воздушную камеру) между наружной поверхностью трубопровода 1 и прозрачным цилиндром 3. Прозрачный цилиндр 3, опираясь на спираль шланга 2, создает необходимый воздушный зазор 4, позволяющий контролировать целостность (фактическое состояние) поверхности трубы без демонтажа теплоизоляции.

Предлагаемое устройство позволяет:

- защитить трубопровод 1 от температурного перегрева, изменения охлаждения или нагрева;
- стабилизировать заданный температурный режим контролируемой теплопередачи в окружающую среду благодаря воздушному зазору 4 спиралевидной формы;

– контролировать всю поверхность трубопровода для выявления потенциальных признаков негерметичности;

– вносить необходимые изменения в параметры температуры защищаемого трубопровода за счет подачи в спиралевидный шланг 2 источником 5 сжатого агента заданного температурного градиента.

Дополнительная периодическая подача в спиралевидный зазор 4 осушенного воздуха и пропускание через слой влагопоглощающего материала, например силикагеля, позволяет исключить отпотевание и конденсацию влаги на наружной поверхности трубопровода 1 и внутренней поверхности прозрачного цилиндра 3. Этим обеспечивается оптическая прозрачность для визуального и инструментального (фото- и видео-) контроля.

За счет изменения шага навивки прозрачного шланга 2 можно изменять коэффициент температурных изменений в зависимости от длины трубопровода 1. Гибкость шланга 2 позволяет сдвигать его витки вдоль поверхности трубопровода в сторону от места ремонта (в том числе сварочных работ), после выполнения которых спираль шланга занимает свое место. При сдвиге витков гибкого шланга 2 вдоль поверхности трубопровода 1 в сторону от места ремонта происходит изменение угла  $\alpha$  подъема витков спиралевидного шланга и его диаметра  $d_n$ . С учетом этих изменений необходимо предусмотреть зазор между диаметром  $d_n$  и стенкой покрытия 3.

Поскольку полимерные материалы имеют увеличенный по сравнению с металлами коэффициент линейного удлинения, то при проектировании систем отопления, холодного и горячего водоснабжения производят расчет удлинений или укорочений гибких шлангов при возникающих перепадах температур. Проектирование и монтаж необходимо выполнять так, чтобы гибкий шланг мог свободно двигаться в пределах величины расчетного расширения.

Изменение длины спиралевидного гибкого шланга при изменении его температуры рассчитывается по формуле

$$\Delta L = \alpha_t L \Delta t,$$

где  $\Delta L$  — изменение длины гибкого шланга при его нагреве или охлаждении;  $\alpha_t$  — коэффициент теплового расширения, мм/(м·°С);  $L$  — расчетная длина гибкого шланга;  $\Delta t$  — разница температуры гибкого шланга при монтаже и эксплуатации, °С. Величину температурных изменений длины гибкого шланга можно также определить по таблицам (Компенсация линейного расширения. <http://xn-43-dlc6as.xn-p1ai/upload/iblock/c32/c32a538eb0b255843352bdf791a37c38.pdf>).

В качестве гибкого материала можно использовать полипропиленовые трубы для горячей воды, имеющие следующие преимущества:

– длительный срок эксплуатации (около 50 лет), связанный с высокой прочностью полипропиленовых шлангов и характерной для них химической стойкостью. Например, в отличие от металла полипропилен не подвергается воздействию содержащихся в воде кислотных-щелочных веществ и абсолютно устойчив к коррозии;

– низкая теплопроводность полипропиленовых шлангов сокращает потерю тепла при транспортировке воды, высокая износоустойчивость;

– морозостойкость. При замерзании полипропиленовые шланги способны полностью восстановить первоначальную форму после оттаивания среды;

– простота монтажа — одно из важных достоинств полипропиленовых труб для горячей воды;

– полипропиленовые шланги производятся из экологически чистого нетоксичного материала, не причиняют вред окружающей среде и никак не влияют на теплоноситель (не меняют химический состав воды);

– полипропиленовые шланги не теряют твердости до +140 °С. При нагреве выше этого значения полипропилен может размягчаться, но при снижении температурной нагрузки полностью восстанавливается.

Расчет гидравлических потерь шлангов заключается в определении потерь напора (или давления), направленного на преодоление гидравлических сопротивлений, возникающих в шлангах. Величина удельной потери напора на трение  $h_{тр}$ , мм/м, определяется по формуле Дарси – Вейсбаха (Проектирование ППП (полипропиленовых) трубопроводов марки «FD». [https://stroyamat.msk.ru/sites/default/files/fd-plast\\_proektirovanie\\_polipropilenovyh\\_truboprovodov\\_marki\\_fd.pdf](https://stroyamat.msk.ru/sites/default/files/fd-plast_proektirovanie_polipropilenovyh_truboprovodov_marki_fd.pdf)):

$$h_{тр} = \lambda l W^2 / (2gd),$$

где  $\lambda$  — коэффициент сопротивления по длине шланга;  $l$  — длина шланга, м;  $W$  — скорость течения охлаждаемого агента, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d$  — расчетный (внутренний) диаметр шланга, м (см. рис. 2, б).

К отличительным особенностям полипропиленовых шлангов можно отнести: высокую стойкость к многократным изгибам и истиранию, повышенную стойкость к воздействию ПАВ, ударную вязкость 5–12 кДж/м<sup>2</sup>, морозостойкость при отрицательных температурах. Относительное удлинение при разрыве более 500 %. Полипропилен получил наибольшее распространение в системах холодного и горячего водоснабжения внутренней и наружной канализации.

Для фиксации подозрительных зон, близких к аварийным участкам, предлагается на прозрачную теплоизоляцию наклеивать цветные метки для обзора при планировании ремонтно-восстановительных работ. Ремонт трубопроводов благодаря локализации будущих мест повреж-

дения становится в большей степени предупреждающим, поскольку потенциальный свищ выдает себя изменением окраски поверхности. Во всех зонах возможных протечек предлагается наносить пятно индикатора или приклеивать разрезное кольцо из пропитанного реактивом негорючего материала, изменяющего цвет при любом нарушении герметичности трубопровода и его элементов в местах стыков. В этом случае упрощаются поиск и фотофиксация отклонений от нормы и, соответственно, облегчается контроль, экономится время на ремонт.

Для определения среднего по длине коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном движении ( $Re > 10000$ ) (см. рис. 2) академик М. А. Михеев рекомендует для охлаждающего агента (воздуха) следующее критериальное уравнение подобия конвективной теплоотдачи (<https://thepresentation.ru/fizika/teplomassoobmen-vynuzhdennaya-konvektsiya-v-trubah-i-kanalah#slides-7>):

$$Nu = 0,018Re^{0,8}\varepsilon,$$

где  $Nu$  — критерий Нуссельта (теплообмена), характеризующий интенсивность теплообмена на границе стенки и воздуха [5, 6],  $Nu = \beta \cdot d/\lambda$ ;  $\beta$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d$  — диаметр спиралевидного шланга, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $Re$  — критерий Рейнольдса, определяющий соотношение сил инерции и вязкости в потоке воздуха [6, 7],  $Re = W_b \cdot d/\nu$ , где  $W_b$  — скорость движения воздуха, м/с;  $\nu$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon$  — поправочный коэффициент на изгиб спиралевидного шланга (В спиралевидном шланге (змеевике) влияние изгиба на интенсификацию теплоотдачи распространяется на весь змеевик. <https://thepresentation.ru/img/thumbs/093e017f490a81fca645213278b3069e-800x.jpg>):

$$\varepsilon = 1 + 1,8d/r,$$

где  $d$  — внутренний диаметр спиралевидного шланга;  $r$  — радиус спирали (см. рис. 2, б, рис. 3).

При турбулентном течении воздуха в изогнутых спиралевидных шлангах (см. рис. 3) вследствие центробежного эффекта в поперечном сечении шланга возникает вторичная циркуляция,

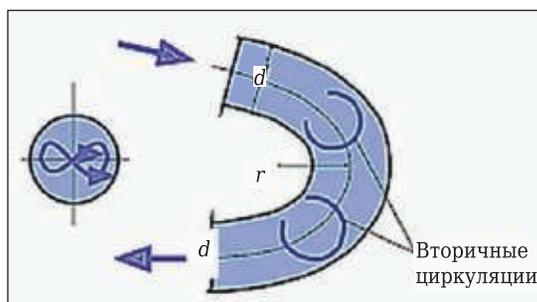


Рис. 3. Теплоотдача в изогнутых шлангах

куляция, наличие которой приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи  $\beta$ .

Снижение температуры  $\Delta t_{0w}$  воздуха, К, в соответствии с уравнением Клапейрона [6] получим в виде

$$\Delta t_{0w} = \frac{W_{co}^2}{2R \cdot \text{tg}^2 \alpha},$$

где  $W_{co}$  — средняя скорость движения воздуха, м/с;  $R$  — универсальная газовая постоянная, м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К);  $\alpha$  — угол подъема спирали шланга, рад.

Термоаэродинамический эффект теплоотдачи от вращения воздуха по спирали увеличивается с ростом его окружной скорости, т. е. с уменьшением угла  $\alpha$ . Намотка на трубопровод спиралевидного шланга с подъемом спирали под углом  $\alpha$  в пределах  $15^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  позволяет защитить стенки трубопровода от перегрева горячим материалом за счет снижения температуры его поверхности на 14 % [6]. Таким образом, прозрачная теплоизоляция позволяет визуально контролировать состояние защищаемого трубопровода без ее демонтажа. Особенность предложенной активной теплозащиты стенок трубопровода заключается в том, что охлаждающий агент движется по венту вокруг их поверхностей за счет термовихревого эффекта «торнадо».

#### Библиографический список

1. Журавлев, Д. Б. Локализация повреждений изоляционных покрытий трубопроводов / Д. Б. Журавлев, А. В. Жуков, Д. Г. Давыдова // ТехНадзор. — 2014. — № 3 (88). — С. 84–86. <http://strategnk.ru/about/stati/statya1/lokalizaciya-povrezhdeniy-izolyacionnyh-pokrytiy-truboprovodo/1>.
2. Давыдов, С. Я. Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
3. Давыдов, С. Я. Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Семин. — М. : Фонд развития и поддержки молодежи «Кадровый резерв», 2016. — 472 с.
4. Пат. 204896 Российская Федерация. Устройство теплоизоляции высокотемпературных трубопроводов / Давыдов С. Я., Угольников А. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В. ; заявитель Угольников А. В. — № 2021102406 ; заявл. 02.02.2021 ; опубл. 17.06.2021, Бюл. № 17.
5. Заявка 2021108138 Российская Федерация. Устройство для теплоизоляционного покрытия трубопроводов / Давыдов С. Я., Кожушко Г. Г., Евсеев Н. А. ; заявитель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет» ; опубл. 26.03.2021. Решение о выдаче патента 22.07.2021.
6. Орлов, М. Е. Теоретические основы теплотехники. Теплообмен : уч. пособие / М. Е. Орлов. — Ульяновск : Ульяновский гос. техн. ун-т, 2013. — 204 с.
7. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М. : Наука, 2003. — 736 с. ■

Получено 16.04.21

© С. Я. Давыдов, Р. А. Апкашев, Н. Г. Валиев, А. А. Кутенёв, Н. А. Евсеев, 2021 г.