

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151>

УДК 66.042.945: 519.246.8

Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора

Н. В. Струцкий¹⁾, В. Н. Романюк²⁾

¹⁾ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Одним из основных видов технического обслуживания стальных подземных распределительных газопроводов является периодическое приборное обследование. Данное обследование представляет собой разновидность эксплуатационного контроля, включающего в себя выявление дефектов изоляционного покрытия и утечек газа приборными методами, без вскрытия трубопровода. Этим одновременно контролируются два различных уровня нарушения исправности газопровода, на одном из которых его работоспособность полностью сохраняется, но создается возможность наступления цепочки событий, угрожающих возникновением отказа в будущем (дефект изоляции), а на другом отказ, по сути, уже произошел (потеря герметичности газопровода), но до обследования не был выявлен. Приборному обследованию с определенной нормативной периодичностью подвергаются все распределительные подземные газопроводы. Выявленные повреждения подлежат обязательному устранению, исправность и работоспособность газопровода восстанавливаются. Таким образом, периодическое приборное обследование является ключевым техническим мероприятием, обеспечивающим управление техническим состоянием стальных подземных распределительных газопроводов. А проводимые в ходе обследования и дальнейшего ремонта газопроводов работы являются наиболее масштабными и трудозатратными из всех выполняемых на линейной части газораспределительной системы. Соответственно адекватное планирование в данной области весьма важно с точки зрения как надежности и безопасности газораспределительной сети, так и хозяйственно-экономической. Вместе с тем обеспечить искомую адекватность планирования эксплуатационного контроля и вообще технического обслуживания инженерных объектов на практике достаточно сложно, так как сам процесс обслуживания сочетает в себе регулируемые и нерегулируемые компоненты и имеет значительную инерционность управления. Настоящая статья посвящена вопросам обоснованного прогнозирования объемов работ по приборному обследованию стальных подземных газопроводов с учетом специально выделяемого комплексного организационно-логистического фактора, отражающего влияние сложившейся в сфере газораспределения производственной практики и управленческих подходов. Прогноз выполнен на основе актуальных в настоящий момент методов анализа временных рядов.

Ключевые слова: подземный стальной газопровод, эксплуатационный контроль, периодическое приборное обследование, объем работ, планирование, анализ временных рядов

Для цитирования: Струцкий, Н. В. Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-137-151>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking Into Account the Organizational and Logistical Factor

N. V. Strutsky¹⁾, V. N. Romaniuk²⁾

¹⁾Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. One of the main types of maintenance of steel underground gas distribution pipelines is periodic instrument inspection. This inspection is a kind of operational control, which includes detection of defects of insulation coating and gas leaks by instrumental methods, without opening the pipeline. This simultaneously controls two different levels of failure of the gas pipeline's serviceability, one of which fully preserves its operability, but creates the possibility of a chain of events threatening to cause a failure in the future (insulation defect), while the other level of failure is, in fact, the case when the failure has already occurred (loss of tightness of the gas pipeline), but before the examination was not detected. All underground gas distribution pipelines are subjected to an instrument inspection with a certain regulatory frequency. The identified damages are subject to mandatory elimination, the serviceability and operability of the gas pipeline are being restored. Thus, periodic instrument inspection is a key technical measure that ensures the management of the technical condition of steel underground gas distribution pipelines. It should be mentioned that the work carried out during the inspection and further repair of gas pipelines is the most extensive and labor-consuming of all those performed on the linear part of the gas distribution system. Accordingly, adequate planning in this area is very important from the point of view of both the reliability and safety of the gas distribution network and the economic and economic one. At the same time, it is quite difficult to ensure the required adequacy of operational control planning and maintenance of engineering facilities in practice, since the maintenance process itself combines regulated and unregulated components and has significant inertia of management. The present article is devoted to the issues of reasonable forecasting of the scope of work on the instrument inspection of steel underground gas pipelines, taking into account a specially identified complex organizational and logistical factor reflecting the influence of existing production practices and management approaches in the field of gas distribution. The forecast is based on the currently relevant time series analysis methods.

Key words: underground steel gas pipeline, operational control, periodic instrument inspection, scope of work, planning, time series analysis

For citation: Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking Into Account the Organizational and Logistical Factor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151> (in Russian)

Введение

Периодическое приборное обследование (или, по устоявшейся отраслевой терминологии, комплексное приборное обследование (КПО)) охватывает все без исключения стальные подземные распределительные газопроводы, его периодичность, как правило, составляет 5 лет. Отдельные характерные участки (например, переходы через естественные и искусственные преграды) обследуются чаще – 1 раз в 3 года или ежегодно [1, 2]. Учитывая плановый, периодический характер КПО, регламентируемый (то есть минимально необходимый исходя из нормативных требований) объем работ $Q_{\text{регл}}$ будет определяться по формуле

$$Q_{\text{регл}} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

где Q_i – объем работ на участках с i -й периодичностью обследования ($T_{\text{КПО}i}$); n – количество регламентируемых периодичностей обследования.

Расчет регламентируемых объемов работ естественно производить, отталкиваясь от преобладающей периодичности работ, составляющей для Республики Беларусь, как уже было сказано, 5 лет, участки с меньшей периодичностью обследования в общем объеме работ имеют небольшую, примерно постоянную долю (около 5 %). Таким образом, $Q_{\text{регл}}$ для каждого пятилетнего периода можно укрупненно рассчитать исходя из протяженности стальных газопроводов в предыдущий период. То есть регламентируемые объемы работ по КПО для периода 2009–2013 гг. рассчитываются на основании данных о протяженностях газопроводов в 2004–2008 гг., для периода 2014–2018 гг. – на основании данных за 2009–2013 гг., и так далее. Соответственно, актуальные протяженности газопроводов в период 2019–2023 гг. составляют базу планирования на пятилетний цикл 2024–2028 гг.

Однако, как показывает практика, значений $Q_{\text{регл}}$ недостаточно для адекватного планирования работ. Соответственно, для обеспечения необходимого качества планировочного процесса необходим учет дополнительных влияющих факторов.

Основная часть

Рассмотрим рис. 1, на котором показана динамика объемов обследования подземных газопроводов за период 2009–2023 гг. (точка 1 на горизонтальной оси соответствует 2009 г.). Рассчитанные по протяженности сетей и нормативной периодичности обследования значения $Q_{\text{регл}}$ показаны на рисунке прерывистой линией зеленого цвета, красной прерывистой линией показаны фактические объемы работ $Q_{\text{факт}}$. Как видно, на всем протяжении графика фактические объемы существенно превышают регламентируемые. Действительно, некоторая часть газопроводов может подвергаться повторному обследованию в течение одного календарного года (сезона обследования) в случае появления сомнений в результатах планового обследования, при проведении выборочного контроля или других оговоренных нормативными документами случаях [1, 2]. А главное, на практике часть объектов включается в планы на обследование досрочно в целях равномерного распределения трудозатрат, материальных ресурсов и из соображений логистики.

Такая локальная оптимизация графиков и маршрутов обследования технически и экономически обоснована и носит постоянный характер, из-за чего реальная периодичность выполнения работ всегда несколько уплотняется по отношению к нормативным требованиям. В настоящее

время этот подход нашел свое нормативное отражение. Согласно отраслевому документу [2], при планировании рекомендуется предусматривать укрупненное (по кварталам, микрорайонам) обследование всех подземных газопроводов независимо от срока врезки или предыдущего обследования, а также участка, объединяющего одну или несколько зон электрозащиты.

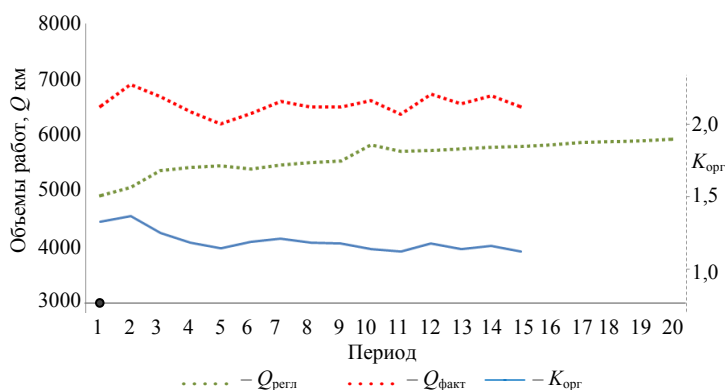


Рис. 1. Динамика регламентируемых и фактических объемов обследования подземных газопроводов

Fig. 1. Dynamics of regulated and actual volumes of inspection of underground gas pipelines

Очевидно, что такое превышение фактических объемов работ над регламентируемыми носит системный характер, особенно при обслуживании протяженных и территориально разнесенных инженерных объектов, и может быть выражено в виде соответствующего показателя (коэффициента) $K_{\text{орг}}$

$$K_{\text{орг}} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{регл}}}. \quad (2)$$

Данный коэффициент (показан на рис. 1 сплошной синей линией, шкала значений справа) будет отражать влияние на фактические объемы работ организационно-логистического фактора, который, в свою очередь, будет включать в себя внеплановую составляющую и естественную избыточность планирования.

При этом $K_{\text{орг}}$ будет в значительной мере зависеть от установившейся практики производственной деятельности и управленческих подходов в той или иной эксплуатирующей организации (шире – системе, отрасли), которая наряду с нормативной периодичностью работ будет оказывать существенное влияние на плотность обслуживания объектов.

Так, например, централизация работ по эксплуатационному контролю в организации будет вести к укрупнению осуществляющих контроль подразделений (бригад) и соответственно укрупнению зон обслуживания и маршрутов, что на каком-то этапе повысит плотность обслуживания. К тому же результату, в конечном итоге, будет вести и внедрение в работу но-

вой, более производительной приборной техники. При этом эффекты импульсов от структурных перестроек и технического переоснащения должны иметь затухающий, стабилизирующийся со временем характер.

Следует отметить, что особенно сильно влияние производственно-логистического фактора может проявляться на фоне управленческих решений высокого порядка, оказывающих долговременное системное влияние на хозяйственную деятельность в масштабе крупных производственных комплексов и даже отраслей. В качестве примера можно привести проведенную в системе ГПО «Белтопгаз» в течение 2015–2016 гг. оптимизацию штатной численности газоснабжающих организаций, когда штаты были приведены в соответствие с объемами обслуживания, а организационная структура целой отрасли упорядочена и унифицирована на единых принципах.

Определенное искажающее («зашумляющее») влияние на процесс технического обслуживания могут оказывать и субъективные факторы, такие как, например, недостаточное качество планирования и/или управления на одном из структурных уровней.

Рассмотрим динамику значений $K_{\text{орг}}$ подробнее. Поскольку мы имеем дело с временным рядом (динамическим рядом, рядом динамики, time series) – последовательностью значений некоего показателя (признака), упорядоченной в хронологическом порядке, то есть в порядке возрастания временного параметра [3], используем специальные методы анализа временных рядов.

В практике исследования принято считать, что значения уровней временных рядов могут содержать следующие структурообразующие компоненты:

- тренд, или основную тенденцию, (u_i) – изменение, определяющее общее направление развития временного ряда под воздействием долговременных факторов;
- сезонную компоненту (s_i), отражающую периодически повторяемые в определенное время года колебания;
- циклическую компоненту (c_i), отражающую периодические колебания, выходящие за рамки одного года;
- случайную (нерегулярную) компоненту (ε_i) – случайный шум, отражающий результат воздействия случайных, внешних факторов.

Неслучайные составляющие часто объединяются в одну, и рассматривается модель вида

$$y_i = f(t, \beta) + \varepsilon_i, \quad (3)$$

где $f(t, \beta)$ – неслучайная функция времени, заданная с точностью до неизвестных параметров β .

В формировании уровней ряда не обязательно участвуют все перечисленные выше составляющие, некоторые составляющие могут отсутство-

вать в тех или иных рядах. Предметом анализа временного ряда являются выявление и изучение основных компонент исследуемого ряда [4, 5].

При построении регрессионных моделей для временных рядов необходимо учитывать такие их особенности, как зависимость от прошлого (свойство «памяти» или принцип «самоповторения истории», автокорреляция), наличие долго- и краткосрочных зависимостей [6]. В настоящее время методы анализа временных рядов широко востребованы как в сфере своего традиционного применения – экономике (эконометрике), так и в других научных областях. Наиболее важным прикладным аспектом применения данных методов является возможность прогнозирования будущего поведения показателя на основе его прошлых изменений (в сфере энергетики, например, таким показателем зачастую является энергопотребление [7–10], оптимизация которого остается одной из актуальнейших задач).

Рассматриваемый ряд динамики показателя $K_{орг}$ является одномерным (число уровней $n = 15$), интервальным, эквидистантным (с годовым шагом дискретизации), временным рядом относительных величин (коэффициентов), полученных на основе макроданных – результатов агрегирования первичной статистической информации в процессе сводки и группировки [7]. Как правило, при работе с макроданными бывает небольшое число наблюдений, которое невозможно увеличить (так как изменяется вид или структура зависимости), а также часто встречается феномен «ложной регрессии». В этой связи необходим детальный предварительный анализ имеющихся данных.

Проверка данных на наличие аномальных значений проводилась с помощью критерия Ирвина (λ) и двустороннего критерия Граббса (Gr). Применение критерия Ирвина рекомендовано в стандартах [8, 9]. Использование критерия Граббса предписывается стандартом [10], представляющим собой аутентичный текст международного стандарта ИСО 5725-2: 1994. Так как выбросов выявлено не было ($\lambda = 1,651$; $Gr = 2,418$; здесь и далее при проверке статистических гипотез принят уровень значимости $\alpha = 0,05$), уровни временного ряда подвергались дальнейшей статистической обработке в исходном виде. Описательные статистики ряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Описательные статистики ряда $K_{орг}$
Descriptive statistics series of the $K_{орг}$ series

Среднее \bar{x}	Стандартная ошибка σ_x	Медиана Me	Среднеквадратическое отклонение σ	Дисперсия выборки σ^2	Размах вариации R	Коэффициент выравнивания K_v
1,191	0,0184	1,177	0,0716	0,0051	0,247	0,819

Для оценки однородности статистической совокупности можно также использовать такие показатели, как коэффициент вариации V и относительное отклонение выборочного среднего и медианы V_{Me} :

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%; V_{Me} = \frac{\bar{x} - Me}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Коэффициент вариации ряда $V = 6,01\%$ ($< 10\%$), что свидетельствует о незначительной степени рассеивания данных. Относительное отклонение выборочного среднего и медианы $V_{Me} = 1,23\%$, подтверждая надежность среднего в выборке. Таким образом, ряд можно считать однородным, а его среднее значение \bar{x} хорошо характеризующим центральную тенденцию.

Для предварительного анализа скорости и интенсивности изменений можно рассчитать такие обобщераспространенные показатели динамики ряда, как средние темп роста \bar{T}_p , темп прироста $\bar{T}_{пр}$ и абсолютный прирост $\bar{\Delta y}$ показателя:

$$\bar{T}_p = \sqrt[n-1]{\frac{y_n}{y_0}}; \bar{T}_{пр} = \bar{T}_p - 1; \bar{\Delta y} = \frac{y_n - y_0}{n-1}, \quad (5)$$

где n – число уровней временного ряда; y_0 – значение базисного уровня (в качестве базисного принимается уровень первого года).

В табл. 2 приведены средние показатели динамики временного ряда и предварительный прогноз изменения $K_{орг}$ на основе средних темпа роста и абсолютного темпа прироста, рассчитанных по формулам:

$$\hat{y}_{n+L} = y_n + L\bar{\Delta y}; \hat{y}_{n+L} = y_n \bar{T}_p^L, \quad (6)$$

где \hat{y}_{n+L} – прогнозное значение $(n + L)$ -го уровня ряда; y_n – фактическое значение в последней n -й точке ряда; L – период упреждения.

Таблица 2

Средние показатели динамики ряда $K_{орг}$
Average indicators of the dynamics of the $K_{орг}$ series

Средние показатели динамики	Значения	Точечный прогноз				
		\hat{y}_{16}	\hat{y}_{17}	\hat{y}_{18}	\hat{y}_{19}	\hat{y}_{20}
Абсолютный прирост $\bar{\Delta y}$	-0,0146	1,108	1,094	1,079	1,064	1,049
Темп роста \bar{T}_p	0,9881	1,109	1,096	1,084	1,07	1,058
Темп прироста $\bar{T}_{пр}$	-0,0119					

Период упреждения принят равным 5 годам, так как это, во-первых, соответствует преобладающей периодичности обследования стальных подземных газопроводов, и, во-вторых, удовлетворяет известному правилу, в соответствии с которым период упреждения не должен превышать 1/3 базы прогноза. При этом прогноз на основе среднего абсолютного прироста отражает представление о близком к линейному характере динамики ряда, а прогноз на основе среднего темпа роста – его представление в виде показательной или экспоненциальной кривой [3, 11].

Поскольку уровни ряда имеют тенденцию к уменьшению в абсолютном и относительном выражении, можно выдвинуть гипотезу о присутствии трендовой составляющей. Проверка гипотезы с помощью критерия серий, построенного на медиане ($v = 4$; $\tau_{\max} = 7$), подтверждает вывод о наличии тренда. Дальнейшим шагом в построении модели ряда является определение линии тренда (кривой роста), например, методом аналитического выравнивания. Содержанием этого метода является то, что основная тенденция развития процесса рассчитывается как функция времени. Далее теоретические уровни \hat{y}_t определяются с использованием той адекватной математической функции, которая наилучшим образом отображает основную тенденцию временного ряда [12].

Известно, что степенной полином может описать любые процессы изменения показателя y в зависимости от значений t . Коэффициент детерминации для степенного полинома приближается к единице по мере увеличения числа степеней до числа уровней временного ряда. Однако тем самым линия регрессии приближается к фактическим уровням показателя за прошедшее время, что не позволяет установить тренд и экстраполировать его на перспективу. В этой связи для прогнозирования используют полиномы не выше третьего порядка [13].

Результаты предварительной аппроксимации фактических уровней временного ряда с использованием различных математических функций представлены в табл. 3. В качестве критериев оценки качества уравнения тренда использовались наиболее часто применяемые для данных целей коэффициент детерминации R^2 и средняя абсолютная ошибка аппроксимации \bar{A} .

Таблица 3

Показатели адекватности аппроксимации для различных функций тренда $K_{\text{орг}}$ Indicators of the adequacy of the approximation for various trend $K_{\text{орг}}$ functions

Показатель	Функции						
	Линейная	Полином 2-й степени	Полином 3-й степени	Степенная	Экспоненциальная	Логарифмическая	Гиперболическая
Коэффициент детерминации R^2	0,583	0,735	0,79	0,747	0,591	0,746	0,681
Средняя абсолютная ошибка аппроксимации \bar{A} , %	2,85	2,31	1,82	2,14	2,76	2,16	2,48

Наряду с оценкой параметров выбранных кривых, необходима их проверка на адекватность прогнозируемому процессу. Так, наилучшие показатели качества аппроксимации у полиномиального уравнения 3-й степени. Однако, как видно из рис. 2, экстраполяция полиномиального тренда третьей степени уже до наступления 2026 г. приводит к значениям коэффициента $K_{\text{орг}}$ ниже единицы, что в нашем случае нарушает причинно-следст-

венные связи, означая уменьшение фактических объемов КПО ниже обязательных регламентируемых объемов.

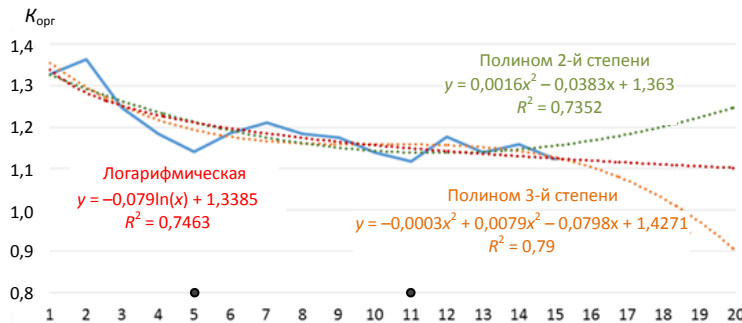


Рис. 2. Подбор модели кривой роста показателя $K_{орг}$

Fig. 2. Selection of the model of the growth curve of the $K_{орг}$ index

Наилучшими, практически совпадающими показателями точности аппроксимации обладают степенная и логарифмическая модели тренда. Степенная функция ($y = ax^b$) широко используется в экономических исследованиях в связи с удобной интерпретацией параметра b , равного коэффициенту эластичности и показывающего процентное изменение результирующего признака при изменении факторного признака на 1 %. Однако в нашем случае данная интерпретация не содержит смысла. В то же время, характер кривой роста, описываемой логарифмической зависимостью, полностью отвечает нашим представлениям о постепенном снижении показателя $K_{орг}$ и его стабилизации со временем, зависимость от которого к тому же выражается в наглядной форме.

Таким образом, принимаем логарифмическую модель кривой роста с уравнением

$$y = 0,08\ln(t) + 1,34. \quad (7)$$

Все входящие в уравнение коэффициенты значимы при уровне $\alpha = 0,05$ ($t_{кр} = 2,533$), критерий Фишера ($F = 38,26$) подтверждает значимость уравнения регрессии в целом.

Используя линию тренда как наиболее устойчивую компоненту временного ряда, можно переходить к его дальнейшей декомпозиции. Визуальный анализ графика исследуемого ряда позволяет предположить существование циклической составляющей (три цикла, деление происходит в точках 5 и 11 рис. 2). Коррелограмма временного ряда представлена на рис. 3. Статистически значимы коэффициенты автокорреляции r_1 , r_5 и r_6 , анализ выборочной автокорреляционной функции позволяет сделать вывод о наличии в изучаемом временном ряду наряду с трендом циклических колебаний периодичностью в 5 или 6 лет. Предварительное сравнение качества моделей показало предпочтительный лаг цикла $l = 6$.

Циклическую компоненту крайне трудно идентифицировать формальными методами, исходя только из данных изучаемого ряда [14], необходим содержательный анализ причин возникновения колебательной динамики. В нашем случае задачу облегчает то, что газораспределительная система страны исторически объединена в рамках единой республиканской структуры – государственного производственного объединения (ранее – концерна) «Белтопгаз», что обеспечило преемственность в формировании управленческих подходов и производственных практик, а также проведение (с определенными региональными особенностями) единой технической политики.

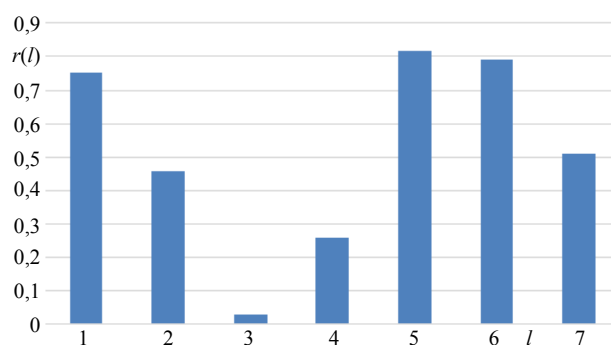


Рис. 3. График выборочной автокорреляционной функции (коррелограмма)

Fig. 3. Graph of the stlective autocorrelation function (correlogram)

Таким образом, на основании проведенного анализа 1-й цикл можно связать с переходом на кустовой метод проведения КПО, когда в региональных (областных) газоснабжающих организациях создавались укрупненные бригады для обслуживания сразу несколько районов, с центральной головной бригадой, имеющей расширенную зону обслуживания и наделенной функциями контроля качества проведения работ на местах. Данный принцип был рекомендован решением Ведомственной координационной группы по защите от коррозии, и в конечном итоге реализован в большинстве газоснабжающих организаций. 2-й цикл совпадает с упоминаемой выше оптимизацией организационной структуры в системе ГПО «Белтопгаз», проведенной в 2015–2016 гг. 3-й цикл можно связать с завершающим этапом внедрения отраслевых программных комплексов, автоматизирующих технологический процесс приборного обследования [15], а также появлением отечественной приборной техники контроля качества изоляции с эргономичным интерфейсом управления и цифровыми функциями (запись параметров трассы и т. п.). Возможно, следует также учитывать повышение мотивации работников в связи с частичным переходом на сдельную форму оплаты труда.

В связи со сложностью организационно-территориальной структуры газового хозяйства и неоднородностью условий логистики для различных

сегментов газораспределительной сети можно ожидать повторяемости колебательных эффектов от внешних импульсов различного характера (управленческого, технического) и их частичное наложение, то есть сохранения (во всяком случае в течение какого-то времени) цикличности в развитии изучаемого процесса.

Таким образом, общая точность модели будет определяться не только точностью тренда, но и точностью моделирования циклических колебаний. Учитывая, что амплитуда колебаний около тренда в наблюдаемый период имеет примерно постоянный характер, наиболее адекватной изучаемому процессу будет аддитивная модель вида

$$y_t = u_t + c_t + \varepsilon_t. \quad (8)$$

Выделение циклической составляющей для данной модели производилось методом абсолютных разностей с использованием корректирующего коэффициента, выровненные расчетные значения для шести периодов цикла представлены в табл. 4. Сумма значений равна нулю, что подтверждает корректность расчета циклической компоненты.

Таблица 4

Показатели циклической компоненты

Indicators of the cyclic component

Период цикла	1	2	3	4	5	6
Циклическая компонента, c_t	0,0062	0,0402	0,0018	-0,0215	-0,0343	0,0076

Полученная модель характеризуется: остаточным среднеквадратичным отклонением $\hat{\sigma} = 0,0223$; коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$; средней абсолютной ошибкой аппроксимации $\bar{A} = 1,38 \%$; средней относительной ошибкой $\bar{A}_{\text{ск}} = 1,88 \%$.

Критерий Фишера $F = 130,59$, модель статистически значима. Проверка нормальности распределения остаточной компоненты $RS = 3,551$. Модель адекватна по нормальности распределения остатков. Статистика Дарбина–Уотсона $DW = 2,112$, автокорреляция остатков отсутствует. Проверка на гомоскедастичность: коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\hat{r} = -0,507$ ($T_{\text{кр}} = 0,605$). Гетероскедастичность остатков отсутствует.

Следует отметить, что неверная оценка качества модели может быть получена по любому отдельно взятому критерию – значению средней ошибки аппроксимации, или значению коэффициента детерминации, или при проверке статистической значимости уравнения по критерию Фишера. Вместе с тем проявление ошибочного оценивания регрессионной модели по всему комплексу использованных критериев и коэффициентов маловероятно [16].

Таким образом, можно заключить об адекватности и высоких прогностических качествах полученной тренд-циклической модели и использо-

вать ее для расчета значений коэффициента влияния организационно-логистического фактора на интересующий нас период (рис. 4).

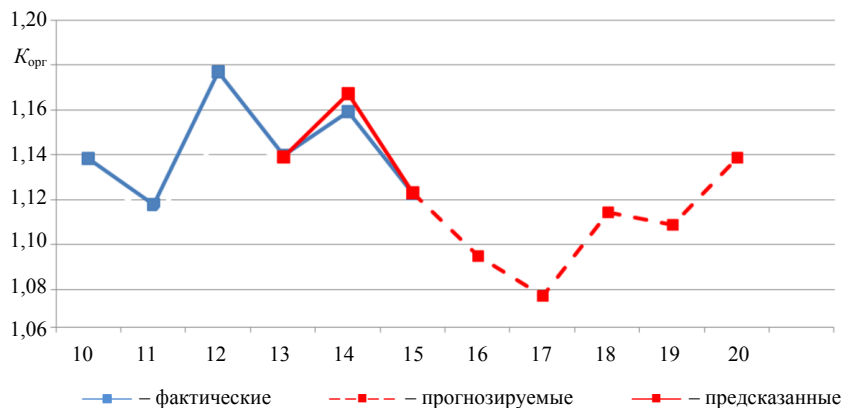


Рис. 4. Прогноз динамики изменения показателя $K_{орг}$

Fig. 4. Forecast of dynamics of change in the $K_{орг}$ index

Принимая за базу планирования протяженности газопроводов за 2019–2023 гг., имея значения $Q_{регл}$ и $K_{орг}$, можно рассчитать точечный прогноз объемов работ по КПО стальных подземных распределительных газопроводов в целом по отрасли на пятилетний цикл 2024–2028 гг. (табл. 5).

Таблица 5

Точечный прогноз объемов работ по приборному обследованию газопроводов
Point forecast of the volume of work on the instrument inspection of gas pipelines

Показатель	Год					
	2024	2025	2026	2027	2028	Σ
Объемы работ, тыс. км	6372,5	6309,4	6552,9	6538,7	6738,4	32511,9

Таким образом, получены научно обоснованные прогнозные значения для обеспечения рационального планирования объема работ по ключевому виду эксплуатационного контроля объектов газораспределительной сети республики. Вместе с тем необходимо учитывать, что данная оценка объемов исходит из условия сохранения сложившихся в газовом хозяйстве республики тенденций и условий, не включает риски внезапных воздействий и форс-мажорных обстоятельств и требует своевременной актуализации по мере прохождения прогнозного периода.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа динамики объемов обследования подземных распределительных газопроводов в Республике Беларусь за период 2009–2023 гг. впервые выделен организационно-логистический фактор, отражающий воздействие сложившейся на уровне хозяйствующего субъек-

та производственной практики и управленческих подходов на процессы технического обслуживания и оказывающий непосредственное влияние на объемы выполняемых работ и плотность обслуживания объектов. Показано, что действие данного фактора носит системный характер, особенно при обслуживании протяженных и территориально разнесенных трубопроводных сетей, и может быть выражено в виде соответствующего показателя (коэффициента) $K_{\text{орг}}$, представляющего собой отношение объемов фактически выполняемых работ к регламентируемым (минимально обязательным) работам.

2. Проведено исследование динамики показателя организационно-логистического фактора $K_{\text{орг}}$ с использованием имеющих высокую актуальность и прогностический потенциал методов анализа временных рядов. Предложена аддитивная тренд-циклическая модель ряда, чувствительная к влияниям на процесс технического обслуживания эффектов от структурных перестроек, внедрения технических новшеств и изменений в мотивации работников. Построенная модель удовлетворяет общепринятым показателям качества, точности и адекватности.

3. Предложено объяснение причин колебательного характера результирующего действия организационно-логистического фактора, имеющих место в сложности организационно-территориальной структуры газового хозяйства, неоднородности условий логистики для различных сегментов газораспределительной сети и наложении частных эффектов от внешних импульсов различного (управленческого, организационного, технического) происхождения.

4. Выполнен точечный среднесрочный прогноз объемов работ по КПО стальных подземных распределительных газопроводов в целом по газораспределительной системе страны на пятилетний цикл 2024–2028 гг., применимый для расчета отраслевых плановых показателей. Предлагаемая авторами методика прогнозирования может быть использована для планирования работ по техническому обслуживанию различных систем и объектов инженерной инфраструктуры, что имеет непосредственную практическую значимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. Минск: ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», 2023. 185 с.
2. СТП 03.05–2014. Система технического обслуживания и ремонта систем газоснабжения. Периодическое приборное техническое обследование стальных подземных газопроводов. Минск: УП «НОТ», 2014. 17 с.
3. Дуброва, Т. А. Статистические методы прогнозирования / Т. А. Дуброва. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.
4. Хацкевич, Г. А. Эконометрика: учебник / Г. А. Хацкевич, Т. В. Русилко. Минск: РИВШ, 2021. 452 с.
5. Лаптева, Е. В. Статистические методы оценки принятия управленческих решений / Е. В. Лаптева, Л. В. Золотова. Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. 115 с.

6. Введение в анализ временных рядов: учеб. пособие для вузов / Н. В. Артамонов [и др.]; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Московская школа экономики. Вологда: ВолНЦ РАН, 2021. 134 с.
7. Сидоров, С. Г. Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии / С. Г. Сидоров, А. В. Никологорская // Вестник ИГЭУ. 2010. № 3. С. 1–3.
8. Малышев, Е. А. Повышение эффективности энергопотребления в бюджетной сфере региона / Е. А. Малышев // Региональная экономика: теория и практика. 2007. № 7. С. 99–108.
9. Бугаева, Т. М. Современные методы планирования энергосистемы города / Т. М. Бугаева, О. В. Новикова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387>.
10. Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем / С. Р. Саитов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91>.
11. Энциклопедия статистических терминов. Т. 1: Методологические основы статистики. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2011. 183 с.
12. ГОСТ 10518–88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1988. 28 с.
13. ГОСТ Р 51372–99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. М.: Изд-во стандартов, 2000. 59 с.
14. ГОСТ Р ИСО 5275-2–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. М.: Изд-во стандартов, 2002. 51 с.
15. Садовникова, Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб.-метод. комплекс / Н. А. Садовникова, Р. А. Шмойлова. М.: Ун-т Синергия, 2016. 151 с.
16. Трофимец, А. А. Аналитическое выравнивание временных рядов: теоретические аспекты / А. А. Трофимец, Е. Н. Трофимец // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11–3 (79). С. 262–267.
17. Громова, Н. М. Основы экономического прогнозирования / Н. М. Громова, Н. И. Громова. М.: Академия естествознания, 2007. 112 с.
18. Воскобойников, Ю. Е. Эконометрика в Excel. Ч. 2: Анализ временных рядов: учеб. пособие / Ю. Е. Воскобойников. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 156 с.
19. Струцкий, Н. В. Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>.
20. Большакова, Л. В. Проблемы использования средней ошибки аппроксимации в качестве критерия адекватности регрессионной модели / Л. В. Большакова, А. В. Грачев // Региональная информатика и информационная безопасность: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г.). Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербург. общества информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2016. С. 162–164.

Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 19.12.2023 Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. *Rules for Ensuring Industrial Safety in the Field of Gas Supply of the Republic of Belarus*. Minsk, GAZ-INSTITUT, 2023. 185 (in Russian).
2. STP 03.05–2014. *The System of Technical Maintenance and Repair of Gas Supply Systems. Periodic Instrument Technical Inspection of Steel Underground Gas Pipelines*. Minsk, UE “NOT”, 2014. 17 (in Russian).
3. Dubrova T. A. (2003) *Statistical Methods of Forecasting*. Moscow: UNITY-DANA Publ. 206 (in Russian).

4. Khatskevich G. A., Rusilko T. V. (2021) *Econometrics*. Minsk, National Institute for Higher Institute. 452 (in Russian).
5. Lapteva E. V., Zolotova L. V. (2015) *Statistical Methods for Evaluating Managerial Decision-Making*. Orenburg, Universitet Publ. 115 (in Russian).
6. Artamonov N. V., Ivin E. A., Kurbatsky A. N., Fantazzini D. (2021) *Introduction to Time Series Analysis: a Textbook for Universities*. Vologda, Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences. 134 (in Russian).
7. Sidorov S. G., Nikologorskaya A. V. (2010) Time Series Analysis as a Method of Forecasting Electricity Consumption. *Vestnik IGEU*, (3), 1–3 (in Russian).
8. Malyshev E. A. (2007) Improving the Efficiency of Energy Consumption in the Budgetary Sphere of the Region. *Regional Economics: Theory and Practice*, (7), 99–108 (in Russian).
9. Bugaeva T. M., Novikova O. V. (2019) Modern Methods of Urban Energy System Planning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-377-387> (in Russian).
10. Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A., Karnitsky N. B. (2024) Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91> (in Russian).
11. *Encyclopedia of Statistical Terms. Vol. 1. Methodological Foundations of Statistics*. Moscow, Federal State Statistics Service, 2011. 183 (in Russian).
12. State Standard 10518–88. *Electrical Insulation Systems. General Requirements for Accelerated Heat Resistance Testing Methods*. Moscow, USSR State Committee for Standards, 1988. 28 p. (in Russian).
13. State Standard of Russia 51372–99. *Methods of Accelerated Tests for Durability and Persistence under the Influence of Aggressive and Other Special Media for Technical Products, Materials and Material Systems*. Moscow, Publishing House of Standards, 2000. 59 (in Russian).
14. State Standard of Russia ISO 5275-2-2002. *Accuracy (Correctness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 2*. Moscow, Publishing House of Standards, 2022. 51 p. (in Russian).
15. Sadovnikova N. A., Shmoylova R. A. (2009) *Time Series Analysis and Forecasting*. Moscow, University “Synergy”. 264 (in Russian).
16. Trofimets A.A., Trofimets E.N. (2021) Analytical Alignment of Time Series: Theoretical Aspects. *Aktual'nye Nauchnye Issledovaniya v Sovremennom Mire*, (11–3), 262–267 (in Russian).
17. Gromova N. M., Gromova N. I. (2007) *Fundamentals of Economic Forecasting*. Moscow, Academy of Natural Sciences. 112 (in Russian).
18. Voskoboinikov Yu. E. (2008) *Econometrics in Excel. Part 2. Time Series Analysis*. Novosibirsk, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN). 156 (in Russian).
19. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained in the Course of Instrument Inspection of Steel Underground Gas Pipelines. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (1), 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66> (in Russian).
20. Bolshakova L. V., Grachev A. V. (2016) Problems of Using the Average Approximation Error as a Criterion for the Adequacy of the Regression Model. *Regional'naya Informatika i Informatsionnaya Bezopasnost': Materialy Mezhdun. Nauch.-Prakt. Konf. (Sankt-Peterburg, 26–28 Oktyabrya 2016 g.)* [Regional Informatics and Information Security: Materials of International Scientific-and-Practical Conference (St. Petersburg, October 26–28, 2016)]. St. Petersburg, Publishing House of the St. Petersburg Society of Informatics, Computer Technology, Communication and Control Systems, 162–164 (in Russian).