

© *Е. Л. Гордеева*, канд. техн. наук, доцент
(РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия)
E-mail: elena.gordeeva311@yandex.ru

© *E. L. Gordeeva*, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(RHTU named after D. I. Mendeleev, Moscow, Russia)
E-mail: elena.gordeeva311@yandex.ru

© *Н. В. Мокрова*, д-р техн. наук, доцент
(Университет науки и технологий МИСИС,
Москва, Россия)
E-mail: mokrovanv55@gmail.com

© *N. V. Mokrova*, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russia)
E-mail: mokrovanv55@gmail.com

© *Л. Е. Суркова*, канд. техн. наук, доцент
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия)
E-mail: LSurkova2004@yandex.ru

© *L. E. Surkova*, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University),
Moscow, Russia)
E-mail: LSurkova2004@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ПРИ МОНТАЖЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

APPLICATION OF CONTROL CHARTS DURING INSTALLATION AND OPERATION OF ENGINEERING SYSTEMS

Предложено применение контрольных карт Шухарта для мониторинга состояния инженерных систем при монтаже и эксплуатации оборудования. Проанализировано состояние инженерных систем объекта строительства в зоне хода мостового крана. Тестирование контрольных карт позволило определить время выхода процесса из состояния стабильности, использование R- и X-карт позволяет исключить неслучайные причины отклонений от контрольных значений и обеспечить статистически управляемое состояние. Предложены программные пакеты для реализации модели анализа данных. В результате появляется возможность контролировать отклонение параметров производственных процессов от нормативных, определять критические значения таких отклонений, уменьшать вариабельность процессов строительного производства.

Ключевые слова: контрольные карты Шухарта, мониторинг инженерных систем.

The application of Shewhart's control charts for monitoring the state of engineering systems during installation and operation of equipment is proposed. The state of engineering systems of the construction object in the area of the bridge crane stroke is analyzed. Testing of control charts allowed to determine the time of process exit from the state of stability. Using of R- and X-charts enables to exclude non-random reasons of deviations from control values and to provide statistically controlled state. Software packages for implementing the data analysis model are proposed. The results make it possible to control the deviation of production process parameters from the normative ones, to determine the critical values of such deviations, to reduce the variability of construction production processes.

Keywords: Shewhart's control charts, engineering systems monitoring.

Введение

Повышение качества работ в строительстве и обеспечение безопасности производственных процессов является важной задачей. Для ее решения используются различные методы и подходы, в том числе для мониторинга текущего состояния качества технологических процессов и инженерных

систем применяют контрольные карты. Особое внимание уделяется контрольным картам Шухарта (ККШ) для мониторинга состояния инженерных систем при монтаже и эксплуатации оборудования. Статистический метод, основанный на использовании контрольных карт, предлагается для применения в системах мониторинга аппаратов и

установок, анализа технологического состояния фундаментов, капитальных построек, коммуникаций, инженерных систем и другого оборудования, попадающего в зону проведения строительных работ, включая условия стесненной застройки. Основной акцент ставится на задаче текущего контроля и своевременного обнаружения изменений состояния инженерной системы, особенно в случаях ее выхода из нормальных условий эксплуатации. Аналитические системы с использованием контрольных карт позволяют на основе анализа вариабельности технологических процессов выявить изменчивость, вызванную несистемными причинами.

Обзор практики использования карт Шухарта в статистическом аспекте приведен в издании [1]. Авторы [2–4], отмечая важность контрольных карт Шухарта для оценки степени изменчивости любых процессов, предлагают методологию постоянного совершенствования процессов, опираясь на статистические методы анализа¹, показавшие свою эффективность и простоту использования. Анализ и интерпретацию данных контрольной карты применяют для мониторинга конкретных процессов, а также для поиска источников улучшения производственной системы в целом. Д. Уилер производство брака, непредсказуемые и неуправляемые в статистическом смысле производственные процессы относит к состоянию хаоса [5]. Приведение производственного процесса в одно из устойчивых состояний требует при этом максимума усилий для обнаружения и устранения всех специальных причин при множестве их вариаций. Примеры практической реализации операционного подхода [6] говорят о результатах с отклонением расчетных значений параметров карт не более чем на 6 % даже для распределений, значительно отличающихся от нормального. Применение ККШ требует специальным образом органи-

зованного сбора статистического материала о параметрах процессов, в том числе строительного производства. Статистический контроль для мониторинга качества производства работ в строительстве, устойчивого и безопасного функционирования инженерных систем позволяет делать научно обоснованные выводы о тенденциях изменения состояния сложных производственных систем и в конечном счете качестве систем производства продукции или услуг. ККШ позволяют определить ожидаемый диапазон показателей процесса, проанализировать его закономерности, а также выявить конкретные проблемы для внесения необходимых изменений [7, 8]. Следует отметить, что подобные методы могут быть использованы для контроля отклонений от нормативных показателей на всем этапе жизненного цикла строительного производства.

Материалы и методы

Статистическая оценка ошибок при мониторинге и контроле производственных систем означает математически строгий подход к исследованию любой инженерной системы [9–10]. Статистические методы контроля современных инженерных систем должны учитывать экономические аспекты и вопросы безопасности производства. Для этого необходимы данные по текущим оценкам значений контролируемых технологических параметров, которые могут быть получены при непосредственном измерении с использованием поточных приборов либо с применением статистических методов на основе измерения других связанных величин, что требует проверки точности с использованием лабораторных замеров, которые сложно реализовать в реальном времени. В работе [11] подчеркиваются ограничения применения контрольных карт, обусловленные задачами внутреннего контроля точности функционирования анализаторов в лабораторных условиях, а также применением ККШ исключительно на дискретных

¹ Штурм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / пер. с нем. М.: Мир, 1970. 368 с.

производства ввиду особенностей, указанных в стандартах, таких как ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011, ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015, ГОСТ Р ИСО 7870-4-2013². Применение карт Шухарта согласно стандартам предполагает нормальное распределение, однако допускает возможность их применения при отклонениях от нормального распределения, не уточняя при этом методику расчета.

Согласно принятой методике на основе закона распределения определяют доверительный интервал по значению математического ожидания (m_a) для выборочного среднего (\bar{x}) и наоборот:

$$\begin{aligned} P(\bar{x} - \delta^+ < m_a < \bar{x} + \delta^-) &= P(-\delta^+ < m_a - \bar{x} < \delta^-) = \\ &= P(\delta^+ > \bar{x} - m_a > -\delta^-) = \\ &= P(m_a + \delta^+ > \bar{x} > m_a - \delta^-) = \gamma. \end{aligned} \quad (1)$$

Авторы статьи [12] рекомендуют использовать карту непараметрического критерия вместо карты средних значений для тестирования гипотезы о сдвиге среднего показателя процесса.

Под математическим ожиданием часто понимают нормативное значение технологического параметра и контролируют его посредством выборочной средней, задавая доверительную вероятность γ и допуски δ^- и δ^+ . ККШ позволяют отследить изменения контролируемого параметра с учетом границ допуска в доверительном интервале. На практике обычно используются следующие значения доверительной вероятности: для нормального распределения — 0,9973 (соответствует правилу 3σ), 0,99 или 0,95; для неравенства Чебышева — 0,89 (также исходя из правила 3σ).

Особые структуры точек при анализе ККШ можно выделить при помощи нескольких подходов. Так, например, ряд исследователей предлагает выделить набор правил (критериев) обнаружения специальных причин вариаций: выход точек за контрольные пределы, приближение к контрольным пределам, приближение к центральной линии, серия, тренд (дрейф), а также периодичность. В издании [13] данные критерии проанализированы графически.

Анализ ККШ позволяет принять решение о необходимости вмешательства в производственный процесс или режим работы инженерных систем. В каждом конкретном случае по результатам анализа делается вывод, является ли процесс статистически подконтрольным и насколько необходимо вмешательство, например оператора при мониторинге состояния производственных систем.

Для статистического управления процессами на практике применяется ряд контрольных карт по измеряемым и неизменяемым признакам. Так, например, используют карту средних значений \bar{x} , карту индивидуальных значений x_i — при объеме выборки $N = 1$. При выходе за границы нормы нескольких последовательных значений принимается решение о необходимости вмешательства в технологический процесс. Также используют сочетания и комбинации указанных контрольных карт, задавая контрольные границы, например для карты p — среднего процента брака с достаточно большим N и с контрольными границами:

$$p - u_\alpha \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} < \frac{x}{N} < p + u_\alpha \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}. \quad (2)$$

Практика использования контрольных карт распространена еще с середины прошлого века [14]. Контрольные карты используются для мониторинга стабильности процесса транспортировки по промышленным трубопроводам [15–16]. Например, в [16] отмечены правила формирования отклонения показателя $\pm 3\sigma$, приведены формулы опре-

² ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 2. Контрольные карты Шухарта. М.: Стандартинформ, 2016. 46 с.

ГОСТ Р ИСО 7870-4-2013. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 4. Карты кумулятивных сумм. М.: Стандартинформ, 2014. 52 с.

деления контрольных границ, предложен расчет карт кумулятивных сумм. Отмечено, что при мониторинге непрерывных процессов накопленные или кумулятивные суммы учитывают отклонение отдельных значений наблюдаемого показателя от опорного значения, который устанавливается в зависимости от специфики определенного производственного процесса при соблюдении условия его стабильного состояния. В зависимости для суммы (3) опорный показатель обозначен буквой k :

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

Интерпретацию кумулятивных карт предложено проводить с помощью накладываемых масок [15]. В случае выхода за границы маски значения наблюдаемого показателя необходимо вмешательство в контролируемый процесс. Известно применение контрольных карт³ в системах менеджмента качества^{4,5} как в нашей стране, так и за рубежом [17–18].

Результаты исследования

Техническое состояние инженерных систем определяется работоспособностью ее отдельных конструктивных элементов, а также зависит от связей между ними, при этом взаимодействие технологических элементов оказывает влияние на производительность системы особенно при изменении внешних факторов. Производственная система состоит из большого числа конструктивных элементов, имеющих определенное технологическое назначение. При моделировании систем невозможно выделить и в полной мере отследить все существенные параметры, и процесс жизненного цикла производственных систем характеризуется неопределенностью и случайностью. Строгое следование технологии контрольных карт позволяет

обеспечить должный уровень текущего контроля. Данный вид статистического анализа можно отнести к высокотехнологичным и перспективным в силу развития, в частности, методов видеоконтроля положения объектов, мониторинга состояния инженерных систем, различных способов распознавания образов и пр.

В процессе эксплуатации производственных систем техническое состояние отдельных компонентов изменяется в соответствии с этапом жизненного цикла. Практика использования статистического анализа и ККШ позволяют избежать необходимости классификации причин этих изменений, будь это внутренние факторы (особенности физико-химических процессов, протекающих в материалах конструкций, в том числе при изменениях состояния конструкций; нагрузки в процессе эксплуатации; конструктивные особенности и качество изготовления) или внешние (условия окружающей среды, характер и условия обслуживания), а также внешние воздействия, оказываемые на систему. Факторы влияют на работоспособность инженерных и производственных систем в целом и отдельных ее элементов в частности, а в итоге могут качественно повлиять на состояние инженерной системы, в том числе привести к ее выходу из состояния работоспособности.

В работе приведен пример использования контрольных карт для статистического анализа состояния инженерной системы в зоне хода мостового крана. На строительной площадке проводится сборка и сварка рельсов для установки мостового крана, который используется для перемещения грузов вдоль определенного маршрута. Для обеспечения безопасности и корректного функционирования крана необходимо убедиться, что все элементы инфраструктуры (инженерные коммуникации, строительные конструкции и другие объекты) находятся вне зоны хода крана. Геодезическая съемка инженерных

³ Шиндовский Э., Шюрц О. Статистические методы управления качеством: контрольные карты и планы контроля / пер. с нем. М.: Мир, 1976. 597 с.

⁴ ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. 55 с.

⁵ Афанасьев А. А. Системы качества. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 452 с.

систем на участке сборки и сварки рельсов мостового крана выполнена тахеометром Sokkia FX-105, имеющим соответствующее срокам измерения свидетельство о поверке. При проведении съемки фиксировалась величина попадания (в м) инженерной системы (коммуникаций, строительных конструкций и др.) в зону хода крана. Результаты исполнительной съемки частично показаны на рис. 1.

Данные исполнительной съемки использованы в качестве исходных при реализации статистического контроля с использованием ККШ. В рассматриваемом примере в каждой точке съемки получено только одно наблюдение, поэтому используются контрольные карты индивидуальных значений.

Контрольные границы являются мерой вариации по скользящим размахам для двух соседних наблюдений. Средний скользящий размах \bar{R} и общее среднее $\bar{\bar{X}}$ используют для построения контрольных карт, на рис. 2–3 графически заданы соответствующие центральные линии. Границы регулирования для средней приняты как $\bar{\bar{X}} \pm E_2 \bar{R}$. Нижняя и верхняя границы регулирования $D_3 \bar{R}$ и $D_4 \bar{R}$ установлены соответственно $E_2 = 3/d_2$. Значения констант для вычисления границ определены следующим образом: $D_3 = 0$ (для $n < 2$), $D_4 = 3,267$, $d_2 = 1,128$ (ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015). На рис. 2 приведена карта индиви-

дуальных значений X , а на рис. 3 — карта скользящих размахов R .

В случае выхода за контрольные пределы значений необходимо предпринимать действия, приводящие процесс в контролируемое состояние. Первоначально необходимо построить R -карту. Каждая точка на ней остается внутри контрольных границ, что указывает на статистически контролируемое состояние. Теперь можно построить X -карту. Отдельные точки (59, 90) X -карты выходят за верхнюю контрольную границу. Эти точки необходимо проанализировать на наличие случайных причин, и если это подтвердится, то все точки, на которые повлияли эти причины, следует исключить и заново пересчитать среднее и границы X -карты. Этот процесс повторяют, пока не будет достигнуто статистически управляемое состояние.

Современные методы аналитики широко используются в задачах управления качеством и позволяют визуально отслеживать производственные данные. Приведем пример визуального анализа при помощи гистограммы и диаграммы Парето, которую можно отнести к разновидности контрольной карты, позволяющей определить наиболее значимые факторы в процессе, отображая их по убыванию важности (рис. 4).

Диаграмма рассеяния, гистограмма и диаграмма Парето, в которой данные представ-

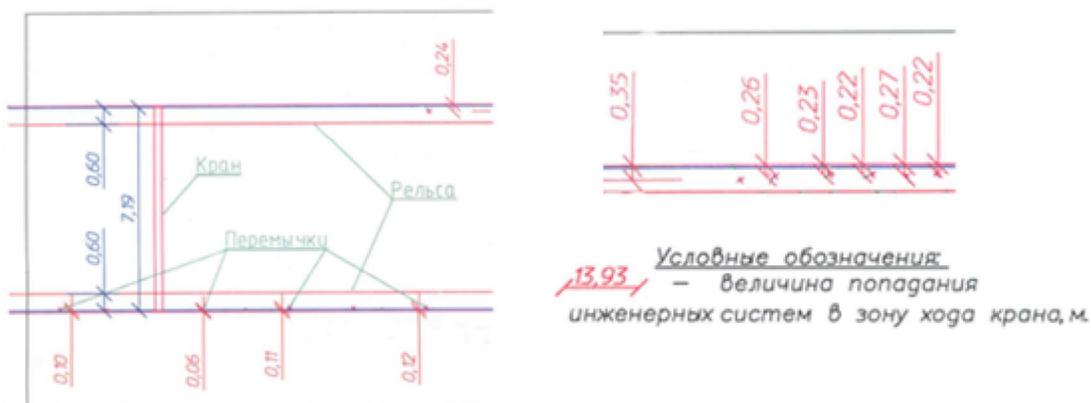


Рис. 1. Исполнительная съемка инженерных систем

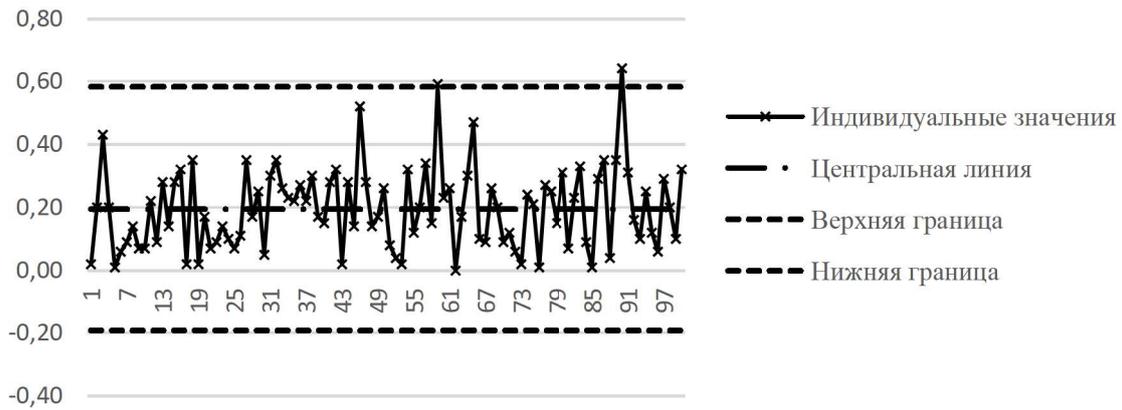


Рис. 2. Карта индивидуальных значений X

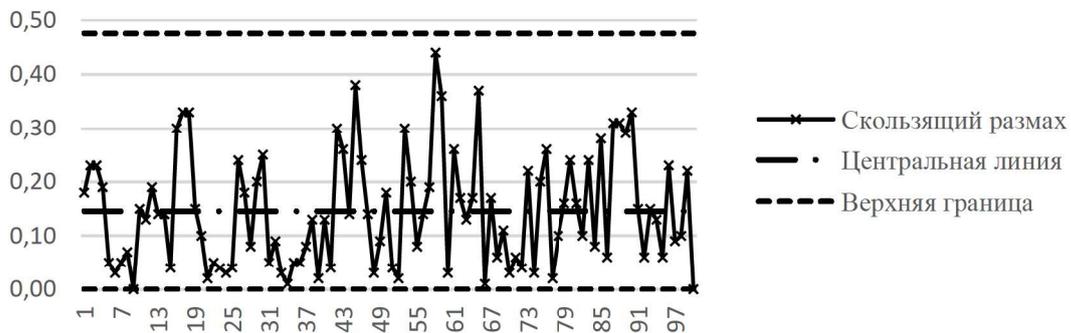


Рис. 3. Карта скользящих размахов R

лены в порядке уменьшения их важности, созданы с помощью языка программирования Python и библиотеки Matplotlib.

Контрольные карты статистического управления процессами (Statistical Process

Control, SPC) применяются для отслеживания производственных процессов, чтобы убедиться, что те соответствуют заданным стандартам [19]. SPC помогает отслеживать изменения в процессе с течением времени,

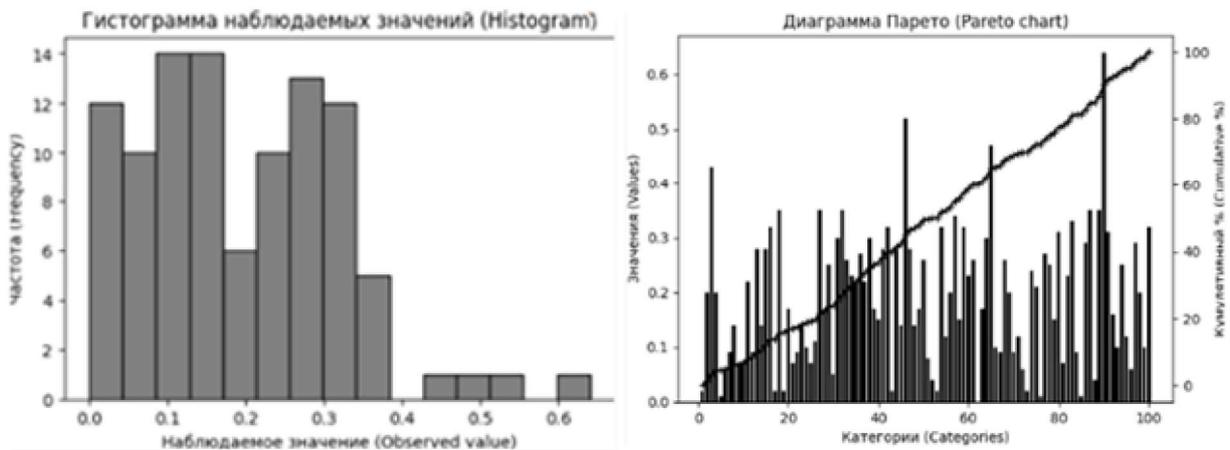


Рис. 4. Гистограмма наблюдаемых значений и диаграмма Парето

обнаруживать потенциальные проблемы и своевременно вносить корректировки, прежде чем возникнут серьезные последствия. Интерес к анализу самых разнообразных процессов при помощи контрольных карт постоянно растет [20–22].

Задачи «простого, но не легкого для применения инструмента анализа данных» рассмотрены в работе [23]. Реализовать методы анализа данных любого уровня сложности без программирования позволяет аналитическая платформа Loginom⁶. Платформа делает бизнес-аналитику доступной большому числу пользователей, имеет широкий функционал и позволяет справиться с возрастающим объемом информации. Одним из преимуществ Loginom является использование визуального конструктора, который дает возможность импортировать, экспортировать, выполнять подготовку данных, строить развернутые модели — от тестовых примеров до работающего процесса.

⁶ Low-code платформа для реализации аналитических процессов. URL: <https://loginom.ru/>

Анализ состояния инженерной системы в зоне хода мостового крана выполнен с использованием программного продукта Loginom. На начальном этапе выполнен импорт данных (в данном случае из файла MS Excel, но возможности импорта представлены достаточно широко) (рис. 5).

Ключевым аспектом моделирования в Loginom является конфигурирование полей ввода и вывода для каждого блока модели, что позволяет достичь высокой степени детализации настроек для карт Шухарта и обеспечить качественную визуализацию. Например, типы полей автоматически передаются при импорте. На рис. 6 показан один из примеров представления анализа данных, приведено значение диаграммы размаха и другие характеристики анализируемых данных.

Детализация процесса аналитики данных на платформе реализована при помощи разноименных блоков (рис. 7), использованы блоки «Группировка» и «Слияние». Существует возможность объединения блоков в подмодели, тем самым обеспечивается

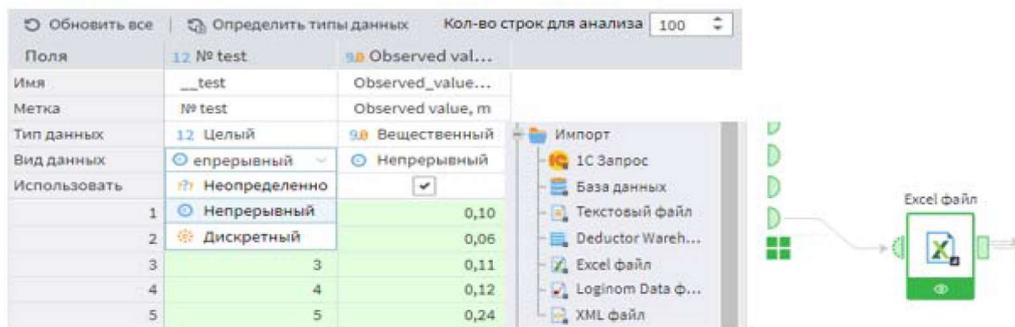


Рис. 5. Импорт исходных данных

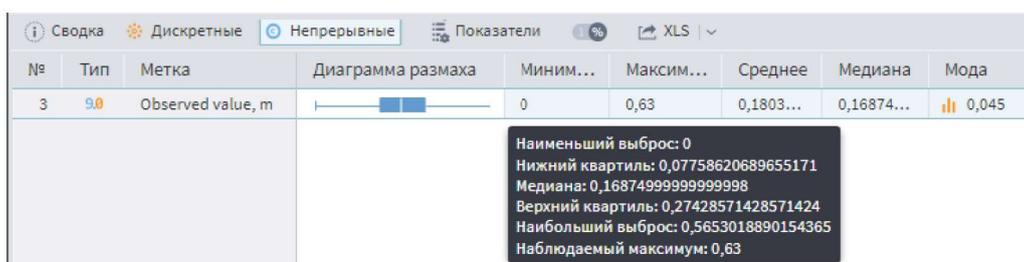


Рис. 6. Фрагмент анализа данных

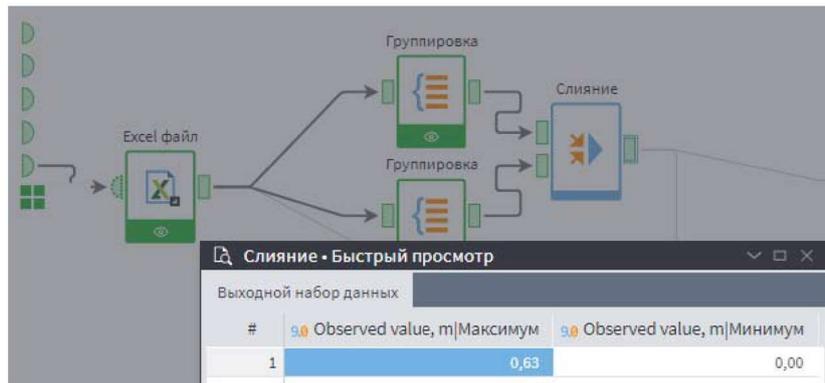


Рис. 7. Работа с моделью анализа данных

декомпозиционный подход построения модели.

В настоящей работе не приведены карты индивидуальных значений и скользящих размахов, аналогичные рис. 2 и 3. Возможности визуализации данных и отслеживания изменений можно продемонстрировать на примере использования режима навигатора (рис. 8), а также возможности экспорта данных.

Каждый из элементов сценария имеет возможность оснащения встроенным визуализатором с возможностями его настройки, к элементам визуализации относятся, например, «Диаграмма», «Качество данных», «Куб», «Статистика», «Таблица». Отдельными элементами являются «Переменные сценария», «Ссылки», «Отчеты» и подобные, также есть возможности подключения баз данных, веб-сервисов, хранилищ данных, бизнес-приложений (рис. 9).

Таким образом, Loginom становится инструментом Data Science, реализуя алгоритмы машинного обучения, базирующиеся

на математике и статистике. Программный продукт, кроме вышеперечисленных возможностей, имеет инструменты коллективной работы, позволяет выполнять обработку данных в пакетном режиме и т. п. Аналитические пакеты дают возможность алгоритмизировать анализ вариабельности процессов, что помогает решать задачи при условии глубокого знания процесса в сочетании с дополнительным анализом данных [24]. В исследованиях утверждается, что контрольные карты могут быть основой работы с большими данными [25].

Контрольные карты могут использоваться даже тогда, когда количество контролируемых параметров, влияющих на состояние инженерных систем, ограничено. Математические выводы [26], полученные в конкретных ситуациях, могут быть преобразованы в практические алгоритмы, подходящие для применения на современных аналитических платформах с обширными возможностями визуализации. Статистический контроль позволяет анализировать устойчивость про-

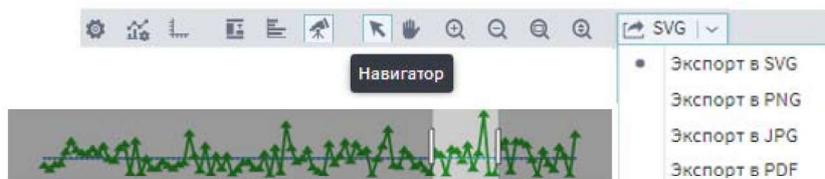


Рис. 8. Режим «Навигатор» и экспорт данных

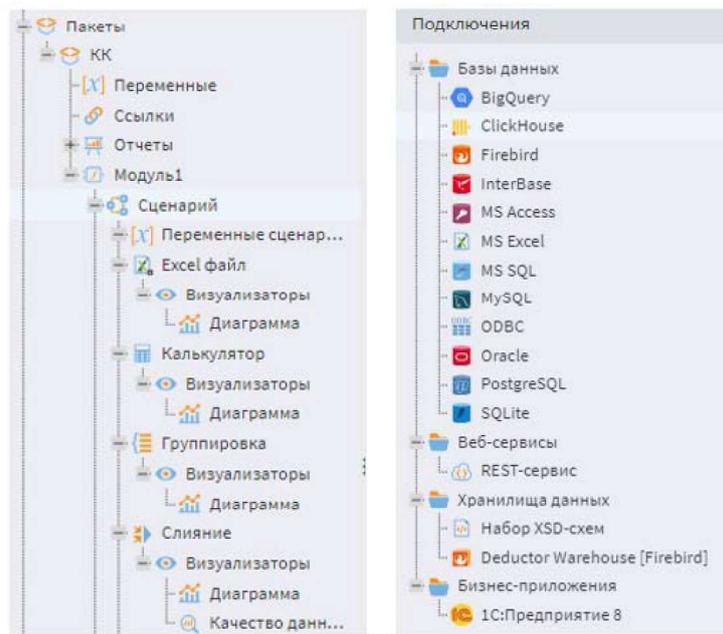


Рис. 9. Навигация и компоненты Loginom

цессов, определять возможные границы изменчивости с целью прогнозирования поведения технологических систем [27].

Заклучение и обсуждение

Предложенные методы, алгоритмы и программный инструментарий наряду со стратегией совершенствования процесса позволяют проводить мониторинг состояния инженерных систем с целью модернизации процессов и определения остаточного ресурса.

На стадии жизненного цикла производственных систем уже принимаются необходимые меры, предотвращающие появление дефектов и повреждений, возникновение аварийных ситуаций, иногда даже до завершения установленных сроков обследования или нормативного периода эксплуатации [28, 29].

Основой разработки технологических карт для широкого спектра строительных процессов служат требования технических регламентов в строительной отрасли. Согласно технологическим регламентам обеспечивается безопасность объектов капи-

тального строительства, общества и окружающей среды. Выполнение же требований стабильности процессов строительного производства и стабильного функционирования объектов требует общепринятого определения, установки методов оценки соответствия определенным требованиям. Именно поэтому предложено применять в ходе выполнения строительных работ контрольные карты Шухарта. Известны примеры использования методики для отслеживания качества материалов, соблюдения технологических норм. Входной, операционный и приемочный контроль в процессе производства работ включает, например, контроль качества вязки арматуры, правильности геометрии смонтированной опалубки, оценку качества железобетонных конструкций и т. д. [30]. Имеются требования к допустимым отклонениям, а основным способом проверки качества выполненных работ в настоящее время остается визуальный и инструментальный контроль. При этом все большее число процессов переводится в цифровой вид, и контроль точек модели с использованием

контрольных карт Шухарта при работе в среде общих данных всех участников строительного производства позволит вывести качество процессов на новый уровень. Можно привести пример производства свайных работ, где важны скорость и точность оценки качества их выполнения (брак от несоблюдения технологических норм составляет 22 %), и предлагается использование контрольных карт для контроля качества производства работ [31].

Контрольные карты в системах отопления многоквартирных домов могут быть использованы для контроля критических параметров давления в системе, расхода воды и др.; в системах вентиляции — для анализа скорости воздушного потока и уровня шума, например в высотных зданиях. Контрольные карты уже применяют для мониторинга качества воды [32], и использование данного инструмента в системах водоснабжения, в том числе для контроля давления и расхода воды, позволит контролировать работу насосного оборудования, фильтров и клапанов, обеспечивая бесперебойную подачу воды. Используя данную методику, можно продлить срок службы оборудования лифтов путем отслеживания скорости движения кабины, нагрузки на тросы, состояния тормозной системы.

Современные строительные тренды, включая уплотнение городской застройки, ограниченность строительных площадок и насыщенность инженерными сетями, способствуют усилению негативного техногенного влияния строящихся объектов на существующие сооружения в прилегающей зоне. В этой связи особую значимость приобретает контроль за техническим состоянием инженерных коммуникаций для предотвращения возможных аварий и обоснования выбора мероприятий по их предотвращению.

Используемый подход на основе контрольных карт предлагает количественные критерии для отслеживания перехода про-

изводственной системы из состояния статистической нормальности в состояние статистической ненормальности при мониторинге инженерных систем и производстве работ в строительстве. Кроме того, современные аналитические платформы, например такие как Loginom, предоставляют мощные инструменты для визуализации и анализа данных, что позволяет эффективно применять контрольные карты Шухарта в управлении качеством и повышении надежности инженерных систем.

Методика использования контрольных карт для статистического анализа состояния инженерной системы может быть применена в различных реальных строительных процессах, где требуются мониторинг и анализ отклонений параметров от заданных норм.

Библиографический список

1. Адлер Ю. П., Максимова О. В., Шнер В. Л. Контрольные карты Шухарта в России и за рубежом. Ч. 1 // Стандарты и качество. 2011. № 7. С. 82–87.
2. Адлер Ю. П., Шнер В. Л. Контрольные карты Шухарта // Методы менеджмента качества. 2003. № 5. С. 30–37.
3. Адлер Ю. П., Жулинский С. Ф., Шнер В. Л. Проблемы применения методов статистического управления процессами на отечественных предприятиях // Методы менеджмента качества. 2009. № 8. С. 36–40; № 9. С. 34–38.
4. Ефимов В. В., Барт Т. В. Статистические методы в управлении качеством продукции. М.: КНОРУС, 2006. 235 с.
5. Wheeler D. J. Advanced Topics in Statistical Process Control. The power of Shewhart's Charts. 2nd ed. Knoxville, Tennessee: SPC Press, 1995. 470 p.
6. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
7. Berry K. J., Johnston J. E., Mielke Jr. P. W. A Chronicle of Permutation Statistical Methods. Springer International Publishing, 2014. 517 p.
8. Woodall W. H., Faltin F. W. Rethinking Control Chart Design and Evaluation // Quality Engineering. 2019. Vol. 31 (4). Pp. 596–605.
9. Bray J. H., Maxwell S. E. Multivariate analysis of variance // Quantative Applications in the Social Sciences,

vol. 54. 1st ed. Newbury Park, CA: Sage publications, 1985. 80 p.

10. Rozenfeld O., Sacks R., Rosenfeld Y., Baum H. Construction job safety analysis // Safety Science. 2010. Vol. 48 (4). Pp. 491–498.

11. Гребенюк Е. А. Применение методов статистического анализа в системе контроля качества продукции на производстве технологического типа // Сб. тр. конф. «XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014». Москва, 16–19 июля 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2014. С. 4915–4926.

12. Кузнецов Л. А., Журавлева М. Г. Построение карт контроля процессов с отличающимися от нормального распределениями показателей качества // Методы менеджмента качества. 2009. № 12. С. 34–38.

13. Кумэ Х., Иизука Й., Такахаси Т. и др. Статистические методы повышения качества / под ред. Х. Кумэ; пер. с англ. и доп. Ю. П. Адлера, Л. А. Конаревой. М.: Финансы и статистика, 1990. 304 с.

14. Клячкин В. Н. Многомерный статистический контроль технологического процесса. М.: Финансы и статистика, 2022. 192 с.

15. Аржиловский А. В., Алферов А. В., Валиахметов Р. И., Виноградов П. В., Данилейко Е. Б. Концепция системы мониторинга надежности и эксплуатации промысловых трубопроводов // Нефтяное хозяйство. 2018. № 9. С. 128–132.

16. Середжинова Г. И., Алфёров А. В., Виноградов П. В., Валиахметов Р. И., Небогин Д. А. Применение контрольных карт для контроля стабильности процесса транспортировки сред по промышленным трубопроводам // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 4. С. 57–62.

17. Kiran D. R. Total quality management: key concepts and case studies. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 545 p.

18. Никитин В. А., Филончева В. В. Управление качеством на базе стандартов ИСО 9000:2000: Политика. Оценка. Формирование. 2-е изд. СПб.: Питер, 2004. 127 с.

19. Самохвалов А. Н., Михеев Е. Н., Ярополов Ю. Л., Платонова Е. С. Особенности применения методов статистического управления (SPC) в многофакторных технологических процессах производства топливных таблеток // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2018. № 4 (95). С. 95–108.

20. Shbool M. A., Alanazi B. Application of Condition-Based Maintenance for Electrical Generators Based on Statistical Control Charts // MethodsX. 2023. Vol. 11. Pp. 179–186. 102355.

21. Hunziker S., Gubler S., Calle J., et al. Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37 (11). Pp. 4131–4145.

22. Qiu P., Li W., Li J. A new process control map for monitoring short-range serially correlated data // Technometrics. 2020. Vol. 62 (1). Pp. 71–83.

23. Шнер В. Л., Шереметьева С. А., Смелов В. Ю., Хунузиди Е. И. Контрольные карты Шухарта — простой, но не лёгкий для применения инструмент анализа данных // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2024. Т. 67, № 1. С. 121–131.

24. Сигитов А. А. Разработка методики анализа больших данных с целью предсказания изменения фаз жизненного цикла элементов инженерного оборудования зданий и сооружений // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11, № 2. С. 8. DOI 10.29039/2308-0191-2023-11-2-8-8.

25. Aykroyd R. G., Leiva V., Ruggeri F. Recent Developments of Control Charts, Identification of Big Data Sources and Future Trends of Current Research // Technological Forecasting and Social Change. 2019. Vol. 144. Pp. 221–232.

26. Афанасьев В. Б., Махлаенко С. А., Плахотникова Е. В., Рязанский В. П. Методика определения параметров контрольной карты усиленного размаха // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2024. № 8. С. 179–185.

27. Samarin M. A., Shostak N. A., Balayev E. Yu., Basyuk A. S. The use of Shewhart control charts when conducting cavitation studies to identify and eliminate non-random causes of variability // MethodsX. 2024. Vol. 13. 102929.

28. Ерофеев В. Т., Федосин С. А., Кузенков А. Н., Моисеев С. С., Максимова И. Н., Ерофеева И. В., Санягина Я. А., Голик А. М. Контроль качества дисперсных компонентов порошково-активированных бетонов с помощью карт Шухарта // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 8. С. 57–69.

29. Шнер В. Л. Огромный секрет анализа данных: о чем забыл рассказать Дональд Уилер // Методы менеджмента качества. 2023. № 8. С. 40–44.

30. Кустикова Ю. О., Панкова Е. В. Технологическая карта как один из инструментов повышения качества ремонтно-строительных работ // Строительство: наука и образование. 2023. № 13 (1). С. 72–83. URL: <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2023.1.5>.

31. Трофимов Д. П. Применение контрольных карт Шухарта для контроля качества выполнения свайных работ // Молодой ученый. 2022. № 31 (426). С. 41–44.

32. Розенталь О. М., Швейкина В. И. Использование контрольных карт Шухарта-Деминга для управления

водопользованием // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 1. С. 102–115.

References

1. Adler Yu. P., Maksimova O. V., Shper V. L. *Kontrol'nye karty Shukharta v Rossii za rubezhom* [Shewhart control charts in Russia and abroad. and abroad]. Pt. 1. *Standarty i kachestvo – Standards and Quality*, 2011, no. 7, pp. 82–87.
2. Adler Yu. P., Shper V. L. *Kontrol'nye karty Shukharta* [Shuhart control charts]. *Metody menedzhmentakachestva – Methods of quality management*, 2003, no. 5, pp. 30–37.
3. Adler Yu. P., Zhulinskiy S. F., Shper V. L. *Problemy primeneniya metodov statisticheskougupravleniya protsessami na otechestvennykh predpriyatiyakh* [Problems of application of the methods of statistical process control at the domestic enterprises. Process Management Methods at Domestic Enterprises]. *Metody menedzhmenta kachestva – Methods of Quality Management*, 2009, no. 8, pp. 36–40; no. 9, pp. 34–38.
4. Efimov V. V., Bart T. V. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvomproduktii* [Statistical methods in quality management of products]. Moscow, KNORUS Publ., 2006, 235 p.
5. Wheeler D. J. *Advanced Topics in Statistical Process Control. The power of Shewhart's Charts. 2nd ed.* Knoxville, Tennessee: SPC Press, 1995, 470 p.
6. Uiler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: Optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta* [Statistical Process Management: Business Optimization with the Use of Shewhart Control Charts]. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009, 409 p.
7. Berry K. J., Johnston J. E., Mielke Jr. P. W. *A Chronicle of Permutation Statistical Methods*. Springer International Publishing, 2014, 517 p.
8. Woodall W. H., Faltin F. W. *Rethinking Control Chart Design and Evaluation. Quality Engineering*, 2019, vol. 31 (4), pp. 596–605.
9. Bray J. H., Maxwell S. E. *Multivariate analysis of variance. Quantative Applications in the Social Sciences*, vol. 54. 1st ed. Newbury Park, CA, Sage publications, 1985, 80 p.
10. Rozenfeld O., Sacks R., Rosenfeld Y., Baum H. *Construction job safety analysis. Safety Science*, 2010, vol. 48 (4), pp. 491–498.
11. Grebenyuk E. A. *Primenenie metodov statisticheskogo analiza v sisteme kontrolya kachestva produktii na proizvodstve tekhnologicheskogo tipa* [Application of methods of statistical analysis in the system of quality control of products on the production of technological type]. *Trudy konf. «XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU–2014».* Moskva, 16–19 iyulya 2014 goda [Proc. of the conf. “XII All-Russian meeting on the problems of management VSPU–2014”. Moscow, July 16–19, 2014]. Moscow, Institute of Management Problems named after V. A. Trapeznikov Publ., 2014, pp. 4915–4926.
12. Kuznetsov L. A., Zhuravleva M. G. *Postroenie kart kontrolya protsessov s otlichayushchimisya ot normal'nogo raspredeleniyami pokazateley kachestva* [Construction of process control maps with quality indicators distributions differing from normal]. *Metody menedzhmenta kachestva Methods of quality management*, 2009, no. 12, pp. 34–38.
13. Kume Kh., Iizuka Y., Takakhasi T., et al. *Statisticheskie metody povysheniya kachestva* [Statistical methods for quality improvement]. Ed. by X. Kume. Transl. From English by Adler Y. P., Konareva L. A. Moscow, Finance and Statistics Publ., 1990, 304 p.
14. Klyachkin V. N. *Mnogomerniy statisticheskiy kontrol' tekhnologicheskogo protsessa* [Multidimensional statistical process control]. Moscow, Finansy i statistika 2022, 192 p.
15. Arzhilovskiy A. V., Alferov A. V., Valiakmetov R. I., Vinogradov P. V., Danileyko E. B. *Kontseptsiya sistemy monitoringa nadezhnosti i ekspluatatsii promyslovykh truboprovodov* [Flowline reliability and operation monitoring system concept]. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil industry*, 2018, no. 9, pp. 128–132.
16. Seredzhinova G. I., Alfeyrov A. V., Vinogradov P. V., Valiakmetov R. I., Nebogin D. A. *Primenenie kontrol'nykh kart dlya kontrolya stabil'nosti protsessa transportirovki sred po promyslovym truboprovodam* [Use of control charts to monitor the stability of the process of transporting media through flowlines]. *Neftgazovoe delo – Oil and Gas Business*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 57–62.
17. Kiran D. R. *Total quality management: key concepts and case studies*. Oxford, Butterworth-Heinemann Publ., 2017, 545 p.
18. Nikitin V. A., Filoncheva V. V. *Upravlenie kachestvom na baze standartov ISO 9000:2000: Politika. Otsenka. Formirovanie* [Quality management based on ISO 9000:2000 standards: Policy. Evaluation. Generation]. 2-nd. ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2004, 127 p.
19. Samokhvalov A. N., Mikheev E. N., Yaropolov Yu. L., Platonova E. S. *Osobennosti primeneniya metodov statisticheskogo upravleniya (SPC) v mnogofaktornykh tekhnologicheskikh protsessakh proizvodstva toplivnykh tabletok* [Features of Application of Statistical Control Methods (SPC) in Multifactor Technological Processes of Fuel Pellets Production]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novye materialy – Issues of Nuclear Science And Engineering. Series: Material Science and New Materials*, 2018, no. 4 (95), pp. 95–108.

20. Shbool M. A., Alanazi B. *Application of Condition-Based Maintenance for Electrical Generators Based on Statistical Control Charts*. *MethodsX*, 2023, vol. 11, pp. 179–186. 102355.
21. Hunziker S., Gubler S., Calle J., et al. *Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations*. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37 (11), pp. 4131–4145.
22. Qiu P., Li W., Li J. *A new process control map for monitoring short-range serially correlated data*. *Technometrics*, 2020, vol. 62 (1), pp. 71–83.
23. Shper V. L., Sheremeteva S. A., Smelov V. Yu., Khunuzidi E. I. *Kontrol'nye karty Shukharta — prostoy, no ne lyogkiy dlya primeneniya instrument analiza dannykh* [Shewhart's control charts as a simple, but not easy to use data analysis tool] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya – Bulletin of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 121–131.
24. Sigitov A. A. *Razrabotka metodiki analiza bol'shikh dannykh s tsel'yu predskazaniya izmeneniya faz zhiznennogo tsikla elementov inzhenernogo oborudovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Development of a methodology for analyzing big data to predict changes in the life cycle phases of engineering equipment elements of buildings and structures]. *Stroitel'stvo i arkhitektura Construction and Architecture*, 2023, vol. 11, no. 2, p. 8. DOI 10.29039/2308-0191-2023-11-2-8-8.
25. Aykroyd R. G., Leiva V., Ruggeri F. *Recent Developments of Control Charts, Identification of Big Data Sources and Future Trends of Current Research*. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, vol. 144, pp. 221–232.
26. Afanashev V. B., Makhlaenko S. A., Plakhotnikova E. V., Ryazanskiy V. P. *Metodika opredeleniya parametrov kontrol'noy karty usilennogo razmakha* [Methodology for determining the parameters of the control map of the amplified spread]. *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, 2024, no. 8, pp. 179–185.
27. Samarin M. A., Shostak N. A., Balayev E. Yu., Basyuk A. S. *The use of Shewhart control charts when conducting cavitation studies to identify and eliminate non-random causes of variability*. *MethodsX*, 2024, vol. 13, 102929.
28. Erofeev V. T., Fedosin S. A., Kuzenkov A. N., Moiseev S. S., Maksimova I. N., Erofeeva I. V., Sanyagina Ya. A., Golik A. M. *Kontrol' kachestva dispersnykh komponentov poroshkovo-aktivirovannykh betonov s pomoshch'yu kart Shukharta* [Quality control of dispersed components of powder-activated concrete using Shewhart's control charts]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2023, no. 8, pp. 57–69.
29. Shper V. L. *Ogromniy sekret analiza dannykh: o chem zabyl rasskazat' Donald Uiler* [The great secret of data analysis: what Donald Wheeler forgot to tell us]. *Metody menedzhmenta kachestva – Quality Management Methods*, 2023, no. 8, pp. 40–44.
30. Kustikova Yu. O., Pankova E. V. *Tekhnologicheskaya karta kak odin iz instrumentov povysheniya kachestva remontno-stroitel'nykh rabot* [Technological map as one of the tools for improving the quality of repair and construction works]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie – Construction: science and education*, 2023, no. 13 (1), pp. 72–83. Available at: <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2023.1.5>
31. Trofimov D. P. *Primenenie kontrol'nykh kart Shukharta dlya kontrolya kachestva vypolneniya svaynykh rabot* [Application of Shuhart control charts for quality control of pile works]. *Molodoy ucheniy – Young Scholar*, 2022, no. 31 (426), pp. 41–44.
32. Rozental' O. M., Shveykina V. I. *Ispol'zovanie kontrol'nykh kart Shukharta-Deminga dlya upravleniya vodopol'zovaniem* [Use of Shuhart-Deming control charts for water use management]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie – Water Economy of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2014, no. 1, pp. 102–115.