

## ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ СРЕД ПО ПРОМЫСЛОВЫМ ТРУБОПРОВОДАМ

### APPLICATION OF CONTROL CHARTS TO MONITOR THE STABILITY OF FLUID TRANSPORTATION PROCESS BY FIELD PIPELINES

**Г. И. Середжинова**  
**Galiya I. Seredzhinova**

ООО «РН-БашНИПинефть»,  
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,  
Ufa, Russian Federation

**А. В. Алфёров**  
**Aleksey V. Alferov**

ООО «РН-БашНИПинефть»,  
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,  
Ufa, Russian Federation

**П. В. Виноградов**  
**Pavel V. Vinogradov**

ООО «РН-БашНИПинефть»,  
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,  
Ufa, Russian Federation

**Р. И. Валиахметов**  
**Rustam I. Valiakmetov**

ООО «РН-БашНИПинефть»,  
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,  
Ufa, Russian Federation

**Д. А. Небогин**  
**Dmitriy A. Nebogin**

ПАО НК «Роснефть»,  
г. Москва, Российская Федерация

Rosneft Oil Company PJSC,  
Moscow, Russian Federation

Статья посвящена применению контрольных карт для мониторинга стабильности процесса транспортировки сред по промышленным трубопроводам.

Мониторинг технологического режима работы промышленных трубопроводов является одним из ключевых процессов, обеспечивающих их эксплуатационную эффективность. Первостепенной задачей мониторинга является своевременное обнаружение изменений режима работы трубопроводной системы, соответствующих ее выходу из нормального технологического состояния. В статье рассмотрены методы мониторинга с использованием контрольных карт. Применение контрольных карт позволяет на фоне собственной изменчивости, обусловленной тем, что любой технологический процесс характеризуется разбросом значений контролируемых величин, обнаружить изменчивость, вызываемую несистемными причинами. С использованием метода контрольных карт определяются границы системной вариативности параметров процесса. Процесс применения контрольных карт при анализе замеров параметров технологического режима при транспортировке сред по трубопроводам легко автоматизируется. Это позволяет оператору или инженеру обеспечивать мониторинг процесса транспортировки сред в условиях получения большого потока информации разного формата в режиме реального времени.

В данной статье представлены методика и рекомендации построения контрольных карт, а также результаты их применения для контроля стабильности процесса транспорта продукции по промышленным трубопроводам на тестовых данных. В качестве показателя стабильности процесса использованы значения замеров давления на участке трубопровода. Тестирование контрольных карт для мониторинга отклонений процесса транспорта продукции по промышленным трубопроводам показало хорошее согласование истинного и расчетного времени выхода процесса из состояния стабильности, а также, что наилучшие результаты имеют карты индивидуальных значений и карты кумулятивных сумм.

#### Ключевые слова

промышленный трубопровод;  
контрольные карты Шухарта;  
карты кумулятивных сумм;  
мониторинг стабильности  
процесса; повышение надежности  
трубопроводов

This paper describes the application of control charts to monitor the stability of fluid transportation by field pipelines.

One of the key processes for operational effectivity is an analysis of the technical regime of field pipelines. It is valuable to identify a shift from an optimal technological regime due time. In this paper, we discussed methods to monitor using control charts. An application of control charts helps to detect fluctuations caused by non-systemic reasons despite the presence of fluctuation produced by controlled systemic parameters. Using the method of control charts makes it possible to identify bounds of the variability of systemic parameters. Monitor using the control charts can be simply automated. It is very advantageous in a situation with a huge stream of data of a different kind.

In this paper methodology and recommendations to plot the control charts are presented. Also, the results of the application of this methodology to control the stability of fluid transportation by field pipelines are published. As the stability criteria, the values of inner pressure are used. Comparison of the field data with the time of a system destabilization estimated using the methodology shows good agreement. Moreover, it was shown that maps charts of individual values and charts of cumulative amounts have better results.

### Введение

Показатели работы любого технологического процесса не постоянны во времени. Это связано с наличием значительного количества воздействующих на процесс факторов. При мониторинге показателей технологического процесса возникает задача определения диапазонов вариации значений данных показателей, соответствующих нормальному режиму работы объекта. В случае мониторинга режима работы разветвленной сети промышленных трубопроводов с контрольно-измерительных приборов и по данным ручных замеров ежедневно поступает большой объем информации. Обработка оператором всего объема данной информации вручную не представляется возможной. Фиксация нарушений в работе объектов зачастую происходит только тогда, когда показатели достигают критического уровня и режим работы нарушен существенно. Одним из способов повышения оперативности выявления подобных нарушений в работе промышленных трубопроводных систем и предиктивного реагирования на них является применение статистических методов с целью выявления случаев выхода за границы системной изменчивости.

В данной статье рассмотрено применение методологии контрольных карт для определения диапазонов отклонений значений технологических показателей работы промышленных трубопроводов, которые можно объяснить системной изменчивостью условий осуществления процесса. Контрольная карта представляет собой графический инструмент анализа показателей работы процесса с учетом их статистических изменений, с помощью кото-

### Keywords

field pipelines; Shewhart control charts; cumulative sum charts; process stability control; pipelines reliability improving

рого возможно контролировать отклонение показателей стабильности транспортировки сред по трубопроводам от целевых (опорных) значений для оперативного воздействия и устранения причин отклонения [1, 2].

### Методика

В этом разделе рассмотрим общий подход и особенности применения контрольных карт для мониторинга стабильности процесса транспорта продукции по промышленным трубопроводам. В представленной работе были использованы пять видов контрольных карт:

— карты Шухарта:

- 1) карты индивидуальных значений ( $X$ ) и скользящих размахов ( $R_m$ );
- 2) карты средних ( $\bar{X}$ ) и размахов;
- 3) карты медиан ( $\tilde{X}$ ) и размахов ( $R$ );
- 4) карты средних ( $\bar{X}$ ) и выборочных стандартных отклонений ( $s$ );

— карта кумулятивных сумм:

- 5) cusum карта.

Мониторинг отклонений показателей технологического режима в работе промышленных трубопроводов с использованием контрольных карт выполняется в два этапа. На первом этапе исследования процесса осуществляется сбор и подготовка статистических данных для расчета параметров контрольных карт. Ключевым требованием для применяемых данных является их соответствие стабильному режиму работы исследуемого объекта. Для промышленных трубопроводов в качестве основного контролируемого показателя используются замеры давления. В качестве дополнительных показателей можно использовать данные замеров расхода транспортируемой

продукции. Для построения карт Шухарта необходимы данные, сформированные из значений замеров показателей процесса через условно равные интервалы. Интервал времени, в течение которого производится выборка данных замеров показателей работы промышленных трубопроводов, может быть выбран как характерное время прохождения потока транспортируемой продукции от начала до конца трубопровода. Группировка данных производится для учета предполагаемой однородности выборок в зависимости от объединяющих признаков. Например, данные работы наземного трубопровода в дневное время и ночное время можно объединить в разные группы, чтобы учесть однородность измеряемых показателей работы в условиях влияния различных температур окружающего воздуха. 25 подгрупп с объемом выборок не менее 5 единиц рассматривают как приемлемое количество для построения контрольных карт [2]. Если измерения или изменения контролируемого показателя производятся очень медленно по сравнению со скоростью протекания процесса на промежутке времени сбора данных, то такие данные не группируют и объем выборки равен 1.

Во втором этапе, после построения и настройки контрольных карт, осуществляется непосредственно мониторинг состояния технологического процесса. Если значения контролируемых показателей находятся внутри диапазона контрольных границ, то делается вывод, что процесс характеризуется стабильным состоянием, каких-либо несистемных изменений нет. Выход значений контролируемых показателей за контрольные границы указывает на то, что произошло не характерное для процесса изменение состояния и что процесс может быть неконтролируемым. Диапазон контрольных границ устанавливается в предположении о том, что значения замеров контролируемого параметра подчиняются нормальному закону распределения. Типовым для карт Шухарта является применение контрольных границ на расстоянии  $\pm 3$  стандартных отклонения от центральной линии. При этом, примерно 99,7 % значений замеров попадает в этот диапазон, при условии, что процесс находится в статистически установленном состоянии.

Для контроля стабильности транспорта сред также использовались карты кумулятивных сумм. Карты кумулятивных сумм (cusum-метод) позволяют обнаружить изменения при-

близительно в три раза быстрее, чем карты Шухарта, они более чувствительны к изменению наблюдаемой величины, для данных с малым стандартным отклонением рекомендуется использовать cusum-метод [3].

Методика построения контрольных карт широко представлена в литературе и отражена, в том числе, в отечественных стандартах [1–3]. Для построения контрольной карты необходимо определить номинальное значение контрольного показателя — центральную линию (CL) и допустимые границы изменчивости показателя — верхнюю (UCL) и нижнюю (LCL) контрольные границы. В качестве номинального значения можно принять среднее арифметическое ( $\bar{X}$ ) или средний размах ( $\bar{R}$ ). Отклонение показателя, как уже отмечалось ранее, определяется как  $\pm 3\sigma$ , где  $\sigma$  — известное стандартное отклонение совокупности или его оценка. Таким образом, контрольные границы определяются согласно формулам [2]:

$$U_{CL}(\bar{X}) = \bar{X} + 3\sigma(\bar{X}), L_{CL}(\bar{X}) = \bar{X} - 3\sigma(\bar{X}), \quad (1)$$

$$U_{CL}(R) = \bar{R} + 3\sigma(R), L_{CL}(R) = \bar{R} - 3\sigma(R). \quad (2)$$

Карты кумулятивных сумм строятся с некоторыми отличиями. Вычисляются накопленные (кумулятивные) суммы отклонений отдельных значений наблюдаемого показателя от опорного значения ( $k$ ):

$$S = \sum_i (x_i - k). \quad (3)$$

Опорное значение устанавливается исходя из специфики, поставленной в статье задачи, как среднее значение наблюдаемого показателя за предыдущий период стабильного состояния процесса. Интерпретация кумулятивных карт производится с помощью накладываемых масок [3]. Выход значения наблюдаемого показателя за границы маски и является сигналом о необходимости вмешательства в контролируемый процесс.

### Результаты

В данном разделе представлены результаты апробации контрольных карт на синтетических данных. Синтетические данные были получены на основе динамического гидравлического моделирования трубопровода диаметром 219 мм и длиной 75000 м. Перекачиваемая среда — подготовленная нефть. Было смоделировано две ситуации, которые повлияли на режим работы трубопровода: 1) изменение расхода перекачки в момент времени 4320 мин от начала наблюдения; 2) об-

разование утечки на расстоянии 30000 м от начала трубопровода, в момент времени 4320 мин от начала наблюдения.

После построения и применения карт получили, что наилучшей прогнозной способностью обладают карты индивидуальных значений, а также карты кумулятивных сумм с абсолютной ошибкой 0 мин, для остальных карт ошибка составляет в пределах от 7 до 10 мин. Такую погрешность можно объяснить методикой усреднения и деления на подгруппы. В таблице 1 представлены полученные результаты.

Для приближения исходных данных к реальным были проведены расчеты с теми же исходными данными, но с наложением шума. Расчеты показали (таблица 2), что наилучшей

прогнозной способностью обладают карты средних ( $\bar{X}$ ) и размахов ( $R$ ), карты средних ( $\bar{X}$ ) и выборочных стандартных отклонений ( $s$ ) и карты кумулятивных сумм с ошибкой 30 мин.

Пример настройки и применения карты индивидуальных значений для данных с шумом представлен на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что в точке 4510 с процесс вышел из состояния стабильности, так как график вышел за контрольные границы. На рисунке 2 представлен результат расчетов для карт кумулятивных сумм для данных с шумом. Из рисунка 2 видно, что в момент времени 4350 с процесс вышел из состояния стабильности, был обнаружен сдвиг в процессе перекачки нефти в трубопроводе.

Таблица 1. Результаты расчетов контрольных карт

№ кейса	Метод контроля	Истинное время смены режима, мин	Время обнаружения смены режима работы с использованием контрольных карт, мин	Погрешность, мин
1	$X$ карта и $R_m$ карта	4320	4325,0	5,0
1	$\bar{X}$ карта и $R$ карта	4320	4327,5	7,5
1	$\tilde{X}$ карта и $R$ карта	4320	4327,5	7,5
1	$\bar{X}$ карта и $s$ карта	4320	4327,5	7,5
1	cusum карта	4320	4320,0	0,0
2	$X$ карта и $R_m$ карта	4320	4320,0	0,0
2	$\bar{X}$ карта и $R$ карта	4320	4330,0	10,0
2	$\tilde{X}$ карта и $R$ карта	4320	4330,0	10,0
2	$\bar{X}$ карта и $s$ карта	4320	4330,0	10,0
2	cusum карта	4320	4320,0	0,0

Таблица 2. Результаты расчетов для данных с шумом

№ кейса	Метод контроля	Истинное время смены режима, мин	Время обнаружения смены режима работы с использованием контрольных карт, мин	Погрешность, мин
1	$X$ карта и $R_m$ карта	4320	4510	190
1	$\bar{X}$ карта и $R$ карта	4320	4350	30
1	$\tilde{X}$ карта и $R$ карта	4320	4370	50
1	$\bar{X}$ карта и $s$ карта	4320	4350	30
1	cusum карта	4320	4350	30

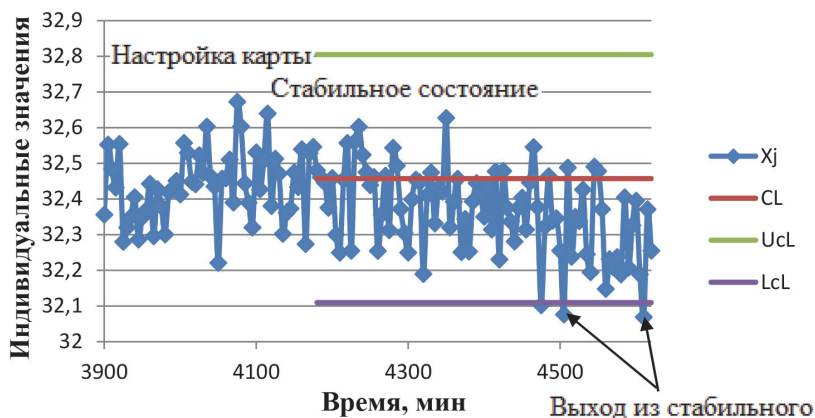


Рисунок 1. Карта индивидуальных значений для кейса 1, данные с наложенным шумом



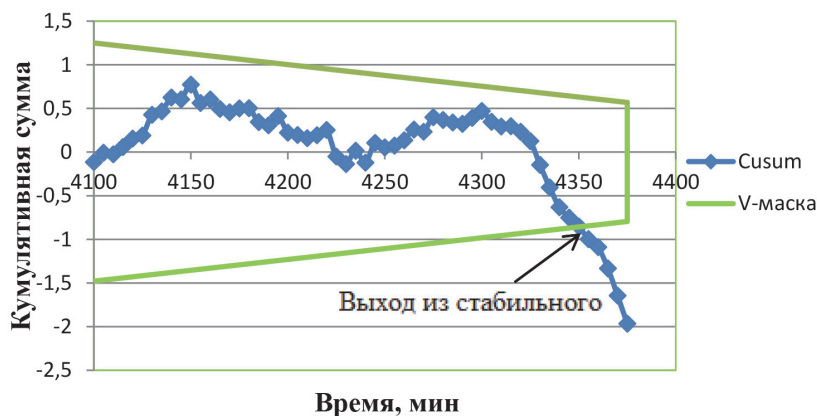


Рисунок 2. Карта кумулятивных сумм для кейса 1

### Выводы

Апробация карт контроля стабильности для процесса транспорта по промышленным трубопроводам показала хорошее согласование истинного и расчетного времени выхода процесса из состояния стабильности как для исходных тестовых данных, так и для зашумленных данных, которые были получены для повышения реалистичности процесса транспортировки сред по трубопроводам.

Метод контрольных карт позволит автоматизировать и оперативно реагировать на изменение режима работы трубопроводной системы, соответствующее ее выходу из нормального технологического состояния.

### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.
2. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. М.: Стандартинформ, 2016. 46 с.
3. ГОСТ Р ИСО 7870-4-2013. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 4. Карты кумулятивных сумм. М.: Стандартинформ, 2014. 52 с.
4. Аржиловский А.В., Алферов А.В., Валиахметов Р.И., Виноградов П.В., Данилейко Е.Б. Концепция системы мониторинга надежности и эксплуатации промышленных трубопроводов // Нефтяное хозяйство. 2018. № 9. С. 128-132. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-9-128-132.

### REFERENCES

1. *GOST R ISO 7870-1-2011. Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty. Chast' 1. Obshchie printsipy* [State

Использование контрольных карт для мониторинга стабильности процесса транспорта промышленными трубопроводами отвечает основным положениям концепции информационно-аналитической системы для мониторинга технического состояния промышленных трубопроводов «РН-СМТ», разрабатываемой в ПАО «НК «Роснефть» с 2018 года [4]. Данная система является инструментом управления рисками для поддержки обоснованного принятия решений как в режиме реального времени — для решения оперативных задач, так и на интервале стратегического управления.

Standard R ISO 7870-1-2011. Statistical Methods. Control Charts. Part 1. General Guidelines]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 16 p. [in Russian].

2. *GOST R ISO 7870-2-2015. Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty. Chast' 2. Kontrol'nye karty Shukharta* [State Standard R ISO 7870-2-2015. Statistical Methods. Control Charts. Part 2. Shewhart Control Charts]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 46 p. [in Russian].

3. *GOST R ISO 7870-4-2013. Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty. Chast' 4. Karty kumulyativnykh summ* [State Standard R ISO 7870-4-2013. Statistical Methods. Control Charts. Part 4. Cumulative Sum Charts]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 52 p. [in Russian].

4. Arzhilovskii A.V., Alferov A.V., Valiakhmetov R.I., Vinogradov P.V., Danileiko E.B. Kontseptsiya sistemy monitoringa nadezhnosti i ekspluatatsii promyslovykh truboprovodov [The Concept of a System for Monitoring the Reliability and Operation of Pipelines]. *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2018, No. 9, pp. 128-132. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-9-128-132. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ  
ABOUT THE AUTHORS

**Середжинова Галия Ильдаровна**, ведущий специалист отдела моделирования и оптимизации трубопроводов, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

**Galiya I. Seredzhinova**, Leading Specialist of Pipeline Modeling and Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: SeredzhinovaGI@bnipi.rosneft.ru

**Алфёров Алексей Викторович**, эксперт отдела технологического анализа и мониторинга, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

**Aleksey V. Alferov**, Expert of Technological Analysis and Monitoring Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: AlferovAV@bnipi.rosneft.ru

**Виноградов Павел Владимирович**, начальник отдела моделирования и оптимизации трубопроводов, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

**Pavel V. Vinogradov**, Head of Pipeline Modeling and Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: VinogradovPV@bnipi.rosneft.ru

**Валиахметов Рустам Илдарович**, начальник управления сопровождения эксплуатации трубопроводов, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

**Rustam I. Valiakhmetov**, Head of Pipeline Operation Support Directorate, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: ValiakhmetovRI@bnipi.rosneft.ru

**Небогин Дмитрий Александрович**, главный специалист управления инновационных проектов, ПАО НК «Роснефть», г. Москва, Российская Федерация

**Dmitriy A. Nebogin**, Chief Specialist of Innovative Projects Department, Rosneft Oil Company PJSC, Moscow, Russian Federation

e-mail: d\_nebogin@rosneft.ru