

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.586.67+678.065

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-2-7

**АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕЗИНОСМЕСИТЕЛЯХ***д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**А.С. ФРИК**(ООО «Поинт», Полоцк)*

Приведен анализ отечественных и зарубежных преобразователей термоэлектрических (термопар) для измерения температуры резиновой смеси в резиносмесителях. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих конструкций термопар. Представлена конструкция термопары, разработанная компанией ООО «Поинт». Дан сравнительный анализ влияния материала наконечников термопар, материала покрытия наконечников и диаметра электродов термопар на прочностные характеристики готового изделия, а также на показатели температурной инерции. Показаны результаты испытаний на температурную инерцию разработанной термопары и ее аналога. Даны рекомендации по проведению опытно-промышленной эксплуатации при разработке и исследовании новых конструкций термопар для резиносмесителей. Отображены результаты совместного испытания термопары компании ООО «Поинт» и зарубежного аналога в виде температурного тренда.

***Ключевые слова:** преобразователь термоэлектрический (термопара), резиносмеситель, измерение температуры, показатель тепловой инерции.*

Введение. Измерение температуры резиновой смеси в резиносмесителях является важным фактором, влияющим на качество готовых изделий. При коротком цикле смешения (160–180 с) и большой потребляемой мощности (700 кВт и более) в резиносмесителе выделяется значительное количество теплоты, которое должно быть отведено с охлаждающей водой для поддержания температуры смеси в определенных пределах. Для контроля температуры используют различные датчики температур, такие как термопары, инфракрасные датчики, биметаллические термометры. Сложность разработки данных датчиков температуры заключается в одновременном обеспечении наименьших показателей температурной инерции и повышенной прочности наконечников монтажной части, т.к. наконечник датчика температуры работает в абразивной среде с циклически изменяющимися нагрузками, в т.ч. ударными. Для решения данной задачи наилучшим образом подходят термопары, поскольку они напрямую взаимодействуют со средой. В современных отечественных и зарубежных резиносмесителях используются от двух до четырех термопар. Из-за постоянного истирания наконечников термопар и их выхода из строя во время работы необходимо иметь резервные термопары, которые будут продолжать измерять температуру резиновой смеси и посылать сигналы в систему управления. В качестве вторичных приборов используются интеллектуальные преобразователи тока в унифицированный токовый сигнал 4–20 мА¹ с поддержкой протокола HART.

Целью анализа конструкций термопар для резиносмесителей является разработка термопары, которая не уступает иностранным аналогам по показателям прочности, износостойкости и температурной инерции. Для достижения данной цели необходимо комплексное обеспечение сразу трех показателей: тепловой инерционности, механической прочности и износостойкости материала термопар.

Основная часть. На рисунке 1 показана схема расположения термопар в резиносмесителе. Одна из термопар находится в загрузочном устройстве, другая – в разгрузочном. В качестве первичного преобразователя используются преобразователи термоэлектрические типа ТХК(L), ТХА(K) и ТЖК(J) по ГОСТ 6616-94². Исполнение рабочего спая в большинстве случаев – неизолированный от оболочки, т.е. спай двух электродов имеет общий контакт с защитной арматурой. Данный вид спая позволяет добиться наименьших показателей температурной инерции.

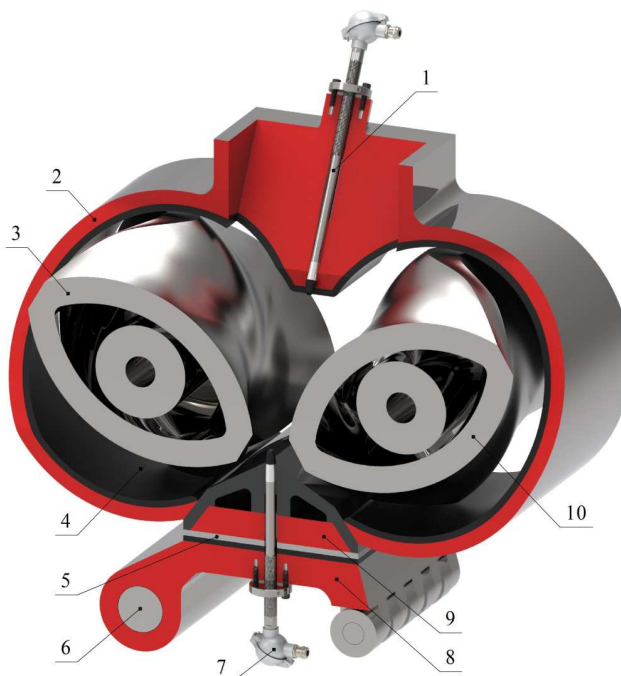
Известны аналоги термопар модификации 01.17³ российской компании ООО «ПК «ТЕСЕЙ»», предназначенные для измерения температуры в камере смешения резиносмесителя. В качестве материала монтажной

¹ ГОСТ 26.011-80 Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные. – М: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

² ГОСТ 6616-94 Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – Минск: Межгосударств. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1994. – 15 с.

³ Термопара 01.17 [Электронный ресурс]. – URL: https://tesey.com/katalog/datchik-temp/datchik-temp_23.html?product=1 (дата обращения: 29.01.2024).

части используется нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. В результате опытно-промышленной эксплуатации на резиномесителях компании ОАО «Белшина» выяснилось, что данный материал без специального покрытия имеет высокий показатель температурной инерции, недостаточные прочностные характеристики и низкую износостойкость. Применяя поковки из данной нержавеющей стали, можно поднять прочностные характеристики на 30–50%, но показатели по температурной инерции при этом остаются неудовлетворительными.



1 – термопара верхняя (на загрузочном устройстве); 2 – корпус резиномесителя; 3 – ротор левый; 4 – защитный слой из твердого металла; 5 – резиновые прокладки; 6 – вал разгрузочного устройства; 7 – термопара нижняя (на разгрузочном устройстве); 8 – поворотный рычаг; 9 – откидная дверца; 10 – ротор правый

Рисунок 1. – Схема расположения термопар в резиномесителе

Известны преобразователи термоэлектрические ТХК 9421⁴ компании АО «НПП «ЭТАЛОН»». Для изготовления защитной арматуры в них используется сталь 40Х. ООО «Поинт» также проводил испытания данного материала: основным его недостатком является хрупкость. Наконечники, изготовленные из данного материала, не выдерживают циклические нагрузки в резиномесителях и в течение недели выходят из строя.

Были изучены термопары для резиномесителей китайской компании AnHui TianKang (Group)Shares Co.,Ltd⁵. Их особенностью являются сменные наконечники монтажной части. Применение сменных наконечников позволяет удешевить замену вышедшей из строя термопары, т.к. при этом заменяется только сам наконечник, но данная технология приводит к увеличению показателей температурной инерции и, как следствие, к низкому качеству измерения температуры резиновой смеси.

В качестве чувствительного элемента термопары индийской компании ATLAS TRANSTAB PVT.LTD⁶ используется термопарный кабель с заваренной оболочкой. Данный вид термопар имеет высокие прочностные характеристики, поскольку в качестве защитной арматуры можно применять любой высокопрочный материал. Спай в термопарном кабеле контактирует с измеряемой средой только через оболочку, а не через наконечник, поэтому показатели температурной инерции невысокие. Но показатели износостойкости крайне низкие, т.к. толщина оболочки применяемого термопарного кабеля от 0,5 до 0,7 мм.

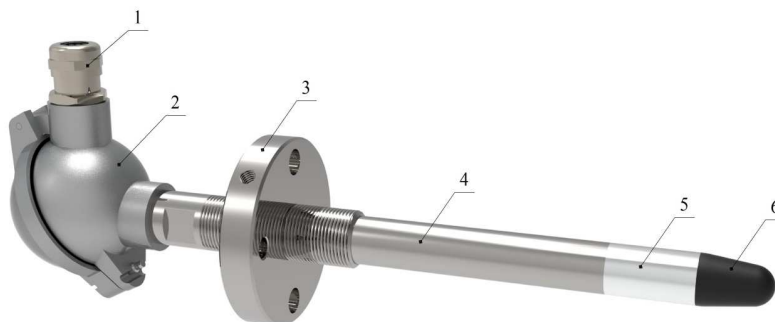
Многолетний опыт производства преобразователей термоэлектрических компанией ООО «Поинт» и разработки в области сверхвысокого давления и применения кованных материалов помогли разработать надежную

⁴ Преобразователи термоэлектрические ТХК 9421 [Электронный ресурс]. – URL: https://omsketalon.ru/sites/default/files/thk_9421_0.pdf (дата обращения: 29.01.2024).

⁵ Wear-resistant thermocouple for internal mixer [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chinathermocouple.com/product/Wear-resistant-thermocouple-for-internal-mixer.html> (дата обращения: 29.01.2024).

⁶ Banburry Thermocouple [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tradeindia.com/products/banburry-thermocouple-2844209.html> (дата обращения: 29.01.2024).

термопару для резиносмесителей. За аналог для разработки термопары была взята термопара типа ТЖК(Ж) немецкой компании HF Mixing Group. Разработка данной термопары заняла свыше двух лет. Было проведено более 100 испытаний для исследования инерционных показателей наконечника термопары, а также прочностных характеристик. На рисунке 2 показана термопара ТП-Б-ТЖК(Ж) компании ООО «Поинт» с наконечником из хромоникелевого сплава, покрытым керамическим напылением. Марка керамического напыления подбиралась с условием обеспечения максимального антифрикционного свойства и абразивной износостойкости наконечника, поскольку при производстве шин используются сажа и оксиды кремния.



1 – латунный кабельный ввод; 2 – алюминиевая клеммная голова; 3 – регулировочный фланец (12X18N10T); 4 – цельноточенный стержень (12X18N10T); 5 – измерительный наконечник из специального хромоникелевого сплава; 6 – покрытие керамическим порошком

Рисунок 2. – Преобразователь термоэлектрический ТП-Б-ТЖК(Ж) для резиносмесителей

Испытания заключались в поэтапном исследовании влияния различных материалов наконечника на инерционные показатели измерения температуры, а также на предел прочности и износостойкость. Сравнительные показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнительные показатели температурной инерции, прочности и износостойкости материалов наконечника

Марка стали	Показатель температурной инерции, с	Предел прочности σ_b , МПа (при 20 °С)	Износостойкость
20	87,6	405	низкая
40Х	101,4	530	низкая
12X18N10T	124,8	450	низкая
12X18N10T поковка	530 МПа	низкая	низкая
Alloy C276	758 МПа	высокая	высокая
Чугун СЧ20	97,8	200	средняя
20Х3МВФ поковка	109,2	785	высокая
Специальный хромоникелевый сплав	48,9	760	высокая

Примечание. Показатели температурной инерции – время, за которое термопара нагрелась с 20 °С до 135 °С в масляном термостате, нагретом до 150 °С.

Также проводились исследования влияния диаметра жил термопары ТЖК(Ж) на инерционные показатели. Чем меньше диаметр жил термопар и размер рабочего спая, тем меньше тратится времени на его нагрев.

Разрабатывались способы уменьшения инерционности термопары в конструкции наконечников, такие как применение теплоотводящих колец из керамики и других материалов. При разработке термопары ТП-Б-ТЖК(Ж) в качестве изоляционного материала использовался стеклонеполненный полиамид. В аналоге термопары компании HF Mixing Group применяется особый вид керамики. По результатам испытаний был сделан вывод, что применение термокомпенсационных колец может улучшить показатели температурной инерции, но показатели надежности готовой термопары резко ухудшаются из-за наличия концентраторов напряжения в конструкции наконечника.

Рассматривался вопрос способа крепления рабочего спая к наконечнику. В качестве чувствительного элемента использовались как термопарный кабель, так и термопарные проводники. Для способа крепления спая использовалась аргонодуговая сварка в среде инертных газов, лазерная сварка, пайка серебряными припоями. У каждого из способов есть свои преимущества и недостатки. В результате длительных испытаний был разработан уникальный метод лазерной сварки рабочего спая к наконечнику, не имеющий аналогов. Данный способ позволяет увеличить площадь контакта рабочего спая и материала наконечника для быстрой передачи тепла.

Для обеспечения износостойкости применялись различные материалы для напыления на наконечник термопары. Любой из материалов, который напыляется на наконечник, увеличивает инерционные показатели готовой термопары. Поэтому покрытие должно отвечать следующим требованиям: быть износостойким (иметь наименьший коэффициент трения) и иметь наименьшую толщину. В таблице 2 указаны сравнительные характеристики порошковых материалов.

Таблица 2. – Сравнение покрытий наконечников термопары

Материал	Износостойкость	Увеличение показателя температурной инерции, с	Толщина, мм	Технология покрытия
Stellite SF6-M	высокая	+35	1,2	напыление с дальнейшим оплавлением
CASTOLIN 28020 Al ₂ O ₃ /3TiO ₂	высокая	+15	0,25	напыление
Специальный керамический порошок	высокая	+10	0,25	напыление

Примечание. Увеличение показателя температурной инерции – средний показатель разницы температурной инерции наконечников после нанесения покрытия и до.

Применялись различные методы присоединения наконечника из хромоникелевого сплава к монтажной части из нержавеющей стали 12X18H10T. Первый способ – аргонодуговая сварка в среде инертных газов с применением специальных присадочных материалов. Данный способ показал низкие показатели по усталостному разрушению наконечника термопары. Трещина в 100% случаев образовывалась именно на сварном шве. Последующая термообработка сварного шва позволяла увеличить срок службы термопар лишь на 2–3 недели. Другой способ – посадка с натягом (или горячая посадка). При постоянной знакопеременной нагрузке и воздействии температуры резиновой смеси наконечники выпрессовывались из защитного стержня. После усталостных испытаний пришли к выводу, что наиболее надежным способом крепления наконечника является специальная технология пайки, которая применяется для производства термопар, работающих при высоком и сверхвысоком давлении. За время промышленной эксплуатации термопар для резиносмесителей компании ООО «Поинт» ни одна из термопар не вышла из строя вследствие повреждения места пайки наконечника к монтажной части.

Показатели температурной инерции для преобразователей термоэлектрических ТП-Б определяются по переходному процессу в режиме простого охлаждения по ГОСТ 6616-94⁷ (п. 8.3).

Для определения показателей тепловой инерции используются две точки:

- интенсивно перемешиваемая вода с температурой 15–20 °С;
- вода с температурой 50–100 °С.

Показатели тепловой инерции, определяемые по ГОСТ 6616-94, не являются информативными для заказчика по следующим причинам:

- измеряемая среда и ее агрегатное состояние у заказчика может быть различным (в частности, резиновая смесь);
- скорость потока и характер движение среды у заказчика могут быть совершенно другими. Понятие «интенсивно перемешиваемая вода» в ГОСТ 6616-94 не урегулировано скоростью или характером движения среды;
- рабочие температуры у заказчика отличаются от двух точек, прописанных в ГОСТ 6616-94.

Исходя из вышеизложенного, для определения показателей температурной инерции термопар на конкретном объекте или изделии заказчика необходимо проводить опытно-промышленную эксплуатацию или полностью восстанавливать условия работы термопары в лабораторных условиях с указанием всех параметров среды в техническом задании заказчика.

Для установления соответствия техническим характеристикам немецкой термопаре производили сравнение графиков показателей температурной инерции в масляном термостате ТЖ-01 ООО «Поинт», нагретом до 150 °С. Точность поддержания температуры масляного термостата составляет ±0,02 °С, градиент температуры по объему термостата не более ±0,02 °С. Термопары погружаются в термостат на 25–30 мм, и фиксируется время набора температуры. Контрольными точками являются температуры 75, 105 и 135 °С.

Графики показателей тепловой инерции преобразователя термоэлектрического ТП-Б-ТЖК(Т) производства ООО «Поинт» и термопар типа ТЖК(Т) компании HF Mixing Group показаны на рисунке 3.

Старый и новый термостаты компании ООО «Поинт» имеют одинаковую стабильность показаний по температуре по всему объему. Единственное – в новом термостате стоит более мощный насос для перемешивания жидкости. Следовательно, отличия в показателях температурной инерции термопары ООО «Поинт» и компании HF Mixing Group заключаются в разности скорости движения среды в термостатах.

⁷ ГОСТ 6616-94 Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – Минск: Межгосударств. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1994. – 15 с.

ООО «Поинт» предоставил ОАО «Белшина» образец термопары ТП-Б-ТЖК(Ж) для проведения опытно-промышленной эксплуатации. В резиносмеситель были установлены две термопары: термопара компании HF Mixing Group в загрузочном устройстве и термопара компании ООО «Поинт» в разгрузочном устройстве. Сравнение графиков набора температуры по трендам, предоставленным компанией ОАО «Белшина», показали хорошие результаты (рисунок 4).

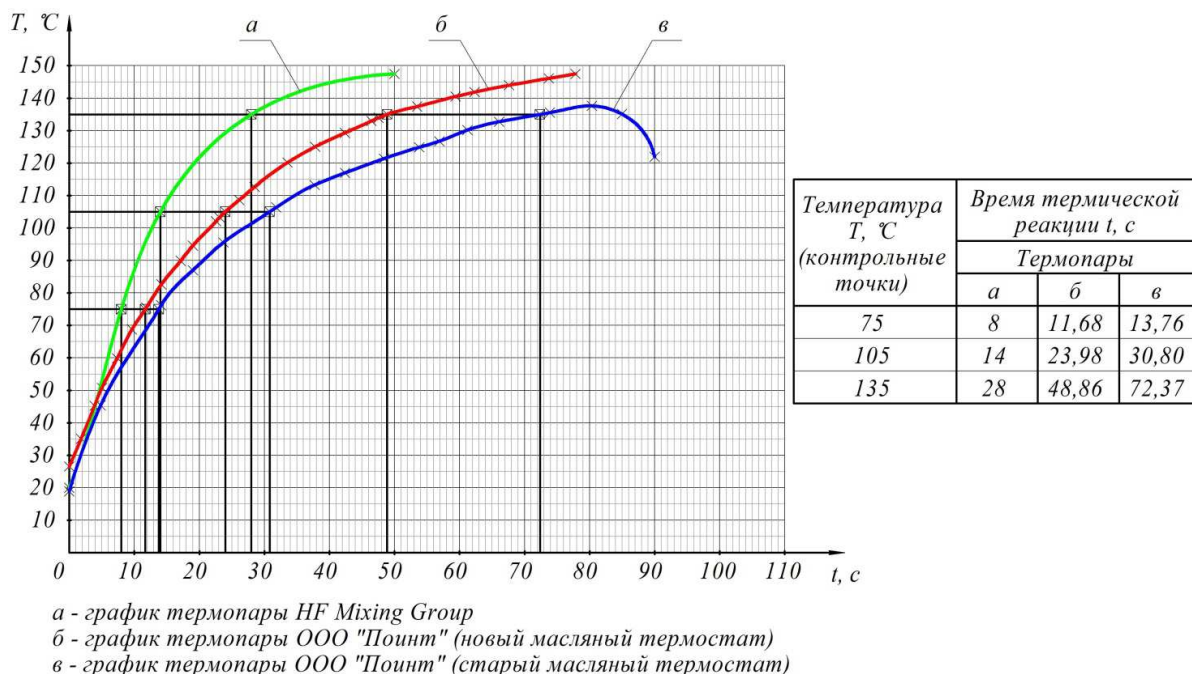


Рисунок 3. – Графики температурной инерции термопары ТП-Б-ТЖК(Ж) и аналога компании HF Mixing Group

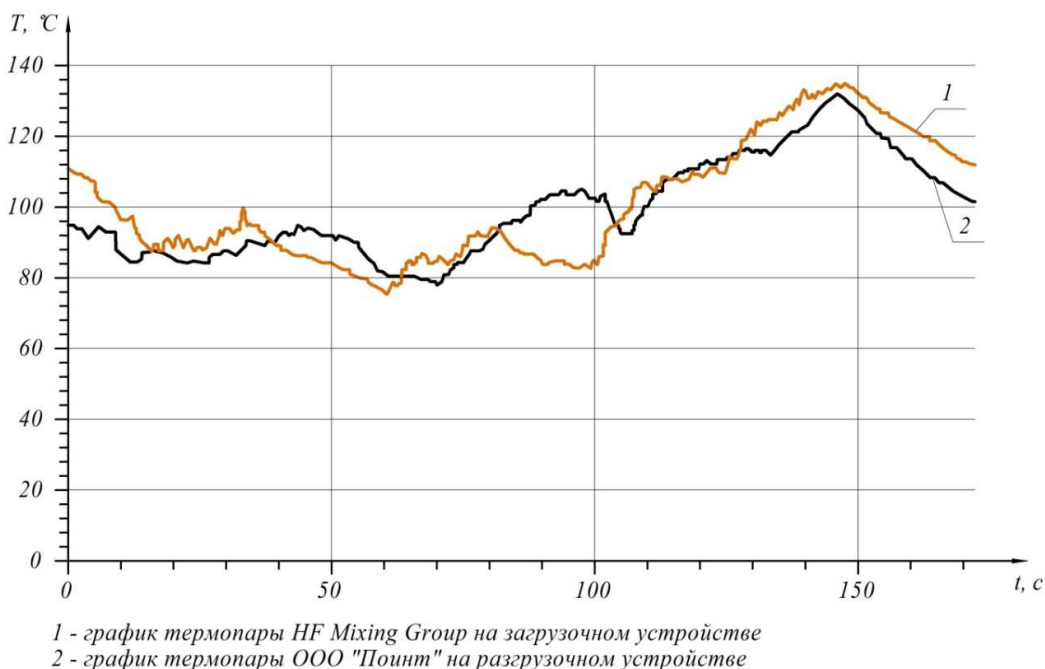


Рисунок 4. – Графики тренда показателей температуры резиносмесителя компании ОАО «Белшина»

Заключение. На основе анализа существующих конструкций термопар были выявлены их преимущества и недостатки, которые были учтены в разработках и исследованиях. В результате опытно-промышленной эксплуатации термопар на предприятии заказчика были достигнуты требуемые прочностные и инерционные характеристики наконечников для термопар. Разработанные компанией ООО «Поинт» термопары успешно

применяются на резиносмесителях компании ОАО «Белшина» и АО «Сибкабель». Благодаря применению современных материалов и уникальных технологий удалось решить сразу три задачи: обеспечение наименьших показателей температурной инерции, высокие прочность и износостойкость термопар для резиносмесителей. Даны рекомендации по проведению опытно-промышленной эксплуатации на конкретных резиносмесителях заказчика для определения показателей температурной инерции. В дальнейшем планируется проводить исследования по улучшению показателей надежности термопар и уменьшению времени температурной инерции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машины и аппараты резинового производства / Б.И. Андрашников, Л.М. Антонов, Д.М. Барсков и др. – М.: Химия, 1975. – 600 с.

REFERENCES

1. Andrashnikov, B.I., Antonov, L.M., Barskov, D.M., Gershman, B.G., Kepersha, L.M., Pinegin, V.A., ... Tsyganok, I.P. (1975). *Mashiny i apparaty rezinovogo proizvodstva*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

**ANALYSIS OF THERMOCOUPLES
FOR MEASURING TEMPERATURE IN RUBBER MIXERS**

N. POPOK

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A. FRIK

(Point LLC, Polotsk)

The article analyzes domestic and foreign thermoelectric converters (thermocouples) for measuring the temperature of the rubber in rubber mixers. The advantages and disadvantages of existing thermocouple designs are considered, and the thermocouple design developed by Point LLC is presented. A comparative analysis of the influence of the material of thermocouple tips, the coating material of the tips and the diameter of the thermocouple wires on the strength characteristics of the finished product, as well as on the indicators of the thermal lag index, is presented. The results of tests for temperature inertia of the developed thermocouples and its analogue are shown. Recommendations are given for conducting pilot-industrial operation during the development and research of new designs of thermocouples for rubber mixers. The results of a joint test of a thermocouple from Point LLC and a foreign analogue are shown in the form of a temperature trend.

Keywords: *thermoelectric transducer (thermocouple), rubber mixer, temperature measurement, thermal lag index.*