

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 006.91:53.088.7

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-3-6-19>



Мониторинг технического состояния эталонов для предотвращения метрологического отказа эталонов в рамках стратегии эксплуатации по фактическому состоянию

Р. А. Тетерук , Н. А. Фирсанов , С. В. Медведевских 

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия
 r.a.teteruk@vniim.ru

Аннотация: Обнаружение и предотвращение метрологических отказов эталонов в процессе эксплуатации – одна из наиболее актуальных и значимых проблем. На практике преобладает плановая стратегия (плановая аттестация, плановый ремонт) эксплуатации эталонов, поэтому метрологические отказы, как правило, выявляются только в ходе периодической аттестации или ремонта.

В то же время существует возможность непрерывного или периодического получения информации о ненормированных метрологических и технических характеристиках эталона, и такой анализ мог бы помочь эксплуатирующему лицу по косвенным признакам сделать вывод о метрологической неисправности эталона или о приближающемся моменте отказа. Однако в настоящее время такая информация редко находит применение.

Цель работы – проанализировать возможность использования мониторинга технического состояния эталонов для своевременного выявления и предотвращения метрологических отказов. Полученные данные позволят повысить достоверность результатов измерений и передачи единиц измерений от этих эталонов, обеспечить возможность перехода от плановой стратегии эксплуатации к эксплуатации по фактическому состоянию.

В качестве метода для анализа результатов наблюдений за техническими характеристиками эталона предложены методы теории разладки. На примере наблюдения за скоростью опускания поршня эталонов давления (грузопоршневых манометров) проведен анализ данных с помощью параметрических и непараметрических методов обнаружения разладки. Результаты выявления метрологического отказа с помощью методов теории разладки совпадают с результатами, полученными с применением более точных эталонов и диагностики.

Выводы исследования свидетельствуют, что мониторинг технического состояния эталонов позволяет в ряде случаев предотвратить метрологический отказ. Следовательно, существует основа для перехода эксплуатирующей организации на стратегию эксплуатации эталонов по фактическому состоянию.

Статья может найти применение у разработчиков, испытателей, специалистов по эксплуатации различных эталонов.

Ключевые слова: эталон, мониторинг технического состояния, разладка, грузопоршневой манометр, эксплуатация по фактическому состоянию, плановая стратегия эксплуатации

Для цитирования: Тетерук Р. А., Фирсанов Н. А., Медведевских С. В. Мониторинг технического состояния эталонов для предотвращения метрологического отказа эталонов в рамках стратегии эксплуатации по фактическому состоянию // Эталон. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 3. С. 6–19. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-3-6-19>.

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 15.07.2026; принята к публикации 25.09.2026.

MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

Monitoring of the Technical Condition of Standards to Prevent Metrological Failure of Standards within the Framework of the Strategy of Operation Based on Actual Condition

Roman A. Teteruk  , Nikita A. Firsanov , Sergei V. Medvedevskikh 

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 r.a.teteruk@vniim.ru

Abstract: The detection and prevention of metrological failures of standards during operation is one of the most urgent and significant problems. The most common strategy for operating standards is the scheduled strategy (scheduled verification, scheduled repair); therefore, metrological failures are usually detected only during periodic verification or repair.

At the same time, it is possible to obtain continuous or periodic information about non-standardized metrological and technical characteristics of the standard, and such an analysis could help the operating party, by indirect signs, to conclude that the standard is metrologically faulty or that a failure is imminent. However, such information is rarely used at present.

The aim of the work is to analyze the possibility of using monitoring of the technical condition of standards for timely detection and prevention of metrological failures. The obtained data will improve the reliability of measurement results and the transfer of measurement units from these standards, and enable the transition from a scheduled operation strategy to operation based on actual condition.

As a method for analyzing the results of observations of the technical characteristics of a standard, methods of change-point detection theory are proposed. Using the example of monitoring the fall rate of the piston of pressure standards (dead-weight testers), the data were analyzed using parametric and non-parametric change-point detection methods. The results of detecting metrological failure using change-point detection theory methods coincide with the results obtained using more accurate standards and diagnostics.

The findings of the study indicate that monitoring the technical condition of standards can, in some cases, prevent metrological failure. Therefore, there is a basis for the operating organization to switch to a strategy of operating standards based on actual condition.

The article may be useful for developers, testers, and specialists involved in the operation of various standards.

Keywords: standard, monitoring of technical condition, change-point detection, dead-weight tester, operation based on actual condition, scheduled operation strategy

For citation: Teteruk RA, Firsanov NA, Medvedevskikh SV. Monitoring of the technical condition of standards to prevent metrological failure of standards within the framework of the strategy of operation based on actual condition. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(3):6–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-3-6-19>.

The article was submitted 27.05.2026; approved after reviewing 15.07.2026; accepted for publication 25.09.2026.

Введение

Существуют два вида контроля метрологических характеристик (МХ) и технических характеристик (ТХ) эталона – периодический и оперативный. К периодическому можно отнести процедуры, предусмотренные методикой периодической аттестации. В ходе оперативного контроля при каждом измерении (или между измерениями) определяются значения МХ или ТХ, которые напрямую или косвенно характеризуют работоспособность эталона. Условно можно разделить эти характеристики на группы:

- неисключенная систематическая погрешность (НСП) (неопределенность по типу В);
- среднеквадратическое отклонение (СКО) (неопределенность по типу А);
- суммарная погрешность или неопределенность;
- нормированные параметры, косвенно характеризующие работоспособность эталона.

НСП или суммарную погрешность (неопределенность) можно проконтролировать только при сличении с эталоном более высокой точности. Как правило, это происходит при периодической аттестации, но бывают случаи, когда существует возможность более частого контроля (например, когда эталон более высокой точности эксплуатируется в том же здании или помещении). В то же время СКО и ряд других нормированных параметров (например, скорость вращения поршня измерительной поршневой системы (ИПС) грузопоршневого манометра) чаще всего можно определять при каждом измерении. Это дает возможность оценивать работоспособность эталона и своевременно принимать решение о техническом обслуживании или внеочередной аттестации. Однако обычно такая оценка производится простым сравнением с каким-либо

заданным пороговым значением наблюдаемой величины.

Практически во всех отраслях промышленности (нефтегазовой, химической, транспортной, энергосетевой и прочих) применяется мониторинг технического состояния оборудования. Цель мониторинга технического состояния оборудования – переход от планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому состоянию. Это позволяет экономить на излишних ремонтах, но в то же время избежать последствий отказов оборудования. Аналогичные подходы могут быть применены и при эксплуатации эталонов. Эксплуатация по фактическому состоянию может позволить избежать ущерба из-за эксплуатации эталона, для которого уже наступил метрологический отказ, а также дает возможность обоснованно увеличить интервал между его аттестациями.

Как сказано выше, текущие значения параметров технического состояния эталонов оцениваются эксплуатирующим персоналом со стабильной периодичностью, то есть процесс мониторинга в части сбора исходных данных реализован. Соответственно для реализации концепции эксплуатации по фактическому состоянию для эталонов необходимо только применить соответствующие методы анализа полученных значений параметров технического состояния эталонов.

Как одно из направлений анализа данных, получаемых в процессе эксплуатации эталонов, для контроля метрологической исправности эталона во время эксплуатации и принятия решения о необходимости проведения технического обслуживания или внеочередной аттестации предлагается использовать методы теории обнаружения разладки. Суть данных методов сводится к тому, что при помощи анализа

ряда наблюдений выявляется момент, в который меняется характер процесса изменения контролируемой величины, хотя ее значение еще не вышло за установленные ограничения.

Задача обнаружения разладки имеет большое значение в промышленном контроле, экономике, биостатистике, телекоммуникациях, технической диагностике и анализе временных рядов [1–4]. В англоязычной литературе близкими терминами к термину «разладка» являются *change-point detection*, *disorder detection*, *abrupt change detection* [1–4].

В общем случае при мониторинге какого-либо процесса разладка может означать:

- переход технологического процесса в нестабильный режим;
- появление внешнего воздействия на систему;
- изменение интенсивности шума;
- структурное изменение временного ряда;
- начало отказа оборудования.

Таким образом, применение методов обнаружения разладки может позволить заблаговременно предсказать метрологический отказ и предотвратить его последствия путем проведения технического обслуживания эталона или периодической аттестации.

Материалы и методы

Теоретическая база

Постановка задачи в терминах теории разладки выглядит следующим образом.

Пусть имеется совокупность независимых наблюдений $X_1, X_2, \dots, X_n$.

При отсутствии разладки предполагается гипотеза однородности:

$$H_0: X_1, X_2, \dots, X_n \sim F.$$

При наличии разладки предполагается существование точки разладки τ , такой что

$$X_1, \dots, X_\tau \sim F_0, X_{\{\tau+1\}}, \dots, X_n \sim F_1, F_0 \neq F_1.$$

Если τ неизвестна, задача сводится к поиску такой точки k , при которой различие между подвыборками $(X_1, \dots, X_k)$ и $(X_{(k+1)}, \dots, X_n)$ становится наибольшим [1–4].

Решению такого рода задач посвящено много работ [1–21]. Все методы решения можно разделить на параметрические и непараметрические.

Параметрические (закон распределения и его параметры известны). К параметрическим

можно отнести методы Стьюдента, Бартлетта, CUSUM и ряд других.

Непараметрические. Примерами непараметрических являются методы Колмогорова-Смирнова, Крамера-фон-Мизеса, Манна-Уитни, Лепажа, некоторые модификации CUSUM. В настоящее время из непараметрических наиболее распространен метод CUSUM, поскольку позволяет достаточно оперативно выявлять разладку (примерно в три раза быстрее, чем карты Шухарта). Однако у данного метода есть ограничение применения: анализируемый процесс должен быть гауссовским.

Методология исследования

Несмотря на сложность алгоритмов обнаружения разладки, многие из них реализованы в различных программных средах. Наиболее мощной в плане инструментария является пакет Mathlab. Однако из-за санкций его невозможно приобрести в Российской Федерации. В то же время существуют свободно распространяемые специализированные языки программирования, предназначенные для обработки статистической информации. Одним из таких языков является язык R, который свободно распространяется в комплекте со средой программирования RGui. На рис. 1 приведен листинг скрипта на языке R определения разладки в ряде наблюдений методом Колмогорова-Смирнова.

Для практического использования хорошо подходит библиотека «срт» для языка R, реализующая параметрические и непараметрические методы обнаружения разладки. Для применения метода CUSUM можно использовать библиотеку «qсс», ориентированную на схемы контроля качества и реализующую кроме метода CUSUM еще множество методов, включая карты Шухарта. На рис. 2 показан листинг скрипта на языке R для анализа ряда наблюдений методом CUSUM для нормального распределения.

Предположим:

- что существует некий эталон, для которого определен перечень нормируемых МХ, ненормируемых МХ и технических характеристик;
- что существует возможность непрерывно или с некоторой периодичностью определять значения этих характеристик.

```
library('cpm')

x <- c(0.11,0.11,0.10,0.11,0.09,0.10,0.11,0.12,0.09,0.10,0.08,0.09,
      0.10,0.09,0.08,0.07,0.08,0.09,0.09,0.06,0.06,0.07,0.07,0.07,0.06)

cpm <- makeChangePointModel(cpmType="Kolmogorov-Smirnov", ARL0=500, startup=15)

for (i in 1:length(x)) {
  cpm <- processObservation(cpm,x[i])
  if (changeDetected(cpm)) {
    print(sprintf("Разладка обнаружена на наблюдении %s",i))
  }
}
```

Фотография выполнена авторами / The photograph is taken by the authors

Рис. 1. Листинг скрипта на языке R определения разладки в ряде наблюдений методом Колмогорова-Смирнова

Fig. 1. Listing of an R script for change-point detection in a series of observations using the Kolmogorov–Smirnov method

```
library(qcc)

x <- c(0.11,0.11,0.10,0.11,0.09,0.10,0.11,0.12,0.09,0.10,0.08,0.09,0.10,0.09,
      0.08,0.07,0.08,0.09,0.09,0.06,0.06,0.07,0.07,0.07,0.06)
q <- cusum(x)
plot(q, chart.all=FALSE)
```

Фотография выполнена авторами / The photograph is taken by the authors

Рис. 2. Листинг скрипта на языке R определения разладки в ряде наблюдений методом CUSUM для нормального распределения

Fig. 2. Listing of an R script for change-point detection in a series of observations using the CUSUM method for a normal distribution

В случае нормированных МХ задача обнаружения метрологического отказа будет заключаться в сравнении полученных МХ с их нормированным значением. В некоторых случаях в технической документации на эталон также могут быть заданы предельно допустимые значения ненормируемых МХ и технических характеристик. В случае превышения этих предельно допустимых значений эталон признается неисправным. Однако специфика метрологического отказа состоит в том, что он напрямую может быть обнаружен только с помощью более высокоточного эталона, вследствие чего в период между аттестациями эталона чаще всего невозможно определить метрологический отказ, потому что неизвестны текущие значения МХ, а значения технических характеристик еще не превысили допустимые значения.

Однако в ряде случаев можно выявить изменение характера деградационных процессов,

происходящих с эталоном. Например, при наблюдении за техническими характеристиками эталона существует возможность выявить момент, в который характер изменения этих характеристик меняется (закон распределения, параметры закона распределения и т. д.). Методы теории разладки как раз и предназначены для выявления таких изменений.

В практическом плане для лица, эксплуатирующего эталон, можно предложить следующий порядок действий.

Сначала необходимо определить метод обнаружения разладки, который наиболее подходит для выявления изменений в ряде наблюдений. Затем производить периодические измерения наблюдаемой величины и обработку результатов измерений с помощью одного или нескольких методов обнаружения разладки.

Для удобства и сравнения объединим основные характеристики наиболее

распространенных методов обнаружения разладки (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

H_0 – нулевая (проверяемая) гипотеза: изменение свойств контролируемого сигнала отсутствует;

H_1 – альтернативная гипотеза: произошло изменение (сдвиг среднего, изменение разброса или формы распределения);

n – общий объем выборки, то есть число результатов измерений в анализируемом ряду;

Таблица 1. Сравнение методов обнаружения разладки

Table 1. Comparison of change-point detection methods

Метод	Нулевая гипотеза H_0 , альтернатива H_1	Основная статистика	Что выявляет	Область применения
Колмогорова–Смирнова	$F_0 = F_1, F_0 \neq F_1$	$D_k = \sup_x F_{k(x)} - G_{k(x)} $	$F_{1(x)} - F_{2(x)}$	зарождающиеся дефекты, неисправности, приводящие к изменению характера сигнала
Крамера–фон Мизеса	$F_0 = F_1, F_0 \neq F_1$	ω_k^2	глобальное изменение распределения	потеря точности и стабильности, любые аномалии
Стьюдента	$\mu_0 = \mu_1, \mu_0 \neq \mu_1$	$t_k = \frac{\bar{X}_{1:k} - \bar{X}_{k+1:n}}{S_p \sqrt{\frac{1}{k} + \frac{1}{n-k}}}$	сдвиг среднего	систематическая погрешность, сдвиг нуля, дрейф (при условии нормальности данных)
Бартлетта	$\sigma_0^2 = \sigma_1^2, \sigma_0^2 \neq \sigma_1^2$	логарифмическая статистика по дисперсиям	изменение дисперсии	проблемы с точностью, нестабильность работы, повышенный уровень шума
Манна–Уитни	однородность распределений, различие в положении	$U = R - \frac{m(m+1)}{2}$	сдвиг положения	нарушение калибровки и смещение нуля, механические повреждения и износ, программные ошибки
Лепажа	однородность по положению и масштабу, различие по положению и/или масштабу	$L = Z_W^2 + Z_A^2$	изменение уровня и/или разброса	сложные неисправности, меняющие одновременно средний уровень сигнала и стабильность прибора
CUSUM	параметр процесса стабилен, после τ параметр меняется	накопленные суммы отклонений	малые и умеренные сдвиги, особенно по среднему	систематическая погрешность, сдвиг нуля, дрейф

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

k – номер рассматриваемой точки разбиения выборки на две части: наблюдения $1, \dots, k$ и $k+1, \dots, n$;

x – текущее значение измеряемой величины (аргумент функции распределения);

$F_0(x), F_1(x)$ – функции распределения контролируемой величины соответственно до и после предполагаемого изменения;

$F_2(x)$ – функция распределения второй сравниваемой выборки;

$F_k(x), G_k(x)$ – эмпирические функции распределения, построенные соответственно по первой ($1, \dots, k$) и второй ($k+1, \dots, n$) частям выборки;

μ_0, μ_1 – математические ожидания (средние значения) до и после изменения;

σ_0^2, σ_1^2 – дисперсии контролируемой величины до и после изменения;

α – принятый уровень значимости критерия;

τ – момент (индекс наблюдения) изменения параметра процесса, то есть точка разладки;

D_k – статистика критерия, равная наибольшему расхождению двух эмпирических функций распределения;

$\sup_x$ – супремум (наибольшее значение) выражения по всем значениям x ;

$|F_k(x) - G_k(x)|$ – абсолютная величина разности эмпирических функций распределения в точке x ;

$F_1(x) - F_2(x)$ – разность теоретических функций распределения сравниваемых выборок, выявляемая критерием;

ω_k^2 – статистика критерия: интегральная (среднеквадратическая) мера расхождения сравниваемых распределений;

$F(x)$ – функция распределения, по которой выполняется взвешивание расхождений;

t_k – статистика критерия для проверки равенства средних двух частей выборки;

$\bar{X}_{1:k}$ – выборочное среднее по наблюдениям с 1-го по i -е;

$\bar{X}_{k+1:n}$ – выборочное среднее по наблюдениям с $(k+1)$ -го по i -е;

S_p – объединенное (совместное) выборочное среднее квадратическое отклонение двух частей выборки;

B – статистика критерия Бартлетта;

m – число сравниваемых групп (частей выборки);

n_i – объём i -й группы, $N = \sum_{i=1}^m n_i$ – суммарный объём;

s_i^2 – выборочная дисперсия i -й группы;

s_p^2 – объединенная оценка дисперсии по всем группам;

U – статистика критерия Манна–Уитни;

R – сумма рангов наблюдений одной из выборок в общем упорядоченном ряду;

L – статистика критерия Лепаж, чувствительная одновременно к сдвигу положения и изменению масштаба;

Z_W – стандартизованная статистика Вилкоксона (компонента, чувствительная к сдвигу положения);

Z_A – стандартизованная статистика Ансари–Брэдли (компонента, чувствительная к изменению масштаба, то есть разброса);

S_i – накопленная сумма отклонений результатов измерений от опорного значения на i -м шаге;

S_i^+ – односторонняя накопленная сумма для выявления положительного сдвига;

X_i, X_j – результат i -го (j -го) измерения;

μ_0 – опорное (номинальное) значение контролируемого параметра;

K – референсное значение (мертвая зона), задающее минимальный выявляемый сдвиг;

h – контрольная граница: выход S_i^+ за пределы h означает обнаружение разладки;

τ – оцениваемый момент изменения параметра процесса.

Выбор метода производится с учетом статистических характеристик случайного процесса изменений во времени, контролируемых метрологических и (или) технических характеристик эталона, а также критериев оценки соответствия таких характеристик обязательным требованиям, установленным для данного конкретного эталона.

Тогда алгоритм обнаружения признаков неисправности эталона может выглядеть следующим образом:

- шаг 1. Ввод измеренного при наблюдении значения. Если количество наблюдений меньше 20, то конец.
- шаг 2. Определяем с помощью выбранного метода, есть ли разладка. Если нет, то конец.
- шаг 3. Если разладка присутствует на более чем двух измерениях, провести обслуживание эталона.
- шаг 4. Если при последующих двух наблюдениях разладка сохраняется, то необходима внеплановая аттестация эталона.

Необходимо отметить, что приведенный алгоритм может быть использован только при определении разладки стационарных процессов.

Преимущества описанного метода:

1) отсутствие необходимости получения дополнительных данных или проведения экспериментов, поскольку необходимые для применения метода данные собираются и анализируются эксплуатирующим лицом в рамках содержания и применения эталона;

2) возможность предупредить метрологический отказ эталона и возможный ущерб от применения неисправного эталона.

Результаты и обсуждение

Оценим применимость описанных методов на примере эталонов давления – грузопоршневых манометров.

Для манометров грузопоршневых основными МХ¹ являются СКО значения эффективной площади ИПС и НСП измерений давления или основная погрешность в зависимости от разряда эталона. В общих технических требованиях ГОСТ 8291–83², типовой методике испытаний МИ 2429-97³ нормируются такие МХ, как скорость опускания поршня и продолжительность свободного вращения поршня. ИПС грузопоршневых манометров, состоящие из неуплотненного поршня и цилиндра, являются основным элементом подобных эталонов. От геометрии ИПС зависят возможность определения значения эффективной площади с необходимым для признания соответствия СКО и точность измерений давления грузопоршневым эталоном в целом. Эффективная площадь зависит от линейных размеров поршня и цилиндра, определяющих величину зазора между ними. В [22] приводятся уравнения, связывающие скорость опускания поршня

и продолжительность его свободного вращения с величиной зазора ИПС. Соответственно изменение со временем значений данных характеристик может свидетельствовать об изменении зазора, ведущему к изменению эффективной площади. В конструкцию прецизионных грузопоршневых манометров могут входить средства оперативного контроля данных характеристик. Либо для определения значений данных характеристик эталона используют тахометр, индикатор часового типа и секундомер, вспомогательное оборудование, также необходимое для дальнейшей передачи единицы от эталона и обычно имеющееся в его составе или вместе с ним применяемое, что делает контроль скорости опускания и продолжительности вращения поршня эталона возможным в ходе эксплуатации.

При неизменной геометрии ИПС неизменными должны оставаться скорость опускания и продолжительность вращения поршня. Изменение геометрии ИПС может иметь постоянный характер в случае нарушения рабочих поверхностей поршня или цилиндра либо временный, связанный с попаданием инородных частиц в зазор либо с образованием пленки на рабочей поверхности. При этом для постоянных изменений геометрии характерно увеличение эффективной площади, связанное с увеличением скорости опускания и продолжительности вращения, а для временных – ее уменьшение, связанное с уменьшением скорости опускания и продолжительности вращения. Для оперативного контроля удобнее применять скорость опускания, т. к. для ее определения необходимо потратить не более 3 мин времени, тогда как продолжительность свободного вращения для большинства манометров грузопоршневых должна быть более 7 мин и может превышать 1 час. Для возможности применения методов обнаружения разладки необходимо провести не менее 20 наблюдений исследуемой характеристики, поэтому наблюдение предлагается проводить после каждого применения эталона для передачи единицы.

Приведем два примера применения методов теории разладки при контроле скорости опускания поршня ИПС грузопоршневых манометров. В примере 1 была обнаружена разладка, свидетельствующая о том, что необходимо

¹ Об утверждении Государственного первичного эталона единицы давления – паскаля и государственной поверочной схемы для средств измерений избыточного давления до 4000 МПа : Приказ Росстандарта от 14.04.2026 № 731.

² ГОСТ 8291–83 Манометры избыточного давления грузопоршневые. Общие технические требования.

³ МИ 2429–97 «Государственная система обеспечения единства измерений. Манометры грузопоршневые. Метрологические и технические характеристики. Виды метрологического контроля (МР МОЗМ № 110)».

провести техническое обслуживание ИПС. В примере 2 с помощью методов обнаружения разладки удалось определить момент метрологического отказа эталона.

Пример 1

Рассмотрим пример контроля скорости опускания в ходе эксплуатации ИПС из состава манометра грузопоршневого МГП-В.

Рассмотрим пример контроля скорости опускания в ходе эксплуатации ИПС из состава манометра газового грузопоршневого МГП, модификации МГП-В класса точности 0,005 (номер в реестре средств измерений 52506-16). Для данной модификации в описании типа средства измерений установлено предельное значение скорости опускания поршня 1 мм/мин, что также соответствует требованиям, установленным к подобным грузопоршневым манометрам в МИ 2429-97. Для контроля положения поршня использовались лазерные триангуляционные измерители, погрешность измерения перемещения которых не превышает 0,05 мм, совместно с цифровым секундомером. Результаты контроля представлены в табл. 2.

После 19-го контроля скорости опускания было также отмечено уменьшение продолжительности вращения. Разладка была

обнаружена параметрическими методами Колмогорова-Смирнова и тестом Петтитта, основанном на статистике Манна-Уитни, между 19-м и 20-м значениями ряда, в связи с чем проведено техническое обслуживание ИПС, в ходе которого было обнаружено и устранено загрязнение системы. Параметрические методы разладку не обнаружили. Таким образом, корректный выбор метода обнаружения разладки обуславливает точность и достоверность обнаружения неисправности эталона.

После технического обслуживания контроль скорости опускания был продолжен, результаты представлены в табл. 3.

После проведения ТО в течение 25 применений разладка не была обнаружена ни одним из методов, что свидетельствует о возможности дальнейшего применения эталона по назначению без необходимости в проведении дополнительных процедур.

Пример 2

Контроль скорости опускания также велся в ходе эксплуатации ИПС из состава манометра грузопоршневого МП, модификации МП-600 (номер в реестре средств измерений 52189-16). В отличие от рассмотренной в первом примере газовой ИПС, в МП-600

Таблица 2. Результаты наблюдения за скоростью опускания ИПС МГП-В

Table 2. Results of monitoring the fall rate of the PSa MGP-V piston

№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин
1	0,11	11	0,08	21	0,07
2	0,11	12	0,09	22	0,07
3	0,10	13	0,10	23	0,07
4	0,11	14	0,09	24	0,07
5	0,09	15	0,08	25	0,13
6	0,10	16	0,11		
7	0,11	17	0,10		
8	0,12	18	0,10		
9	0,09	19	0,09		
10	0,10	20	0,07		

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

Таблица 3. Результаты наблюдения за скоростью опускания ИПС МГП-В после технического обслуживания

Table 3. Results of monitoring the fall rate of the PSa MGP-V after maintenance

№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин
1	0,12	11	0,11	21	0,11
2	0,11	12	0,10	22	0,08
3	0,12	13	0,08	23	0,10
4	0,11	14	0,09	24	0,08
5	0,11	15	0,09	25	0,09
6	0,1	16	0,10		
7	0,11	17	0,10		
8	0,11	18	0,11		
9	0,10	19	0,10		
10	0,09	20	0,11		

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

используется трансформаторное масло в качестве рабочей среды. Отличие вида и свойств рабочей среды обуславливает для таких грузопоршневых манометров более строгие требования к техническим характеристикам: для данной модификации скорость опускания

не должна превышать 0,3 мм/мин. Такое требование к значению скорости опускания также не противоречит МИ 2429–97. Вспомогательное оборудование, использованное для контроля, соответствовало указанному в примере 1. Результаты контроля представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты наблюдения за скоростью опускания ИПС МП-600

Table 4. Results of monitoring the fall rate of the PSa MP-600

№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин	№ п/п	Скорость опускания, мм/мин
1	0,07	11	0,07	21	0,07	31	0,06
2	0,08	12	0,07	22	0,07	32	0,06
3	0,07	13	0,06	23	0,06	33	0,08
4	0,07	14	0,06	24	0,08	34	0,07
5	0,05	15	0,07	25	0,08	35	0,07
6	0,07	16	0,07	26	0,05	36	0,07
7	0,07	17	0,06	27	0,07	37	0,07
8	0,07	18	0,07	28	0,06	38	0,07
9	0,05	19	0,07	29	0,06	39	0,07
10	0,08	20	0,06	30	0,07	40	0,12

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

Параллельно с контролем скорости опускания после каждых 10 применений эталона для передачи единицы проводилось сличение с ГВЭТ 23–1–2014 с целью определения эффективной площади. Результаты определения эффективной площади представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты определения эффективной площади ИПС

Table 5. Results of determining the effective area of the PSa

№ п/п	Результаты определения эффективной площади
0	0,050 087 8
10	0,050 087 8
20	0,050 087 7
30	0,050 087 7
40	0,050 089 3

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

Определение эффективной площади с применением более точного эталона показало наличие изменения эффективной площади в период с 30-го по 40-е применение. Изменение составило $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$, что превышает допустимую для класса точности 0,005 погрешность значения эффективной площади, примерно равную 0,002 5 % от значения эффективной площади по МИ 2429-97, и соответствует изменению скорости опускания на 0,02 мм/мин [22].

Разладка по методу Стьюдента и CUSUM для ряда данных из табл. 4 обнаружена с 34-го применения, что соответствует результатам сличений с более точным эталоном. В то же время методы Крамера-фон-Мизеса и Колмогорова-Смирнова разладку не обнаружили.

Итак, методами теории разладки были своевременно обнаружены изменения нормируемых метрологических характеристик эталона без сличений с эталоном более высокой точности. В итоге предотвращен потенциальный ущерб от эксплуатации неисправного эталона.

Заключение

Применение в процессе эксплуатации эталонов подходов, используемых при мониторинге технического состояния оборудования, позволяет в ряде случаев путем наблюдения за метрологическими и техническими характеристиками эталона своевременно выявить деградационные процессы и предупредить неисправность. Это, в свою очередь, позволяет перейти от стратегии планового обслуживания (аттестации, ремонта) к стратегии эксплуатации эталона по фактическому состоянию, что может привести к снижению затрат на эксплуатацию из-за обоснованного увеличения интервала между аттестациями и уменьшить риск ущерба от использования неисправного эталона.

Современные методы обнаружения разладки могут быть успешно применены для анализа информации, получаемой в процессе эксплуатации эталонов для выявления метрологической неисправности эталонов и предотвращения их метрологических отказов. Апробация этих методов на примере анализа временных рядов наблюдений скорости опускания поршня ИПС грузопоршневых манометров показала результативность предлагаемых подходов.

Благодарности: Все исследования проводились в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Acknowledgments: All studies were carried out at the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

Вклад авторов: Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования.

Contribution of the authors: All authors contributed to the concept and design of the study.

Конфликт интересов: Медведевских С. В. является главным редактором журнала «Эталон. Стандартные образцы», но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Авторы являются сотрудниками учредителя журнала. Однако при написании рукописи статьи авторы руководствовались соображениями научной ценности полученного материала и заявляют о беспристрастности оценки полученных данных. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Conflict of interest: Medvedevskikh S. V. is the editor-in-chief of the journal “Measurement Standards. Reference Materials”, but this has nothing to do with the decision to publish this article. The article has undergone the peer review procedure adopted by the journal. The authors are employees of the journal’s founder. However, the authors were guided by reasons of the scientific value of the obtained material and declare the impartiality of the assessment of the

obtained data. The authors declared no other conflicts of interest.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Basseville M., Nikiforov I. V.* Detection of abrupt changes: theory and application. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1993. 653 p.
2. *Tartakovsky A. G., Nikiforov I. V., Basseville M.* Sequential analysis: hypothesis testing and changepoint detection. Boca Raton : CRC Press, 2014. 605 p.
3. *Chen J., Gupta A. K.* Parametric statistical change point analysis. 2nd ed. New York : Birkhäuser, 2012. 271 p.
4. *Poor H. V., Hadjiladis O.* Quickest detection. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 248 p.
5. *Козинев И. А., Мальцев Г. Н.* Модифицированный алгоритм обнаружения разладки случайного процесса и его применение при обработке многоспектральных данных // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3 (58). С. 9–17.
6. *Морозов В. А.* Обнаружение разладок временных рядов с использованием копула // Теория вероятностей, математическая статистика и их приложения: сб. науч. ст. Вып. 3. Минск : РИВШ, 2010. С. 261–264. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/9230>
7. *Шелухин О. И., Филинова А. С.* Обнаружение сетевых аномальных выбросов трафика методом разладки Бродского-Дарховского // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2013. Т. 7, № 10. С. 116–119.
8. *Артемов А.* Обзор некоторых статистических методов скорейшего обнаружения [Электронный ресурс] // MachineLearning.ru [сайт]. [2014]. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/7/73/Razladki.pdf> (дата обращения: 13.08.2026).
9. *Колмогоров А. Н., Прохоров Ю. В., Ширяев А. Н.* Вероятностно-статистические методы обнаружения спонтанно возникающих эффектов // Теория вероятностей, теория функций, механика : Сборник обзорных статей 5. К 50-летию Института. Труды Математического института АН СССР. Т. 182. М. : Наука, 1988. С. 4–23. <https://www.mathnet.ru/rus/tm1919>
10. *Тартаковский А. Г.* Асимптотическая оптимальность в байесовских задачах наискорейшего обнаружения при ограничении на глобальную вероятность ложной тревоги // Теория вероятностей и ее применения. 2008. Т. 53, вып. 3. С. 472–499. <https://doi.org/10.1137/S0040585X97983754>
11. *Tartakovsky A. G., Pollak M., Polunchenko A. S.* Third-order asymptotic optimality of the generalized Shiryaev–Roberts changepoint detection procedures // Теория вероятностей и ее применения. 2011. Т. 53, вып. 3. С. 534–565. <https://doi.org/10.4213/tvp4406>
12. *Granjon P.* The CuSum algorithm – a small review // INP Phelma [сайт]. [2013]. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00914697> (дата обращения: 13.08.2026).
13. *Пупков А. В.* Скорейшее обнаружение разладки авторегрессионных процессов при неизвестной конечной модели // Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем : Материалы VI Международной молодежной научной конференции, Томск, 24–26 мая 2018 г. / Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. С. 191–195.
14. *Бродский Б. Е., Дарховский Б. С.* Проблемы и методы вероятностной диагностики // Автоматика и телемеханика. 1999. № 8. С. 3–50.
15. *Артемов А. В.* Математические модели временных рядов с трендом в задачах обнаружения разладки: спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : дисс. ... канд. физ.-мат. наук / А. В. Артемов; ФГБУ науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. Москва, 2016. 122 с. Место защиты: ФИЦ ИУ РАН. URL: <https://www.dissercat.com/content/matematicheskie-modeli-vremennykh-ryadov-s-trendom-v-zadachakh-obnaruzheniya-razladki?ysclid=msrbdqtqas688046289> (дата обращения: 13.08.2026).
16. *Васильченко С. Г.* Алгоритм обнаружения моментов разладки случайной последовательности // Фундаментальная и прикладная математика. 2002. Т. 8, № 3. С. 655–665.

17. Элементарное введение в геостатистику / М. Ф. Каневский [и др.] // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов № 11 / М. Ф. Каневский [и др.]. М. : ВИНТИ, 1999. 136 с.
18. Бенинг В. Е., Королёв В. Ю. Некоторые статистические задачи, связанные с распределением Лапласа // Информатика и её применение. 2008. Т. 2, вып. 2. С. 19–34.
19. Обобщенное распределение Лапласа как предельное для случайных сумм и статистик, построенных по выборкам случайного объема / В. Ю. Королев [и др.] // Информатика и её применение. 2012. Т. 6, вып. 4. С. 34–39.
20. Ковалевский А. П. Статистические критерии апостериорного обнаружения разладки временных рядов и их применения : спец. 05.13.17: Теоретические основы информатики : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А. П. Ковалевский; Институт прикладной математики ДВО РАН. Новосибирск, 2018. 272 с. Место защиты: Ин-т систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН. URL: <http://www.iis.nsc.ru/files/Kovalevskiy.dis.pdf>
21. Филаретов Г. Ф., Репин Д. С. Методические аспекты исследования алгоритмов обнаружения разладки временных рядов // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2020. № 1. С. 27–32.
22. Жоховский М. К. Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во стандартов, 1980. 311 с.

REFERENCES

1. Basseville M, Nikiforov IV. Detection of abrupt changes: theory and application. Englewood Cliffs: Prentice Hall; 1993. 653 p.
2. Tartakovsky AG, Nikiforov IV, Basseville M. Sequential analysis: hypothesis testing and changepoint detection. Boca Raton: CRC Press; 2014. 605 p.
3. Chen J, Gupta AK. Parametric statistical change point analysis. 2nd ed. New York: Birkhäuser; 2012. 271 p.
4. Poor HV, Hadjilias O. Quickest detection. Cambridge: Cambridge University Press; 2009. 248 p.
5. Kozinov IA, Maltsev GN. Modified algorithm of the detection of abrupt changes in a casual process and its use for processing of multispectral data. *Information and Control Systems*. 2012;3(58):9–17. (In Russ.).
6. Morozov VA. Detection of time series disorders using a copula. In: *Probability theory, mathematical statistics and their applications: a collection of scientific articles*. Iss. 3. Minsk: RIVS; 2010. P. 261–264. (In Russ.). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/9230>
7. Shelukhin OI, Filinova AS. Detection of network anomalous traffic emissions by the Brodsky-Darkhovskiy decomposition method. *T-Comm*. 2013;7(10):116–119. (In Russ.).
8. Artyomov A. Review of some statistical methods of early detection. (In Russ.). Available form: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/7/73/Razladki.pdf> [Accessed 13 August 2026].
9. Kolmogorov AN, Prokhorov YuV, Shiryaev AN. Probabilistic and statistical methods for detecting spontaneously occurring effects. In: *Probability theory, theory of functions, mechanics : A collection of review articles 5. Dedicated to the 50th anniversary of the Institute. Proceedings of the Mathematical Institute of the USSR Academy of Sciences*. Vol. 182. Moscow: Nauka; 1988. P. 4–23. (In Russ.). <https://www.mathnet.ru/rus/tm1919>
10. Tartakovsky AG. Asymptotic optimality in bayesian changepoint detection problems under global false alarm probability constraint. *Theory of Probability & Its Applications*. 2008;53(3):472–499. (In Russ.). <https://doi.org/10.1137/S0040585X97983754>
11. Tartakovsky AG, Pollak M, Polunchenko AS. Third-order asymptotic optimality of the generalized Shiryaev–Roberts changepoint detection procedures. *Theory of Probability & Its Applications*. 2011;53(3):534–565. <https://doi.org/10.4213/tvp4406>
12. Granjon P. The CuSum algorithm – a small review. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00914697> [Accessed 13 August 2026].
13. Pupkov AV. Early detection of the breakdown of autoregressive processes with an unknown finite model. In: *Mathematical and software support for information, technical and economic systems: Proceedings of the VI International Youth Scientific Conference*, 24–26 May 2018, Tomsk, Russia. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University; 2018. P. 191–195. (In Russ.).
14. Brodskii BE, Darkhovskii BS. Problems and methods of probabilistic diagnostics. *Avtomatika i telemekhanika*. 1999;8:3–50. (In Russ.).
15. Artyomov AV. Mathematical models of time series with a trend in problems of disorder detection. PhD (phys.-math.) sci. diss., IPU RAN. (In Russ.). Available at: <https://www.dissercat.com/content/matematicheskie-modeli-vremennykh-ryadov-s-trendom-v-zadachakh-obnaruzheniya-razladki?ysclid=msrbdqtqas688046289> [Accessed 13 August 2026].
16. Vasilchenko SG. Instant of disorder of random sequence detection's algorithm. *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika*. 2002;8(3):655–665. (In Russ.).

17. Kanevskij MF, Dem'yanov VV, Savel'eva EA, Chernov SYu, Timonin VA. An elementary introduction to geostatistics. In: Kanevskij MF, Dem'yanov VV, Savel'eva EA, Chernov SYu, Timonin VA. An elementary introduction to geostatistics. Problemy okruzhayushchej sredy i prirodnyh resursov № 11. Moscow: VINITI; 1999. 136 p. (In Russ.).
18. Bening VE, Korolyov VYu. Some statistical problems related to the Laplace distribution. *Informatics and Applications*. 2008;2(2):19–34. (In Russ.).
19. Korolev VYu, Bening VE, Zaks LM, Zeifman AI. Generalized Laplace distribution as a limit law for random sums and statistics constructed from samples with random sizes. *Informatics and Applications*. 2012;6(4):34–39. (In Russ.).
20. Kovalevskij AP. Statistical criteria for a posteriori detection of time series alignment and their application. PhD (phys.-math.).sci. diss., IPM DVO RAN. (In Russ.). Available at: <http://www.iis.nsc.su/files/Kovalevskiy.dis.pdf>
21. Filaretov GF, Repin DS. Methodological aspects of research of algorithms for detecting time series breakdown. *Informacionnye tehnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*. 2020;1:27–32. (In Russ.).
22. Zhohovskij MK. Theory and calculation of devices with a non-sealed piston. 3rd ed., revised and add. Moscow: Publishing House of Standards; 1980. 311 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тетерук Роман Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского отдела госэталонов в области измерений давления, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: r.a.teteruk@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8057-5220>

Фирсанов Никита Александрович – и. о. руководителя лаборатории госэталонов и научных исследований в области измерений избыточного давления и разности давлений, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: n.a.firsanov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2495-9959>

Медведевских Сергей Викторович – канд. техн. наук, руководитель отделения механических измерений, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: msv@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Teteruk – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Department of State Measurement Standards in the Field of Pressure Measurements, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: r.a.teteruk@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8057-5220>

Nikita A. Firsanov – Head of the Laboratory of State Measurement Standards and Scientific Research in the Field of Overpressure and Pressure Difference Measurements, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: n.a.firsanov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2495-9959>

Sergei V. Medvedevskikh – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Mechanical Measurements, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: msv@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>