

Пономарева Марина Андреевна

Ponomareva Marina Andreevna

Балашовский институт Саратовского государственного университета

Balashov Institute of Saratov State University

Аспирант/Post graduate student

E-Mail: Mig0109@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

Ovchinnikov Igor Georgievich

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Профессор/professor

E-Mail: bridgesar@mail.ru

Оценка напряженного состояния магистрального трубопровода при неполной информации о ряде параметров расчетной схемы

Estimate of the pipeline stress state with incomplete information about the items a
design scheme

Аннотация: Рассмотрены различные подходы к оценке работоспособности магистрального трубопровода. Основное внимание уделяется анализу детерминированной и нечетко-множественной оценки напряженного состояния и прочности магистрального трубопровода, отмечены плюсы и минусы применения этих подходов для оценки риска возникновения аварии трубопровода.

The Abstract: The article considers different approaches to the evaluation of efficiency of trunk pipeline. The main attention is paid to the analysis of deterministic and fuzzy-multiple evaluation of the stress condition and strength of the pipeline, marked the pros and cons of the use of these approaches to assess the risk of failure of the pipeline.

Ключевые слова: Прочность трубопровода, нечетко-множественный подход, напряженное состояние, неполная информация

Keywords: The strength of the pipeline, fuzzy-set approach, stress state, incomplete information

Трубопроводному транспорту присущ целый ряд специфических особенностей, ведь он охватывает многие отрасли народного хозяйства. Трубопроводы имеют огромную протяженность и предназначены для передачи на расстояние жидких, газообразных или твердых продуктов, в том числе высокоагрессивных, токсичных, пожаровзрывоопасных, канцерогенных и радиоактивных. Кроме того, прокладка трубопроводов осуществляется и под землей, и под водой, и внутри строительных конструкций, что усложняет их монтаж и техническое обслуживание. А аварии на трубопроводах очень опасны, так как сопровождаются большими потерями природных ресурсов и широкомасштабным загрязнением окружающей среды. Качество линейной части газопровода определяется множеством его внутренних и внешних свойств, главное из которых конструктивная надежность (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость) [1]. Надежность трубопровода можно представить в виде совокупности требований к прочности материала трубы, сварных соединений, эффективности

конструктивных решений и характеру нагрузок. К этим объектам применяется аппарат прочностного математического моделирования, на основе которого формулируются расчетные критерии и выполняются оценки надежности и ресурса, что в результате дает возможность создать нормативные материалы, методические рекомендации и средства повышения механической надежности. Методики, применяемые при расчете трубопроводных конструкций, были разработаны А.Б. Айнбиндером, П.П. Бородавкиным, И.Г. Овчинниковым, В.В. Харионовскими другими [2 - 13].

Расчетную схему трубопроводов рекомендуется принимать с целью возможно более точного отражения условий работы трубопровода и его взаимодействия с грунтом.

Безусловно, долговечность и прочность трубопроводов зависят от разнообразных внешних воздействий, таких как температурное расширение, сосредоточенные и распределенные нагрузки, смещение опор, и других. Для оценки сопротивляемости трубопровода к таким воздействиям необходимо производить грамотные расчеты с использованием передовых технологий, способных свести риск к минимуму, обеспечив надежность и безопасную эксплуатацию трубопроводных систем. Вот почему столь важны расчеты трубопроводов на прочность и долговечность, благодаря которым обеспечивается их надежная работа в течение заданного срока службы.

Прочность — свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. В настоящее время при расчёте на прочность используют как расчёт по допускаемым напряжениям, так и расчёт по допускаемому числу циклов нагружения. Основные неравенства расчёта по допускаемым напряжениям:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \tau_{\max} \leq [\tau],$$

где

- σ_{\max} и τ_{\max} — наибольшие расчётные нормальное и касательное напряжения, соответственно;
- $[\sigma], [\tau]$ — допускаемые нормальное и касательное напряжения, безопасные для прочности детали.

Расчет линейных частей магистральных газопроводов чаще всего производится на основе традиционных методов строительной механики. Среди параметров, оказывающих значимое влияние на надежность трубопровода, можно выделить четыре основные группы:

- механические свойства материала
- геометрические размеры труб
- дефектность
- нагрузки и воздействия.

Обеспечение прочности газопроводов осуществляется следующим образом. На стадии их проектирования производится расчётная или экспериментальная оценка возможности развития в несущих элементах проектируемых конструкций процессов разрушений различных типов: усталостного, хрупкого, квазистатического, разрушения вследствие ползучести материала, коррозии, износа в процессе эксплуатации и т. п. При этом должны быть рассмотрены все возможные в условиях эксплуатации конструкции и известные на данный момент механизмы разрушения материала, из которого выполнены её несущие элементы. По предельным значениям далее определяются допускаемые значения этих критериев. Последние определя-

ются, как правило, путём деления предельных значений критериев прочности на соответствующий коэффициент запаса прочности. Значения коэффициентов запаса прочности назначаются на основе опыта эксплуатации с учётом степени ответственности проектируемой конструкции, расчётного срока её эксплуатации и возможных последствий её разрушения. Расчет линейных частей магистральных трубопроводов проводится на основе традиционных методов строительной механики с использованием концепции коэффициентов запаса. Такой подход существенно упрощает решение многих задач, связанных с проектированием конструкций.

При детерминистическом подходе коэффициенты запаса и параметры сопротивления необходимо уточнять при помощи методов, основанных на базе практического опыта эксплуатации.

Для детерминированных расчетов свойственно использование пространственной дискретной модели. Детерминированная модель, даже очень сложная, позволяет ограничиться однократным решением задачи на ЭВМ. При использовании метода конечных элементов применяется аппарат механики сплошной среды [9], дискретная модель газопровода и воздействий, которая отражает совокупность установленных закономерностей, информацию о пространственном положении газопровода, полученную с помощью внешней и внутритрубно-диагностики. Дискретная модель позволяет описывать статические задачи системами алгебраических уравнений.

Полученные таким образом детерминированные модели имеют ограниченное применение. С одной стороны, они используются в качестве научного инструмента, заменяющего дорогостоящие натурные эксперименты, при проектировании и оценке надежности при эксплуатации линейной части трубопровода. Но с другой стороны модели пытаются использовать для целей прогноза и мониторинга реальных объектов, что естественно, в силу сложности самого моделируемого объекта ведет к печальным последствиям. Ошибочность выбора важнейших технологических параметров системы (основных характеристик газопровода, взаимодействие газопровода с агрессивной окружающей средой) может потребовать в дальнейшем значительных материальных затрат и усилий для их исправлений.

Основное препятствие для применения детерминированных моделей - отсутствие полной информации о дефектах газопровода и большие погрешности в данных, полученных при диагностике. В своих работах В.Ф. Дмитриев и Г.Х. Мурзаханов обращают внимание на необходимость дополнения детерминированного расчета критериями статической и циклической трещиностойкости. В настоящее время также в практику расчетов внедряются и полудетерминистические методы, основанные на сочетании этих методов. Подробнее анализ методик оценки работоспособности трубопровода описан в статье [14].

При применении вероятностного подхода к оценке показателя надежности линейной части газопровода, формулы имеют вид

$$P_i(t) = \exp(-\Delta L_i t \sum_{j=1}^N \mu_{ij} H_{ij}(\Phi_j)) \quad (1)$$

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы участка линейной части магистрального газопровода за эксплуатационный период $[0, t]$, ΔL_i - длина i -го участка газопровода; t - временной параметр продолжительности эксплуатации; μ_{ij} - интенсивность возникновения предельных состояний класса Φ_j на i -ом участке газопровода; H_{ij} - вероятность отказа, соответствующего нарушению предельного состояния класса Φ_j ; \tilde{N}_f - число классов Φ_j . Парциальный риск H_{ij} соответствует вероятности того, что среди множества возможных состояний i -го участка на практике будет реализовано состояние, принадлежащее классу Φ_j [1].

Вероятность числа отказов Q_{ij} вычисляется индивидуально для каждого отдельного класса Φ_j и на i -ом участке и определяется функцией распределения вероятности по отношению к формализованному критерию предельного состояния типа Φ_j . Для определения вероятностей Q_{ij} требуется знание функции распределения или плотности распределения вероятности [1]. Если таковых формализованных соотношений нет, то применимы приближенные методы статистического моделирования (Монте-Карло), для реализации которых достаточно статистической информации о потоке исходных событий.

Таким образом, если известно распределение вероятностей основных параметров системы, то для оценки надежности линейной части газопровода целесообразно использовать вероятностный подход.

Однако для использования вероятностных подходов к оценке надежности необходимо выполнение следующих условий: 1) нормальное распределение параметров; 2) некоррелируемость данных.

Прочность газопровода в продольном направлении проверяется по условию

$$|\sigma_{np}^H| \leq \psi_3 \frac{m}{0.9k_n} R_2^H; \quad (2)$$

где σ_{np}^H - максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий; ψ_3 - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб, при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{np}^H > 0$) принимаемый равным единице, при сжимающих ($\sigma_{np}^H < 0$) - определяемый по формуле

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m}{0.9k_n} R_2^H} \right)^2} - 0,5 \left(\frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m}{0.9k_n} R_2^H} \right); \quad (3)$$

m - коэффициент условий работы трубопровода; R_2^H - нормативные сопротивления растяжению (сжатию) металла труб; k_n - коэффициент надежности по назначению трубопровода; $\sigma_{кц}^H$ - кольцевые напряжения от нормативного (рабочего) давления, МПа, определяемые по формуле:

$$\sigma_{кц}^H = \frac{pD_{вн}}{2\delta}; \quad (4)$$

p - рабочее давление; $D_{вн}$ - наружный диаметр трубы.

Максимальные суммарные продольные напряжения σ_{np}^H , МПа, определяются от всех (с учетом их сочетания) нормативных нагрузок и воздействий с учетом поперечных и продольных перемещений трубопровода в соответствии с правилами строительной механики [4,8,9]. При определении жесткости и напряженного состояния отвода следует учитывать условия его сопряжения с трубой и влияние внутреннего давления. В частности, для прямолинейных и упруго-изогнутых участков трубопроводов при отсутствии продольных и попереч-

ных перемещений трубопровода, просадок и пучения грунта максимальные суммарные продольные напряжения от нормативных нагрузок и воздействий - внутреннего давления, температурного перепада и упругого изгиба σ_{np}^H , МПа, определяются по формуле [15]:

$$\sigma_{np}^H = \mu \sigma_{ки}^H - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_n}{2\rho}; \quad (5)$$

α_t - коэффициент линейного расширения металла трубы, град⁻¹; E - переменный параметр упругости (модуль Юнга), МПа; Δt - расчетный температурный перепад, принимаемый положительным при нагревании, °С; μ - переменный коэффициент поперечной деформации стали (коэффициент Пуассона); D_n – наружный диаметр; ρ - минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, см. Но распределение вероятностей большинства параметров часто не может быть точно определено. Кроме того, применение аппарата теории вероятностей предполагает отождествление таких понятий как “случайность” и “неопределённость”.

Для решения таких задач требуются специальные методы обработки размытой информации, такие как математический аппарат теории нечетких множеств.

Неопределенность возникает как при неполноте информации (например, невозможно точно узнать физико-механические свойства сооружения в любой точке), так и ее при недоступности (например, при проектировании конструкции невозможно предусмотреть все возможные режимы ее работы). Неопределенность отдельных видов информации не может быть полностью преодолена, и насколько бы при проектировании подробно не были изучены все доступные материалы, невозможно в расчетной модели учесть все возможные ситуации. Обычно для обращения с неточно известными величинами применяется аппарат теории вероятностей. Однако случайность связана с неопределенностью, касающейся принадлежности некоторого объекта к обычному множеству. Различие между нечеткостью и случайностью приводит к тому, что математические методы нечетких множеств совершенно не похожи на методы теории вероятностей.

Теория нечетких (размытых) множеств была впервые предложена американским математиком азербайджанского происхождения Лотфи Заде в 1965 г. и использовалась для преодоления трудностей представления неточных понятий, анализа и моделирования систем, в которых участвует человек. Теоретические основы указанного подхода являются точными и строгими в математическом смысле и не являются сами по себе источником неопределенности. Под нечетким множеством A в U понимается, как обычно, совокупность пар вида $(u, \mu_A(u))$ где $u \in U$, $\mu_A(u)$ — значение функции принадлежности $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$; U — некоторое множество (в обычном смысле), называемое универсальным. Отличительной особенностью теории нечетких множеств является то, что все параметры представлены не точным числом, а некоторым множеством, при этом каждому элементу из этого множества ставится в соответствие значение функции принадлежности.

Алгоритм оценки надежности линейной части газопровода можно представить в виде:

1) Выбрать необходимые для оценки прочности входные данные (свойства материала, свойства грунта и др.).

2) Провести сбор информации и на основе экспертной процедуры определить термножество нечетких параметров, описывающих состояние газопровода. Если некоторые параметры представлены четким числом, то произвести фазификацию.

3) Определить вид функции принадлежности.

4) Определить правила нечеткого логического вывода в виде:

Если $\tilde{x} \in \tilde{A}_1(x_2 \in \tilde{A}_2(\dots, (x_n \in \tilde{A}_n), \dots))$, то $\tilde{y}_j \in \tilde{B}_j, j = \overline{1, m}$,

Если невозможно задать правила при помощи экспертов или с помощью уравнений, отражающих связь входных и выходных параметров, то для оценки влияния каждого входного параметра на надежность газопровода целесообразно использовать нечеткие нейронные сети.

- 5) Произвести расчет надежности линейной части газопровода.
- 6) Провести дефазификацию нечеткого множества выходной переменной.

Во всяком конкретном случае степень точности решения может быть согласована с запросами задачи и точностью существующих данных. Такая гибкость составляет одну из важных черт рассматриваемого метода. Возможности использования теории нечеткой логики подробнее описывается в статье [16].

Представим давление в трубопроводе в виде нечеткого треугольного числа. Такие функции принадлежности применяются на практике довольно часто, что обусловлено их простотой. Существенным преимуществом многоугольных функций принадлежности является то, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями объем информации, который в данном случае ограничивается данными об угловых точках, что является весьма важным обстоятельством при моделировании систем в условиях ограниченности объема исходных данных. Чтобы определить многоугольную функцию принадлежности, на практике обычно требуется задать лишь модальное значение соответствующего нечеткого множества [17].

Для удобства расчета кольцевого напряжения представим давление в виде нечеткого числа (L - R) типа.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L((m-x)/a), \forall x \leq m, a > 0, \\ R((x-m)/b), \forall x \geq m, b > 0, \end{cases} \quad (5)$$

где m – среднее значение (мода) нечеткого числа, a, b левый и правый коэффициенты нечеткости, соответственно. Учитывая введенные обозначения, нечеткое число принято представлять в виде тройки параметров (m, a, b) .

Тогда из (4) и (5) получим:

$$\sigma_{кц}^H = \left(\frac{m_p D_{вн}}{2\delta}; \frac{\alpha D_{вн}}{2\delta}; \frac{\beta D_{вн}}{2\delta} \right); \quad (7)$$

$$\sigma_{кц}^H = \left(\frac{\frac{m_p D_{вн}}{2\delta} \cdot \frac{mR_2^H}{0,9k_H}; \frac{\frac{m_p D_{вн}}{2\delta} \cdot 0 + \frac{mR_2^H}{0,9k_H} \cdot \frac{\alpha D_{вн}}{2\delta}}{\frac{mR_2^H}{0,9k_H} \left(\frac{mR_2^H}{0,9k_H} + 0 \right)}; \frac{\frac{m_p D_{вн}}{2\delta} \cdot 0 + \frac{mR_2^H}{0,9k_H} \cdot \frac{\beta D_{вн}}{2\delta}}{\frac{mR_2^H}{0,9k_H} \left(\frac{mR_2^H}{0,9k_H} - 0 \right)}} \right) =$$

$$\left(\frac{\frac{m_p D_{вн}}{2\delta} \cdot 0,9k_H}{2\delta mR_2^H}; \frac{0,9k_H \alpha D_{вн}}{2\delta mR_2^H}; \frac{0,9k_H \beta D_{вн}}{2\delta mR_2^H} \right); \quad (8)$$

Возведем (7) в вторую степень:

$$\sigma_{кц}^{H^2} = \left(\left(\frac{m_p D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right)^2; \left(2 \left(\frac{m_p D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right) \left(\frac{\alpha D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right) - \left(\frac{\alpha D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right)^2 \right); \quad (9)$$

$$\left(2 \left(\frac{m_p D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right) \left(\frac{\alpha D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right) + \left(\frac{\alpha D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} \right)^2 \right).$$

Заменим $\frac{D_{вн} 0,9k_H}{2\delta mR_2^H} = a$ и умножим на 0,75

$$0,75\sigma_{кц}^{H^2} = \left((0,75m_p a)^2; (1,5(m_p a)(\alpha a) - 0,75(\alpha a)^2); \quad (10)$$

$$(1,5(m_p a)(\beta a) + 0,75(\beta a)^2) \right);$$

исходя из (3) и (10) получим:

$$1 - 0,75\sigma_{кц}^{H^2} = \left((1 - 0,75m_p a)^2; 1,5am_p a\beta + 0,75(a\beta)^2; 1,5am_p \alpha a - 0,75(a\alpha)^2 \right), \quad (11)$$

Для того, чтобы найти квадратный корень из (10) найдем в соответствии с (3) значения x_1 и x_2 нечеткого множества, при котором функция принадлежности будет равна нулю:

$$x_1 = m - \alpha = 1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2,$$

$$x_2 = m + \beta = 1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2.$$

Найдем квадратный корень из получившихся выражений

$$x_1 = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2};$$

$$x_2 = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2}; \quad (12)$$

$$m = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}; \quad (13)$$

После вычисления квадратного корня подставим (12), (13) в (6) для того, чтобы привести нечеткое число в $(L-R)$ к виду:

$$\alpha = m - x_1 = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2}$$

$$\beta = x_2 - m = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}$$

Умножим (7) на 0,5:

$$0,5 \left(\begin{array}{c} \sigma_{кц}^H \\ m \\ 0,9k_H R_2^H \end{array} \right) = (0,5m_p a; 0,5\alpha a; 0,5\beta a)$$

Тогда (3) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Psi_3 = & (\sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - 0,5m_p a; \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - \\ & - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2} + 0,5\beta a; 0,5\alpha a + \\ & + \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставим в формулу (5) значения коэффициента Ψ_3 (14):

$$\begin{aligned} \sigma_{np}^H = & (\mu \frac{m_p D_{вн} 0,9k_H}{2\delta m R_2^H} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}; \mu \frac{\alpha D_{вн} 0,9k_H}{2\delta m R_2^H} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}; \\ & \mu \frac{\beta D_{вн} 0,9k_H}{2\delta m R_2^H} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}) \end{aligned}$$

Таким образом, с учетом преобразований, формулу (2) можно представить так:

$$\begin{aligned} & (\mu \frac{m_p D_{вн} 0,9k_H}{2\delta m R_2^H} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}; \mu \frac{\alpha D_{вн} 0,9k_H}{2\delta m R_2^H} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}; \\ & \mu \frac{\beta D_{вн} 0,9k_H}{2\delta m R_2^H} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_H}{2\rho}) \leq \frac{m}{0,9k_H} R_2^H (\sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - 0,5m_p a; \\ & \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2} + 0,5\beta a; \\ & 0,5\alpha a + \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}) \end{aligned}$$

Вывод: получено соотношение предельно допустимых значений напряжений линейной части магистрального трубопровода для оценки прочности при нечетких входных параметрах (рассматриваемом случае - внутреннего давления).

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Методы теории вероятности теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982, 351с.
2. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость, М., Недра, pp. 287, 1991. 286 с.
3. Айнбиндер А. Б., Камерштейн А. Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М., Недра, 1984. 341 с.
4. Бородавкин П. П., Синюков А. М. Прочность магистральных трубопроводов. М., Недра, 1984.
5. Иванцов, О.М. Надежность строительных конструкций магистральных трубопроводов. М. : Недра, 1985. – 231 с.
6. Ланчаков, Г.А., Работоспособность трубопроводов. В 3-х ч. Ч. 3. Диагностика и прогнозирование ресурса / Г.А. Ланчаков, Е.Е. Зорин, Ю.И. Пашков, А.И. Степаненко. – М. : ООО "Недра-Бизнесцентр", 2003. - 291 с.
7. Литвин, И.Е. Оценка показателей надежности магистральных трубопроводов / И.Е. Литвин, В.Н. Аликин. М.ООО."Недра-Бизнесцентр", 2003. – 167 с.
8. Наумова, Г.А. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций / Г.А. Наумова, И.Г. Овчинников. – Саратов: СГТУ, 2000. – 227 с.
9. Наумова Г.А., Овчинников И.Г., Снарский С.В. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями / Волгоград: Волгоград. Гос. Арх-строит ун-т, 2008. 184 с.
10. Овчинников И.Г., Муравьева Л.В., Пшеничкина В.А. Оценка надежности трубопроводной конструкции с эксплуатационными повреждениями. Изд-во СГТУ. Саратов, 2004. 255 с.
11. Харионовский, В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов / В.В. Харионовский. – М. : ОАО "Издательство «Недра»", 2000. – 467 с.
12. Харионовский, В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях / В.В. Харионовский. – Л.: Недра, 1990. – 180 с.
13. Харионовский, В.В. Надежность трубопроводных конструкций: теория и технические решения / В.В. Харионовский, И.Н. Курганова. – М. : Энергоцентр, 1995. – 125 с.
14. Пономарева М.А. Анализ существующих методик для оценки надежности трубопровода// Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. «Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве». Пермь. 2011. Том 2. С.122-127.
15. СНиП 2.05.06-85 (2000) Магистральные трубопроводы - М.: 2000, 71 с.
16. Пономарева М. А. Применение нечеткой логики для решения технических задач // «Инновационные технологии в обучении и производстве». Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции в г. Камышин, 15–16 декабря 2009 г. С. 149-153.
17. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798с.