УДК 622.691.4-192

МОНИТОРИНГ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ УЧАСТКОВ ГАЗОПРПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Сызранцев В.Н., Маер А.В., Голофаст С.Л.
Тюменский государственный нефтегазовый университет

Условием безопасной эксплуатации трубопровода является не превышение фактических напряжений (σ), возникающих в трубе (вследствие избыточного давления транспортируемого продукта, изменения температуры внешней среды, изгиба трубы, наличия различного рода коррозионных дефектов), допускаемых напряжений (s), отражающих физико-технические свойства материала трубы. В методиках определения технического состояния различных участков трубопровода для количественной оценки соотношения действующего и допускаемого напряжения используется коэффициент запаса прочности:

$$n_\sigma = s/\sigma, \tag{1}$$

нормативное значение которого [1, 2] принимается равным 1,2.

Входящие в зависимость (1) действующие σ и предельные s напряжения являются величинами случайными, в общем случае с неизвестными $f_\sigma(\sigma)$, $f_s(s)$ функциями распределения. В результате и величина n_σ является случайной, функция плотности распределения которой $f_n(n_\sigma)$ также неизвестна и зависит как от условий эксплуатации трубопровода, так и разброса механических свойств материала трубы.

В процессе мониторинга исследуемого участка трубопровода фиксируются значения внутреннего давления транспортируемой жидкости (газа) p и температуры окружающей среды t, позволяющие за определенный период наблюдения сформировать выборки длиной m: $p_i, t_i, i=\overline{1,m}$. Анализ зафиксированных в эксплуатации величин p и t свидетельствует, что описание их функций плотности распределения с использованием рассмотренных в теории вероятности и математической статистики [3] законов случайных величин с достаточной для применения ошибкой первого рода является исключением, нежели правилом. В этой связи, для решения задачи восстановления $f_\sigma(\sigma)$ предложено использовать аппарат непараметрической статистики [4] на основе результатов компьютерного моделирования выборки $\sigma_i, i=\overline{1,m}$ в соответствии с выражением [5]:

$$\sigma_i = \sigma(p_i,\ t_i, D_n, \delta, h, L, \psi)\ , \tag{2}$$

где: D_n - наружный диаметр трубы, δ - толщина стенки трубы, h - максимальная глубина дефекта, L - длина дефекта, ψ - коэффициент концентрации напряжений, вызываемый дефектом трубы размерами h и L [5].

Следуя работе [4], оценка искомой функции $f_\sigma(\sigma)$ представляется в виде разложения:

$$f_\sigma(\sigma) = \frac{1}{m \cdot h_m \cdot \sqrt{2\cdot\pi}} \sum_{i=1}^{m} \exp\left[-0{,}5\left(\frac{\sigma-\sigma_i}{h_m}\right)^2\right], \tag{3}$$

в котором значение параметра размытости h_m соответствует максимуму информационного функционала [4]:

$$\max_{h_m} J = \max_{h_m} \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \ln \left[\frac{1}{(m-1)h_m} \sum_{j \neq i}^{m-1} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-0{,}5 \left(\frac{\sigma_i - \sigma_j}{h_m} \right)^2 \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Для определения функции $f_s(s)$ используются данные механических испытаний образцов (предела прочности, предела текучести материала трубы), на основе которых имеем выборку длиной k значений предельных напряжений $s_j, j = \overline{1,k}$. Аналогично (3) и (4), на основе аппарата непараметрической статистики, оценка функции $f_s(s)$ ищется в виде:

$$f_s(s) = \frac{1}{k \cdot h_k \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \sum_{j=1}^{k} \exp\left[-0{,}5 \left(\frac{s - s_j}{h_k} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где параметр h_k определяется в процессе поиска максимума функционала:

$$\max_{h_k} J = \max_{h_k} \left\{ \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} \ln \left[\frac{1}{(k-1)h_k} \sum_{j \neq l}^{k-1} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-0{,}5 \left(\frac{s_j - s_l}{h_k} \right)^2 \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Следует отметить, что расчет выборки значений $n_{\sigma r}, r = \overline{1,N}$ непосредственно по формуле (1) возможен при условии, что длина выборок $\sigma_i, i = \overline{1,m}$ и $s_j, j = \overline{1,k}$ совпадает. В противном случае на основе функции $f_\sigma(\sigma)$ и $f_s(s)$ в соответствии с восстановленными законами необходимо реализовать алгоритм генерирования выборок случайных величин σ и s любой длины. Данный алгоритм представляет собой непараметрический датчик случайной величины [4] и позволяет организовать получение выборок $\sigma_r, r = \overline{1,N}$ и $s_r, r = \overline{1,N}$, на основе которых легко организовывается процесс расчета по выражению (1) выборки значений $n_{\sigma r}, r = \overline{1,N}$.

Одним из важнейших параметров технического состояния трубопровода в процессе его мониторинга в эксплуатации является квантильная оценка коэффициента запаса прочности, отражающая в вероятностном аспекте надежность работы трубопровода. Для решения этой задачи, воспользовавшись методами непараметрической статистики [4], на основе полученной выборки $n_{\sigma r}, r = \overline{1,N}$ восстановим функцию $f_n(n_\sigma)$ плотности распределения коэффициента запаса прочности:

$$f_n(n_\sigma) = \frac{1}{N \cdot h_n} \sum_{r=1}^{N} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-0{,}5 \left(\frac{n_\sigma - n_{\sigma r}}{h_n} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где h_n - параметр размытости, соответствующий максимуму информационного функционала (4), имеющего, в данном случае, вид:

$$\max_{h_n} J = \max_{h_n}\left\{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\ln\left[\frac{1}{(N-1)h_n}\sum_{j\neq i}^{N-1}\frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}}\exp\left(-0{,}5\left(\frac{n_{\sigma i}-n_{\sigma j}}{h_n}\right)^2\right)\right]\right\}. \quad (8)$$

Имея функцию $f_n(n_\sigma)$, квантильная (n_σ^α) оценка коэффициента запаса n_σ при заданной вероятности α сводится к решению численным методом относительно n_σ^α уравнения:

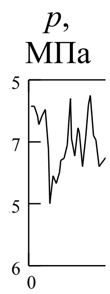
$$\frac{1}{N\cdot h_n\sqrt{2\pi}}\int_0^{n_\sigma^\alpha}\left\{\sum_{r=1}^{N}\exp\left[-0{,}5\left(\frac{n_\sigma-n_{\sigma r}}{h_n}\right)^2\right]\right\}dn_\sigma=\alpha. \quad (9)$$

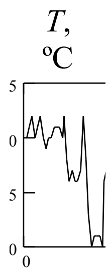
В процессе мониторинга запаса прочности исследуемого участка трубопровода функция $f_n(n_\sigma)$ может быть определена на основе выборок $p_i, t_i, i=\overline{1,m}$, ежедневно зафиксированных в течение различного, увеличивающегося, периода наблюдения, например, за один, два и так далее месяцев. Возникает вопрос, - при каком объеме исходной информации (длине выборки m) рассчитанные по формуле (9) значения квантильной оценки коэффициента запаса стабилизируются и насколько они отличаются по мере накопления информации? Результаты таких исследований позволят оценить эффективность методов непараметрической статистики при прогнозировании надежности работы трубопровода.

Для решения поставленной задачи воспользуемся данными ежедневного измерения внутреннего давления и температуры на одном из участков газопровода «Уренгой-Сургут-Челябинск» (D_n=1420мм; δ=20 мм; h=10 мм; L=300 мм; материал трубы – сталь 17ГС, значение коэффициента ψ рассчитано по методике [5]; выборка длиной $N=365$ допускаемых напряжений (предела прочности) $s_j, j=\overline{1,N}$ получена с помощью непараметрического датчика по усеченному слева и справа закону Грамма-Шарлье, параметры которого приняты следующими: среднее значение 570,9МПа; среднеквадратическое отклонение19,3МПа; асимметрия 0,1480; эксцесс 0,0209; $s_{\min}$ =530МПа; $s_{\max}$ =600МПа).

Реализуем следующую расчетную схему. Используя первые 31 значения $p_i, t_i, i=\overline{1,31}$, - данные за первый месяц мониторинга, по формуле (2) рассчитаем выборку $\sigma_i, i=\overline{1,31}$, на основе которой, максимизируя функционал (4), восстановим в виде (3) функцию $f_\sigma(\sigma)$ (рис.1).

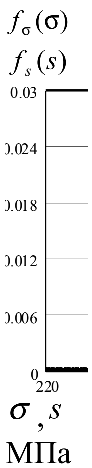
Давление и температура за первый месяц мониторинга газопровода





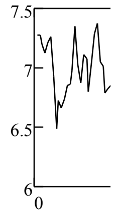
i – продолжительность мониторинга (дней)

Функции плотности распределения действующих и допускаемых напряжений

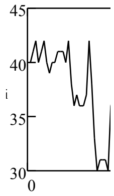


Давление и температура за второй месяц мониторинга газопровода

p,
МПа



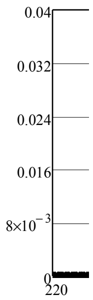
T, ºС



i –
продолжительность мониторинга (дней)

Функции плотности распределения действующих и допускаемых напряжений

$f_\sigma(\sigma)$
$f_s(s)$



σ , s
МПа

Давление и температура за двенадцать месяцев мониторинга газопровода

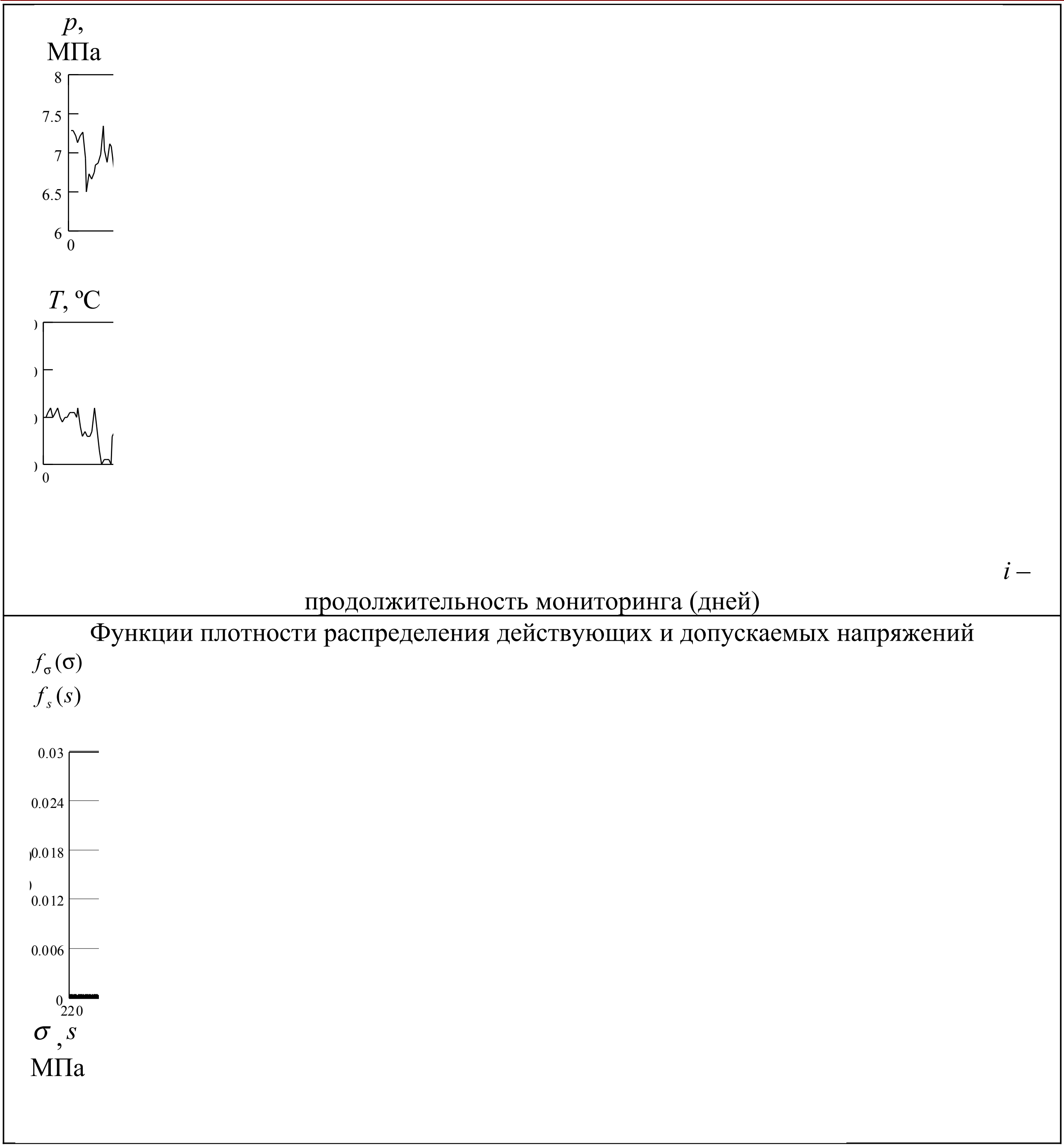
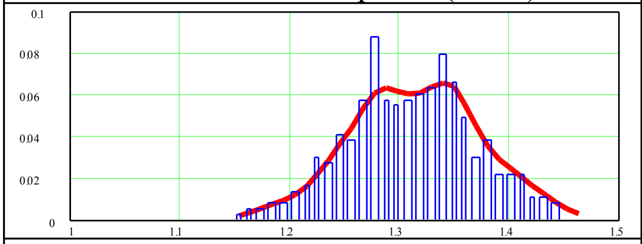
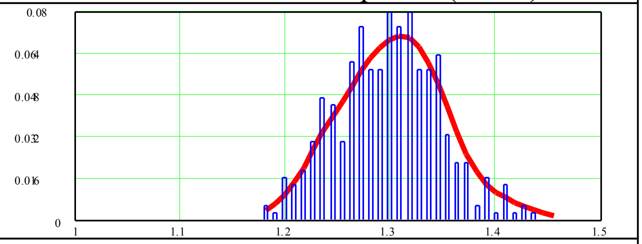
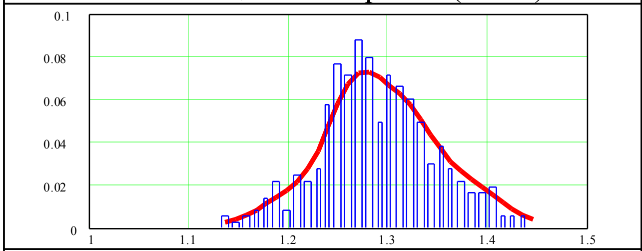
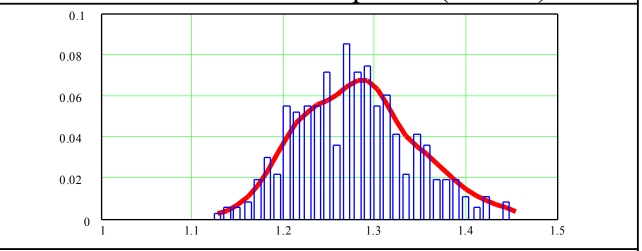
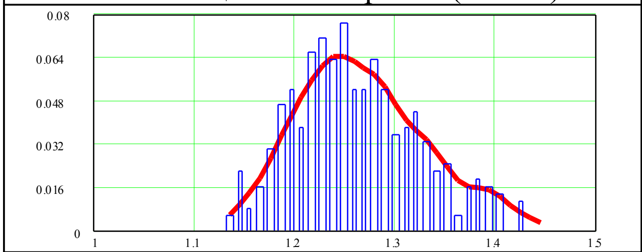
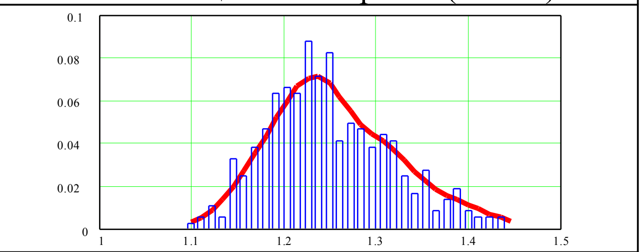
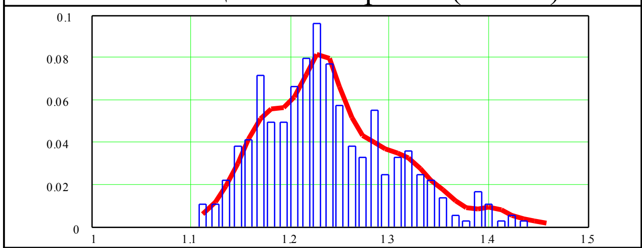
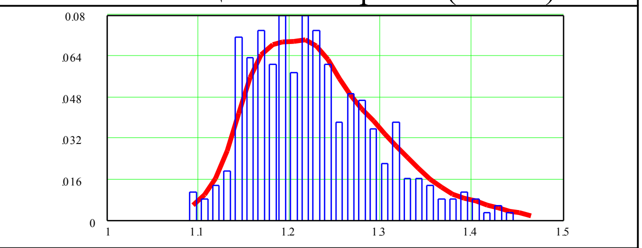
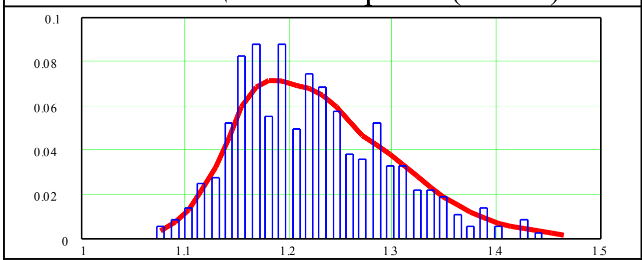
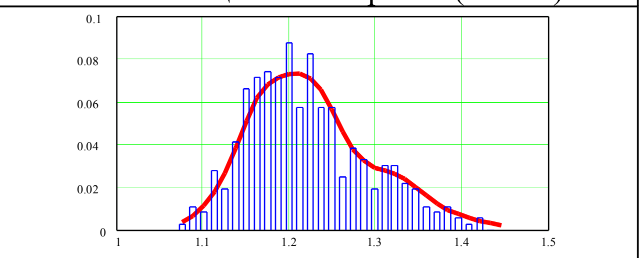


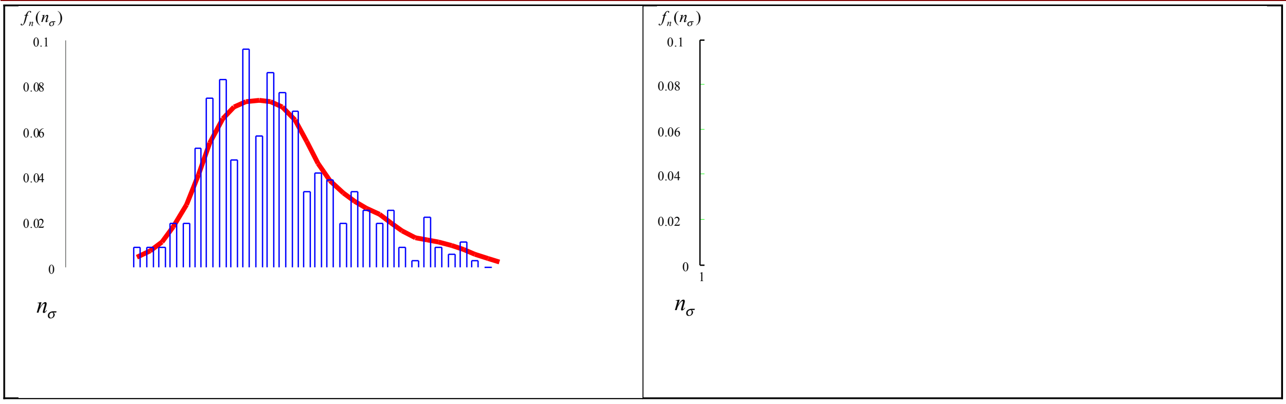
Рис.1 – Результаты расчета действующих и допускаемых напряжений

Решая 334 (N – 31) раза трансцендентное уравнение (8), доведем длину выборки $\sigma_i, i = \overline{1, N}$ до $N = 365$, что совместно с данными предела прочности $s_j, j = \overline{1,365}$ позволяет по зависимости (1) рассчитать выборку $n_{\sigma r}, r = \overline{1,365}$, восстановить в форме (7) с учетом (8) функцию $f_n(n_\sigma)$ и определить по (9) значение n_σ^α. Во втором варианте расчета используем первые 59 значений $p_i, t_i, i = \overline{1,59}$, - данные за первый и второй месяц мониторинга. Аналогичные расчеты выполним последовательно за три, четыре, …, 12 месяцев мониторинга. Функции $f_n(n_\sigma)$ плотности распределения коэффициента запаса прочности, полученные в процессе реализации выше рассмотренного алгоритма, представлены в таблице 1.

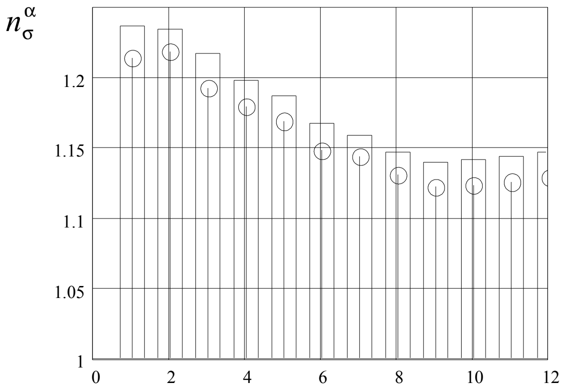
Таблица 1.

Функции плотности распределения коэффициентов запаса.

За 1 месяц мониторинга (m=31)	За 2 месяца мониторинга (m=59)
	
За 3 месяца мониторинга (m=90)	За 4 месяца мониторинга (m=120)
	
За 5 месяцев мониторинга (m=151)	За 6 месяцев мониторинга (m=181)
	
За 7 месяцев мониторинга (m=212)	За 8 месяцев мониторинга (m=243)
	
За 9 месяцев мониторинга (m=273)	За 10 месяцев мониторинга (m=304)
	
За 11 месяцев мониторинга (m=334)	За 12 месяцев мониторинга (m=365)



Результаты расчета квантильных оценок коэффициента запаса n_σ^α при $\alpha = 0{,}05$ и $\alpha = 0{,}10$ отражены на рис.2.



Продолжительность мониторинга (месяцев)

Рис.2. Квантильные оценки n_σ^α при $\alpha = 0{,}05$ (кружки) и $\alpha = 0{,}10$ (столбики).

Из анализа рис.2 следует, что стабилизация результатов расчета квантильных оценок коэффициента запаса для данного участка наступила после использования информации в течение восьми месяцев мониторинга газопровода. При этом, уже после мониторинга газопровода в течение первого месяца погрешность в прогнозных оценках квантиля коэффициента запаса прочности, снижающаяся по мере накопления информации, не превышает 8%, что свидетельствует об эффективности используемых в расчетах методов и алгоритмов непараметрической статистики.

Литература

1. Харионовский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов – М.: ОАО "Издательство "Недра", 2000. – 467 с.
2. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 516 с.
3. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
4. Сызранцев В.Н. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики / В.Н.Сызранцев, Я.П.Невелев, С.Л.Голофаст. – Новосибирск: Наука, 2008. – 218 с.
5. Теплинский Ю.А., Быков И.Ю. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. – М., 2007. – 400 с.