

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Э. М. Исмаилов^{1,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2,b}

¹ Сургутский филиал федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9913-3283>, ✉ trol.8@inbox.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Аннотация: в работе анализируются распространенные системы обогрева технологического трубопровода и последствия их отсутствия (отказа) для нефтедобывающих компаний. Обосновывается важность внедрения машинного зрения для обеспечения безопасности топливно-энергетического комплекса. Алгоритмы работы системы машинного зрения рассматриваются в связке с существующими системами промышленного электрообогрева. В результате исследования определены главные условия для качественного улучшения работы и безопасности систем электрообогрева, в которых ключевое место занимает алгоритм искусственного интеллекта.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, машинное зрение, алгоритмы работы, система электрообогрева.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Исмаилов Э. М., Гавриленко Т. В. Влияние технологий машинного зрения на устойчивость критической инфраструктуры в условиях высокой автоматизации. *Успехи кибернетики*. 2026;7(1):45–50.

Поступила в редакцию: 28.01.2026.

В окончательном варианте: 21.03.2026.

THE IMPACT OF MACHINE VISION ON THE RESILIENCE OF CRITICAL INFRASTRUCTURE IN HIGHLY AUTOMATED ENVIRONMENTS

E. M. Ismailov^{1,a}, T. V. Gavrilenko^{1,2,b}

¹ Surgut Branch of Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9913-3283>, ✉ trol.8@inbox.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com

Abstract: we analyzed common heating systems used in process pipelines and assessed the consequences of their absence or failure for oil-producing companies. We demonstrated the importance of applying machine vision to improve safety in the fuel and energy sector. We examined machine vision algorithms in combination with existing industrial electric heating systems. Based on this analysis, we identified the key conditions for improving the performance and safety of electric heating systems using artificial intelligence technologies.

Keywords: critical infrastructure, machine vision, operating algorithms, electric heating system.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Ismailov E. M., Gavrilenko T. V. The Impact of Machine Vision on the Resilience of Critical Infrastructure in Highly Automated Environments. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(1):45–50.

Original article submitted: 28.01.2026.

Revision submitted: 21.03.2026.

Введение

Система управления технологическим процессом прошла длинный путь эволюции от ручного и визуального контроля механизмов и процессов (кузнец по цвету металла определяет необходимость подать поток воздуха в печь) до интеллектуальных и киберфизических систем (информация с реального оборудования поступает на облачные диски для хранения и анализа). Инициаторами преобразований всегда были рабочие и инженеры, которые наблюдали за системами и механизмами, видя их неэффективность, а также управленцы, которые видели снижение затрат в том, что им предлагают рабочие, инженеры и исследователи. Все это уже история, по которой можно проследить, как человечество эволюционировало и постепенно передавало свою умственную и физическую работу механизмам и умным системам.

Сегодня мы можем наблюдать за машинами с автопилотом. Такие машины не просто едут по полосе движения, они анализируют ситуацию на дороге (благодаря облачному обмену данными) вплоть до попыток предугадать действия всех водителей, находящихся в потоке и на соседней полосе, кроме этого, такие автопилоты способны выстраивать маршруты, миную пробки и пресекать опасные ситуации на дороге [1].

Не обходят стороной умные системы промышленный сектор. Активно внедряются в России системы промышленного интернета вещей (IIoT (Industrial Internet of Things)), основная цель которых заключается в объединении в единую сеть огромного количества датчиков, исполнительных механизмов и интеллектуальных устройств. Данная технология позволяет повысить безаварийность технологических процессов путем диагностики контролируемого технологического участка или точечного оборудования для последующего интеллектуального анализа полученных данных системами на основе искусственного интеллекта, которые смогут планировать вывод в ремонт или техническое обслуживание систем, оборудования или технологических сетей контролируемого участка [2].

Компьютерное зрение наиболее эффективно и востребовано в критически важных секторах нефтегазовой отрасли. Один из таких секторов – это электрообогрев технологического трубопровода.

Важность электрообогрева трудно переоценить, а последствия его отсутствия или неисправности (особенно в условиях Крайнего Севера) в зимний период являются фатальными, провоцируя большие финансовые потери [3].

Представим трубу, по которой течет нефть, сжиженный газ или мазут. При отрицательной температуре и при отсутствии электрообогрева (даже если есть теплоизоляция) тяжелые нефтяные фракции в нефти сразу же начинают кристаллизоваться (в мазутопроводе это загустевание) и со временем выпадают в отложения, образуя в наиболее холодных внутренних участках трубы парафиновые наросты (в мазутопроводе происходит затвердевание), тем самым затрудняя проход нефти, сужая внутреннее сечение трубы и тем самым увеличивая энергозатраты и время на перекачку нужного объема нефтепродукта. В итоге парафиновые отложения полностью закупоривают трубу, образуя парафиновую пробку, и транспортировка нефти становится невозможной [4].

В трубопроводах со сжиженным газом (трубопроводы высокого давления) при отсутствии электрообогрева и низкой температуры вокруг трубы, из-за наличия в перекачиваемом продукте воды и при ее взаимодействии с углеводородным газом на стенках трубопровода происходит кристаллизация, которая, так же, как и в рассмотренном выше случае, приводит к полной закупорке трубопровода [4].

Если рассматривать другие, более локальные участки, например трубопроводы дренажных линий (на трубопроводах газа), промерзание таких участков приводит к выходу из строя приборов КИ-ПиА, что также ведет к большим экономическим потерям.

Основными задачами электрообогрева являются поддержание определенной, заданной системой управления температуры перекачиваемой среды и недопущение тем самым образования парафиновых отложений и кристаллов на внутренних стенках трубы.

Существуют различные виды обогрева трубопроводов:

1. Обогрев паром (является устаревшим), активно применялся в прошлом веке до изобретения электрообогрева. Ввиду сложности в проектировании, высокой затратности при обслуживании и большого количества сопутствующего оборудования в ходе эксплуатации данная система обогрева сегодня встречается крайне редко [4, 5].

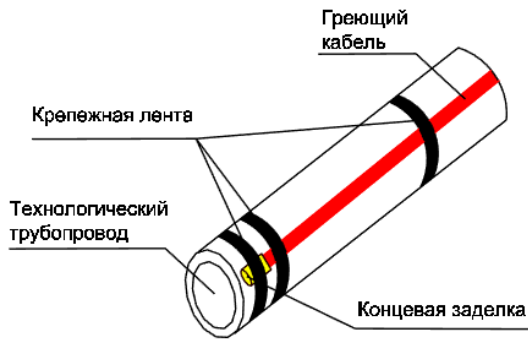


Рис. 1. Саморегулирующийся кабель [5]

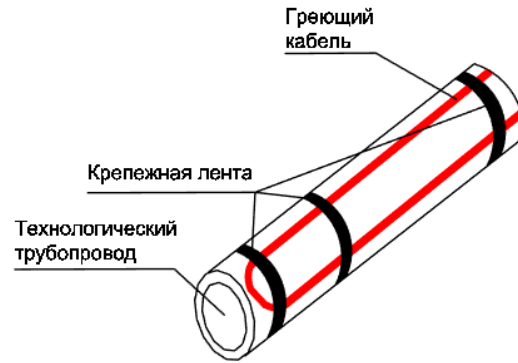


Рис. 2. Резистивный кабель [5]

2. Система обогрева с применением греющего кабеля. Данная система обогрева встречается на всех современных объектах нефтегазовой отрасли и, в свою очередь, в зависимости от условий, требований заказчика может быть исполнена по-разному:

2.1. Саморегулирующийся кабель – греющий кабель, принцип действия которого заключается в изменении сопротивления кабеля в зависимости от температуры окружающей среды. Чем ниже температура окружающей среды вокруг такого кабеля, тем ниже его сопротивление и выше ток, соответственно, тем сильнее нагревается кабель. Обратная зависимость – когда температура окружающей среды высокая (рисунок 1) [5, 6].

2.2. Резистивный греющий кабель – греющий кабель, отличительной чертой которого является наличие постоянного сопротивления и выделение постоянной мощности по всей длине линии. Нагрев кабеля не зависит от температуры трубы и регулируется с помощью специальных датчиков температуры (рисунок 2) [5, 6].

3. Система скин-эффекта, отличительной особенностью которой является обогрев длинных участков трубопровода. Данная система отличается от предыдущих тем, что вдоль обогреваемой трубы прокладывается небольшая трубка-проводник (спутник), на которую подается переменный ток высокой частоты, который благодаря скин-эффекту вытесняется на поверхность трубки, начинающей нагреваться по всей своей длине (рисунок 3) [4, 5, 6].

Важно подчеркнуть, что всем рассмотренным системам электрообогрева присущи свои сильные и слабые стороны и ни одна система электрообогрева не может обеспечить 100 % гарантию выполнения своей функции, несмотря на сложную систему управления и защиты.

В нефтегазовой отрасли, где последствия отказа любой системы могут быть катастрофическими, важно обеспечивать максимально возможный уровень безаварийности, поэтому внедрение в существующие и проектируемые системы электрообогрева машинного зрения (рисунок 4) в качестве дополнительной системы мониторинга и защиты является очень актуальной задачей [5, 6].

Использование машинного зрения (МЗ) для поиска точек потери тепла по причине повреждения изоляции на технологическом трубопроводе, недогрева по причине неправильного монтажа греющего кабеля является нетривиальной задачей с высоким уровнем востребованности. Использование тепловизора в сочетании с алгоритмами МЗ может существенно повысить как эффективность систем электрообогрева, так и их безопасность. Одна из реализаций представлена на рисунке 4 (камера расположена стационарно на здании), также возможно оснастить такими камерами мобильные платформы (дроны, роботы) для того, чтобы сканировать необходимую трассу по всей длине.

Алгоритмы работы

Задача алгоритма МЗ будет заключаться в сканировании трубопровода и определении холодных, горячих и нормальных точек (таблица).

«Холодные точки»: участки трубопровода, при сканировании которых было выявлено, что их температура ниже нормы, что может говорить об отказе кабеля, который находится под теплоизоляции

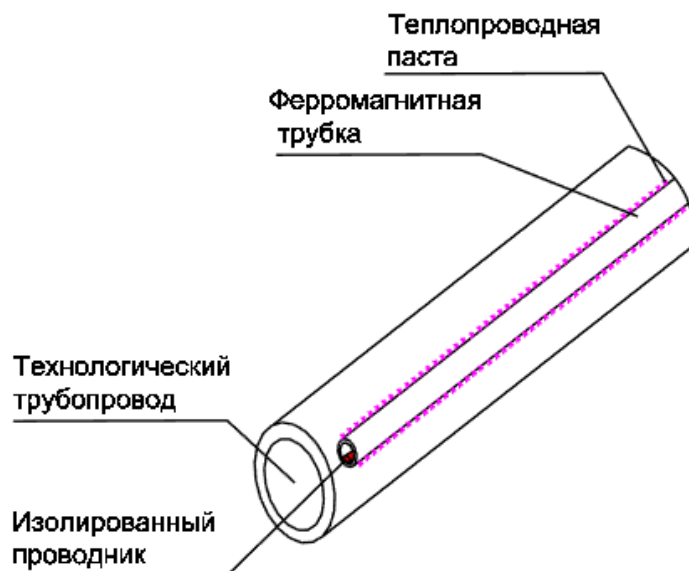


Рис. 3. Скин-система [5]

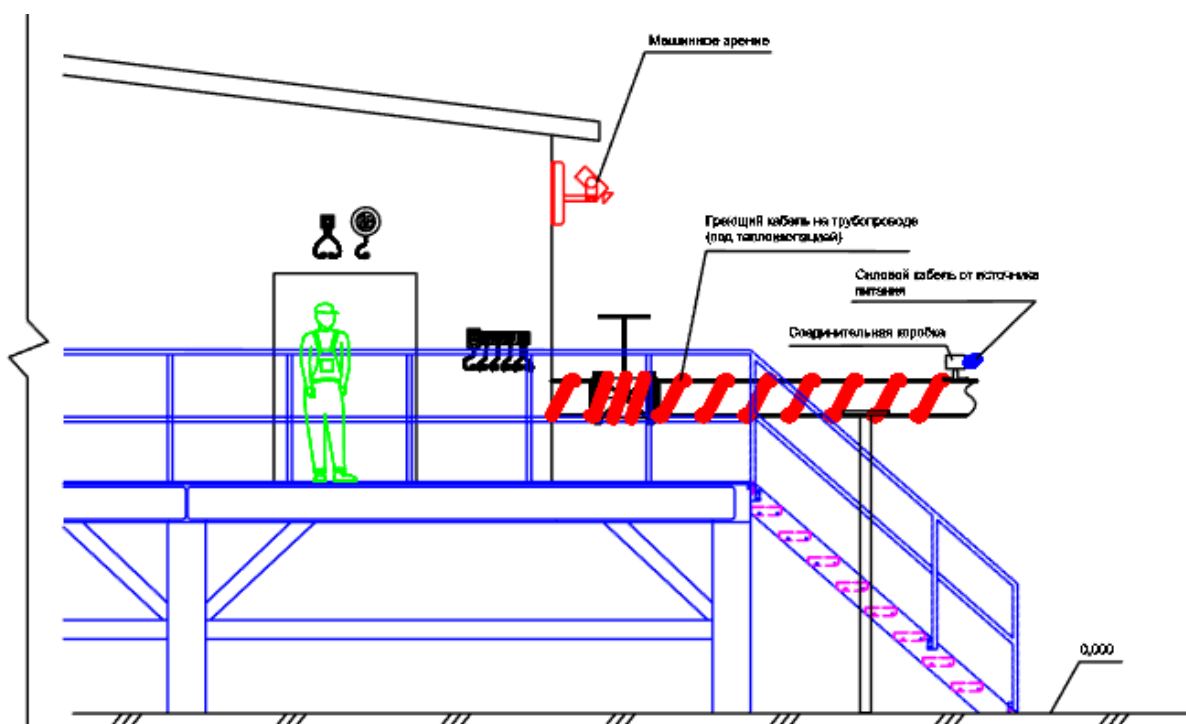


Рис. 4. Реализация машинного зрения в нефтегазовом секторе

ей, или его повреждении.

«Горячие точки»: участки трубопровода, при сканировании которых выявлен перегрев обогреваемого участка или повреждение изоляции.

«Нормальные точки»: в ходе сканирования и сравнения всех участков трубы выявлен штатный режим работы системы электрообогрева.

Ожидаемым результатом работы системы с МЗ является отправленный в операторную автоматически генерируемый отчет о штатном режиме работы системы электрообогрева или предупреждение о необходимости провести ремонт на участке трубопровода, который можно будет найти по отправленным координатам системы с МЗ. Данное техническое решение также хорошо тем, что позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому состоянию, что суще-

ственно сокращает затраты и возможные риски, связанные с человеческим фактором [7, 8].

Таблица

Алгоритмы работы системы электрообогрева

№	Пози- ци- онное обо- значе- ние	Наименова- ние пара- метра	Ед. изм.	Тип сиг- нала	Диа- па- зон изм. (от)	Диа- пазон изме- рений (до)	LL	L	H	HH	Описание системы	реакции
1.	ЕК1	Система обогрева «Вклю- чено»/ «Выключе- но»	Лог. ед.	DI	-	-	-	-	-	-	Отображение на панели оператора	
2.	ТЕ1	Температу- ра нефте- продукта	°С	AI	-50	+200	+3			+10	Отображение на панели оператора: при сигнале LL система включается, при сигнале HH система отключается	
3.	К1	Система машинно- го зрения	Лог. ед.	DI	-	-	-	-	-	-	Разбивка всех снимков трубопровода на кадры, их сравнение с этало- ном и отправка итого- вого отчета на монитор оператора	

Заключение

На основе изложенного справедливо подчеркнуть, что система управления с использованием МЗ может являться дополнением к существующим (точечным) системам измерения на основе температурных датчиков (термопара, термосопротивления) или заменить точечные измерения датчиками на пространственный анализ всего технологического трубопровода. В свою очередь, пространственный анализ помогает обнаружить локальные участки на трубопроводе, которые невозможно обнаружить с помощью точечных датчиков, такие как повреждения изоляции трубопровода, образование пробок или обледенение.

Внедрение в проектируемые и существующие системы электрообогрева технологий на основе МЗ позволяет минимизировать воздействие человеческого фактора и перейти на новый уровень автоматизации (высокой автоматизации). К тому же метод МЗ дает возможность объективно оценивать состояние контролируемого трубопровода по всей длине.

Система документообразования создает подробную цифровую карту, по которой можно точно определить участки планового или экстренного обслуживания трубы и греющего кабеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сааков В. В., Кашиев Г. К., Боготов И. М., Кишин Д. А. Машинное зрение. *Современные аспекты развития науки и образования: сборник статей Международной научно-практической конференции*. Пенза, 2022:22–24. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48798200>.
2. Исмаилов Э. М., Гавриленко Т. В. Проблема устойчивости критической инфраструктуры в условиях высокого уровня автоматизации. *Успехи кибернетики*. 2025;6(2):75–79.
3. Гайнитдинов Б. А., Аюпов А. Р. Электрообогрев резервуаров. *Интеграция науки и практики как условие технологического прорыва: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 3 частях. Часть 2*. Уфа, 2017:10–16. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30527091>.

4. Хренков Н. Н., Струпинский М. Л., Кувалдин А. Б. Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционно-резистивного обогрева длинных и сверхдлинных трубопроводов. *Промышленный электрообогрев и электроотопление*. 2015;1–3. Режим доступа: <https://sst.ru/press/expert-articles/research-development-production-organization-and-implementation-of-induction-resistance-heating-of-l/>.
5. Хренков Н. Н., Струпинский М. Л., Кувалдин А. Б. *Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли*. Москва: ЛитРес; 2023.
6. Левин М. Ю., Нагорнов С. А., Левина Е. Ю., Левина Л. В., Коваленко И. А. Метод измерения температуры топлива с применением машинного зрения. *Современные проблемы науки и образования*. 2022;5:102–109. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-5-102-109.
7. Хальясмаа А. И. Метод автоматического анализа тепловизионных изображений высоковольтного оборудования. *Инженерный вестник Дона*. 2025;2:335–354. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80548638>.
8. Рада А. О., Кузнецов А. Д., Зверев Р. Е., Акулов А. О. Перспективы мониторинга состояния тепловых сетей путем тепловизионного обследования. *Уголь*. 2022;S12:149–154. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-149-154.