

Захар Александрович Исков

*Студент 4 курса,
кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Е.В. Михайлова,
преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость»*

В условиях горячей прокатки строительной арматуры температура заготовки является одним из ключевых технологических параметров, определяющих пластичность металла, энергосиловые условия деформации, качество готовой продукции и ресурс технологического оборудования. При этом измерение температуры в прокатном цехе осложняется воздействием высоких температур, вибраций, ударных нагрузок, запыленности, а также наличием на поверхности арматуры окалины. Именно поэтому задача создания надежного портативного термометра для оперативного контроля температуры поверхности арматуры является актуальной как с инженерной, так и с метрологической точки зрения.

В работе рассмотрены особенности горячего проката как объекта температурного контроля и показано, что применение бесконтактных пирометрических методов в данных условиях ограничено. Главная причина заключается в нестабильности коэффициента излучения поверхности, вызванной окалиной, неоднородностью структуры поверхностного слоя и воздействием агрессивной среды прокатного производства. В результате показания пирометрических средств измерений могут испытывать значительный дрейф, что затрудняет достижение требуемой точности технологического контроля. В связи с этим в работе обоснован переход к контактному методу измерения, основанному на непосредственном тепловом взаимодействии датчика с поверхностью нагретой арматуры.

Существенное место в исследовании занимает патентный анализ существующих технических решений в области измерения высоких температур в металлургии. Были рассмотрены как бесконтактные системы контроля температуры проката, так и контактные термометры и термоэлектрические преобразователи для высокотемпературных промышленных сред. Проведенный анализ показал, что существующие решения либо ориентированы на стационарные объекты, либо обладают высокой конструктивной сложностью, либо не обеспечивают требуемой устойчивости в условиях динамичного контакта с движущейся заготовкой. Это позволило сформулировать требования к разрабатываемому прибору и подтвердить необходимость создания специализированного контактного термометра для условий горячего проката.

В рамках работы предложена структурная схема измерительного канала портативного контактного термометра, включающая первичный преобразователь, блок обработки сигнала, микроконтроллерную систему управления, интерфейс отображения и передачи данных, а также автономную систему питания. Особое внимание уделено тому, что измерительный канал должен не только обеспечивать получение достоверной температуры, но и сохранять работоспособность в условиях механических и тепловых воздействий, характерных для прокатного цеха. Такой подход позволил рассматривать проектирование прибора как комплексную инженерно-метрологическую задачу.

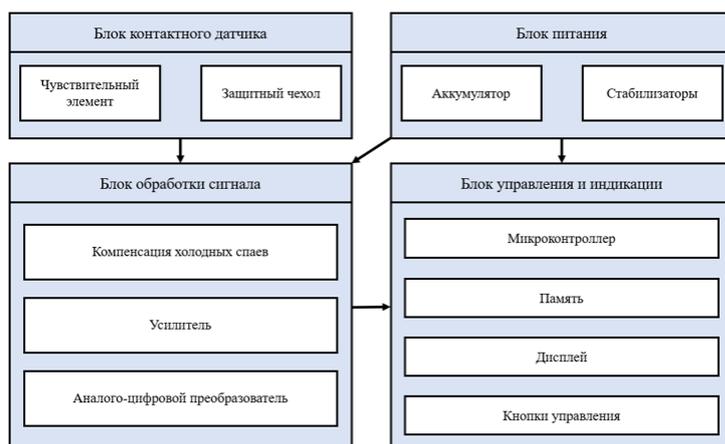


Рис. 1. Структурная схема измерительного канала

Ключевым результатом работы является обоснованный выбор термопары типа N в качестве первичного преобразователя. По сравнению с термопарой типа K она обладает более высокой долговременной стабильностью и лучшей стойкостью к окислению при высоких температурах, что особенно важно при измерениях в диапазоне до 1200 °С. При этом термопара типа N существенно выгоднее по стоимости и технологичности по сравнению с термопарами благороднометалльных типов, что делает ее оптимальным компромиссным решением по критерию «стабильность – стоимость».

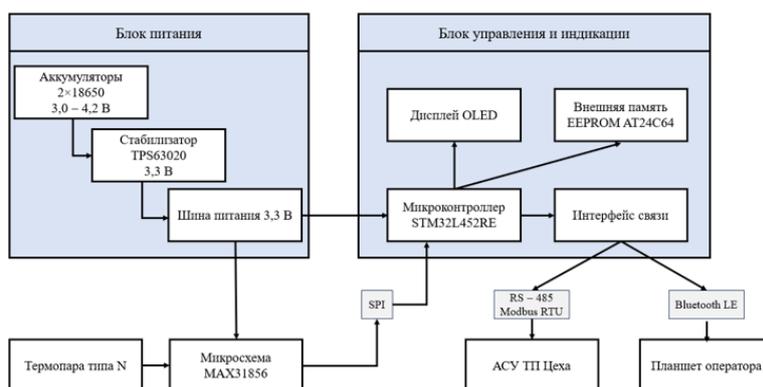


Рис. 2. Структурная схема контактного термометра с выбранными компонентами

Отдельный раздел работы посвящен расчету погрешности измерительного канала. Сформирован бюджет неопределенности, учитывающий вклад термопары, погрешность преобразования и линеаризации, компенсацию холодного спая, тепловой контакт, шум, нестабильность питания и дрейф характеристик во времени.

Таблица 1. Бюджет неопределенности

№	Источник погрешности	Предельная погрешность $\pm a$, °С	Модель распределения	Стандартная неопределенность u_i , °С
1	Термопара типа N	4,8	Прямоугольное	2,77
2	Преобразования и линеарность MAX31856	1,8	Прямоугольное	1,04
3	Компенсация холодного спая	0,7	Прямоугольное	0,4
4	Тепловой контакт	1	Прямоугольное	0,58
5	Шум	–	Нормальное	0,1
6	Нестабильность питания	–	Нормальное	0,02
7	Длительная нестабильность (дрейф)	0,5	Прямоугольное	0,29

Анализ показал, что наибольший вклад в суммарную неопределенность вносит первичный преобразователь — термопара типа N, тогда как электронный тракт на базе MAX31856 оказывает существенно меньшее влияние. Это имеет важное практическое значение, поскольку указывает на направление дальнейшего совершенствования прибора: повышение точности следует связывать прежде всего с оптимизацией конструкции чувствительного элемента и условий теплового контакта с измеряемой поверхностью.

Для экспериментальной проверки принципов работы был собран макетный образец контактного термометра на базе термопары типа K, модуля MAX6675, микроконтроллера Arduino Uno и OLED-дисплея. На данном макете проведена серия измерений температуры, результаты которой были обработаны статистически. Показано, что в выборке отсутствуют грубые промахи, а случайная составляющая погрешности может быть описана нормальным законом распределения. Хотя макет выполнен на более простой и доступной элементной базе, он подтвердил работоспособность выбранного подхода к контактному измерению температуры и пригодность предложенной структуры для дальнейшего развития до промышленного исполнения.

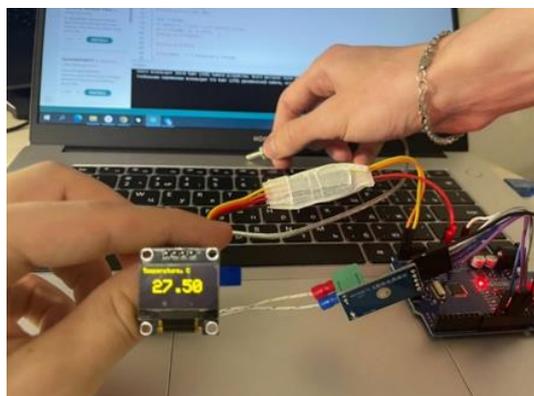


Рис. 3. Макетный термометр

Таким образом, в работе решена задача конструкторского и метрологического обоснования портативного контактного термометра для измерения температуры поверхности строительной арматуры в условиях горячего проката. Научная новизна состоит в комплексном сочетании инженерного и метрологического подходов к проектированию измерительного канала, а практическая значимость — в предложении реализуемого проектного решения на базе серийных компонентов. Полученные результаты могут быть использованы при создании опытного образца прибора и в дальнейшем — при его адаптации к реальным условиям металлургического производства. Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной оценкой погрешности теплового контакта и разработкой оптимальной конструкции контактного наконечника.

Литература

1 Хайруллин И. А., Слепова И. О., Хасанова Р. В., Картавцев С. В. Оценка использования теплоты горячего проката [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2015. № 6-2 (11). С. 152-158. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ispolzovaniya-teploty-goryachego-prokata> (дата обращения: 17.09.2025).

2 Отличия горячекатаного и холоднокатаного металлопроката [Электронный ресурс] // 1Металлобаза.ру. URL: <https://www.1metallobaza.ru/blog/otlichiya-goryachekatanogo-i-kholodnokatanogo-metalloprokata> (дата обращения: 20.09.2025).

3 Стеблов А. Б., Асанов В. Н., Березов С. Н. Калибровка для микростана по производству строительной арматуры [Электронный ресурс] // Калибровочное бюро

(Roll pass design). 2013. № 1. С. 29-33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kalibrovka-dlya-mikrostana-po-proizvodstvu-stroitelnoy-armatury> (дата обращения: 24.09.2025).

4 Производство арматуры и её характеристики [Электронный ресурс] // НС-Металл. URL: <https://www.ns-metall.ru/info/articles/manufacturing-of-armature-and-its-characteristics/> (дата обращения: 26.09.2025).

5 Особенности стального горячекатаного проката [Электронный ресурс] // ЗаводСЗ.ру. URL: <https://www.zavodsz.ru/blog/osobennosti-stalnogo-goryachekatanogo-prokata/> (дата обращения: 30.09.2025).

6 Левандовский С. А., Тулупов О. Н., Моллер А. Б., Кинзин Д. И., Фомичев И. Н. Разработка технических и технологических решений для совершенствования процесса прокатки-разделения на стане 370 ПАО «ММК» [Электронный ресурс] // Калибровочное бюро (Roll pass design). 2021. № 19. С. 18-25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnicheskikh-i-tehnologicheskikh-resheniy-dlya-sovershenstvovaniya-protssessa-prokatki-razdeleniya-na-stane-370-pao-mmk> (дата обращения: 02.10.2025).

7 Гафуров Р. Т., Гафуров Н. М., Малёж Е. А., Достовалов Н. Н. Разработка и испытание регистратора температуры [Электронный ресурс] // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 3, № 2. С. 210-215. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-ispytanie-registratora-temperatury> (дата обращения: 08.10.2025).

8 Ладьгин В. П., Матвеев Ю. Н., Смирнов С. К. Методы и средства измерения температуры : учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 64 с. [Электронный ресурс] // Studfile.net : файловый архив студентов. 2021. URL: <https://studfile.net/preview/10931088/> (дата обращения: 09.10.2025).

9 Брао И. П. Анализ основных проблем и поиск перспективных направлений развития отрасли бесконтактной термометрии [Электронный ресурс] // Инновации в науке. 2014. № 38. С. 51-56. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osnovnyh-problem-i-poisk-perspektivnyh-napravleniy-razvitiya-otrasli-beskontaktnoy-termometrii> (дата обращения: 14.10.2025).

10 Федорук А. А., Другова О. Г., Кудряшов И. Н., Мартин С. В. Оценка условий труда и состояния здоровья работников основных профессий прокатного цеха [Электронный ресурс] // Медицина труда и экология человека. 2018. № 4 (16). С. 109-119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-usloviy-truda-i-sostoyaniya-zdorovya-rabotnikov-osnovnyh-professiy-prokatnogo-tseha> (дата обращения: 14.10.2025).