

Научная статья

УДК 614.8.084; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-89-103

## **МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМО- И ГИДРОМАГИСТРАЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

✉ Ляшевский Александр Валерьевич;

Головчинская Наталья Владимировна.

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия.

Вагин Александр Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ [11k77@mail.ru](mailto:11k77@mail.ru)

*Аннотация.* Рассмотрены сложные техносферные объекты – технические системы объектов наземной космической инфраструктуры, в состав которых входят пневмо- и гидромагистрали высокого давления.

С учетом необходимости внедрения комплекса мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций, возникающих при аварийной работе данных техносферных объектов, показаны способы прогнозирования остаточного ресурса составных частей систем, своевременной частичной замены элементов технологического оборудования и их ремонта, результатом которых является увеличение сроков безаварийной работы объектов наземной космической инфраструктуры.

Обоснована актуальность разработки методики прогнозирования остаточного ресурса элементов пневмо- и гидромагистралей высокого давления на основе физико-статистической модели «нагрузка – несущая способность».

На основе представленной методики произведены расчеты величин коэффициента запаса прочности, вероятности безотказной работы, среднего и гамма-процентного остаточного ресурса указанного оборудования. Показана практическая значимость приведенной методики для управления безаварийной работой объектов наземной космической инфраструктуры.

*Ключевые слова:* сложный техносферный объект, предупреждение чрезвычайных ситуаций, остаточный ресурс, прогнозирование безаварийной работы, коэффициент запаса прочности

**Для цитирования:** Ляшевский А.В., Головчинская Н.В., Вагин А.В. Методика прогнозирования остаточного ресурса элементов пневмо- и гидромагистралей высокого давления на основе физико-статистической модели // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 89–103. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-89-103

Scientific article

## THE METHODOLOGY OF FORECASTING THE RESIDUAL OF THE ELEMENTS OF THE PNEUMATIC- AND HYDRAULIC HIGH BASED ON A PHYSICO-STATISTICAL MODEL

✉ Lyashevsky Alexander V.;

Golovchinskaya Natalia V.

Mozhaisky military space academy, Saint-Petersburg, Russia.

Vagin Alexander V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ 11k77@mail.ru

*Abstract.* The article examines complex technosphere objects – technical systems of ground space infrastructure facilities, which include pneumatic- and hydraulic high pressure pipelines.

Taking into account the need to implement a set of measures to prevent emergency situations arising during emergency operation of these technosphere objects, methods are shown for predicting the residual resource of system components, timely partial replacement of elements of technological equipment and their repair, the result of which is an increase in the period of trouble-free operation of space infrastructure facilities objects.

The relevance of the development of a methodology for forecasting the elements of pneumatic and hydraulic high pressure pipelines based on a physical statistical model «load bearing capacity» is substantiated.

On the basis of the presented methodology, calculations were made of the values of the safety factor, the probability of trouble free operation, the average and gamma percent of the specified equipment. The practical significance of the presented methodology for managing the trouble-free operation of space infrastructure facilities facilities is shown.

*Keywords:* complex technosphere object, emergency prevention, residual resource, forecasting of accident-free operation, safety factor

**For citation:** Lyashevsky A.V., Golovchinskaya N.V., Vagin A.V. The methodology of forecasting the residual of the elements of the pneumatic- and hydraulic high based on a physico-statistical model // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 89–103. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-89-103.

### Введение

Проблема обеспечения эффективной, надежной и безаварийной эксплуатации технологического оборудования (ТО) объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) становится крайне актуальной в условиях усложнения современных конструкций, ужесточения режимов их эксплуатации, многократным увеличением частот и скоростей напряжений, влияющих на срок службы современной техники. Исходя из этого, такие мероприятия, как прогнозирование остаточного ресурса (ОР) составных частей систем, своевременная частичная замена элементов ТО и их ремонт, результатом которых является увеличение сроков службы объектов НКИ, становятся экономически и технически целесообразными и способствуют безотказной работе такого сложного техносферного объекта, как НКИ.

Кроме того, как показано в работе [1], управление ресурсными характеристиками и продление срока службы объектов НКИ, основанные на прогнозировании их ОР, является одним из ключевых вопросов, связанных с организацией эксплуатации и анализа эффективности функционирования сложных технических систем космической отрасли.

### Модели и методы исследования

Одними из важнейших элементов НКИ являются пневмо- и гидромагистральи высокого давления, которые входят в состав таких сложных и дорогостоящих систем, как:

- системы заправки ракет космического назначения (РКН) компонентами ракетного топлива (КРТ);
- трубопроводы перекачки КРТ из агрегатов в заправочные системы РКН;
- стационарные компрессорные станции;
- азотные системы;
- системы термостатирования;
- стационарные системы эжекции;
- системы обеспечения сжатыми газами;
- системы пожаротушения и др.

Таким образом, задача разработки методики прогнозирования остаточного ресурса пневмо- и гидромагистралей высокого давления объектов НКИ в современных условиях является актуальной.

Предлагаемая в данной работе методика основывается на физико-статистической модели «нагрузка – несущая способность» [2] и предназначена для решения задачи определения текущих значений коэффициента запаса прочности, вероятности безотказной работы, среднего и гамма-процентного ОР пневмо- и гидромагистралей высокого давления, входящих в состав ТО объектов НКИ, по результатам контроля толщины стенок и твердости конструкционного материала.

Разработка методики осуществляется с целью обоснования заключения о техническом состоянии (ТС) и величины ОР подконтрольного ТО объекта НКИ.

Теоретическую основу предлагаемой методики составляют модель «нагрузка – несущая способность» (рис. 1), положения теории вероятности и теории статистической обработки данных [2, 3].

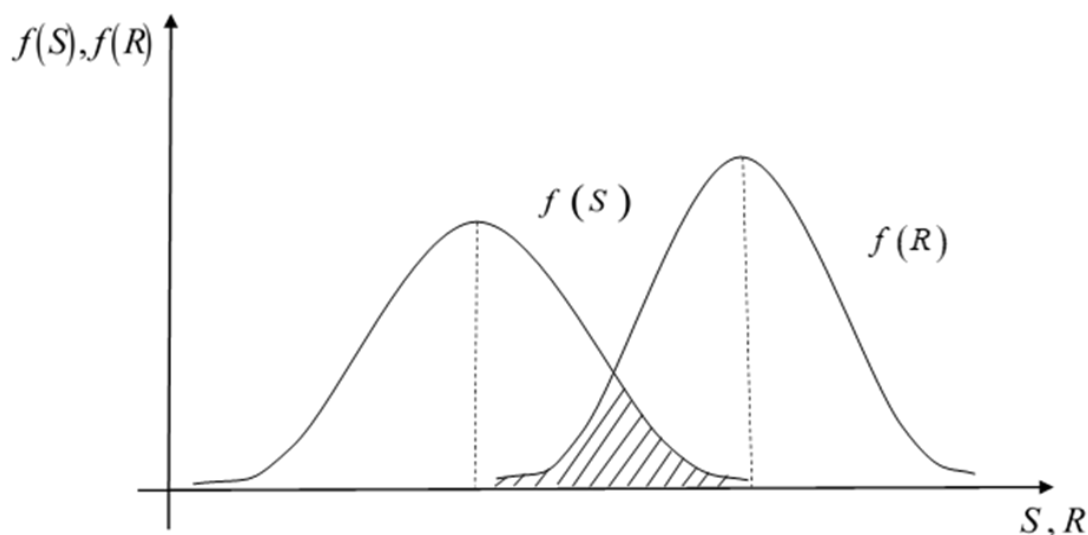


Рис. 1. Графический облик модели «нагрузка – несущая способность»

Как показано в работе [2], на пневмо- и гидромагистральи высокого давления в процессе их эксплуатации воздействуют внешние и внутренние факторы, которые представляются вектором случайного процесса  $S(t)$  и называются «нагрузкой». К ним относятся давление в трубопроводах, вибрации и другие факторы.

В различных условиях эксплуатации под воздействием нагрузок  $S(t)$  в конструкционных материалах происходят физико-механические процессы, снижающие несущую способность трубопроводов, которая также представляется вектором случайного процесса  $R(t)$ . В частности, снижаются значения предела прочности  $\sigma_B$  и предела текучести  $\sigma_T$ , которые являются функцией параметра твердости  $H$  конструкционного материала, измеряемого при обследовании элементов пневмо- и гидромагистралей высокого давления. Изменение твердости конструкционных материалов вызывается накоплением усталостных повреждений и абсорбированием газообразных веществ.

Конструкция пневмо- и гидромагистралей также испытывает изменения в процессе эксплуатации – действие внутреннего давления вызывает ползучесть материала, внутренняя поверхность трубопроводов подвергается коррозии и эрозии. Результатом указанных воздействий является утонение трубопроводов.

В описанных условиях исследуемый объект будет работоспособен, если параметры нагрузки не превысят параметры несущей способности, при этом вероятность безотказной работы определяется следующим соотношением [3]:

$$p(R > S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(R) \left[ \int_{-\infty}^R f(S) dS \right] dR.$$

Вероятность отказа при этом может быть определена с помощью следующего выражения:

$$p(R \leq S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(S) \left[ \int_{-\infty}^S f(R) dR \right] dS.$$

Следовательно, объект будет работоспособен при условии неотрицательности функции вида:

$$\psi(R, S, t) = R(t) - S(t) \geq 0.$$

При условии нормального распределения значений параметров нагрузки и несущей способности вероятность безотказной работы может быть определена с помощью следующего выражения:

$$p[(R - S) \geq 0] = 0,5 + \Phi \left[ \frac{k_{\text{зап}} - 1}{\sqrt{\nu_R^2 \cdot k_{\text{зап}}^2 + \nu_S^2}} \right],$$

где  $\Phi[ ]$  – табулированная функция Лапласа (значения функции Лапласа могут быть рассчитаны с помощью встроенной функции «НОРМ.СТ.РАСП» в ПО «Microsoft Excel»);

$k_{\text{зап}} = \frac{M_R}{M_S}$  – коэффициент запаса прочности;  $M_R$  и  $M_S$  – математические ожидания

несущей способности и нагрузки соответственно;  $\nu_R = \frac{\sigma_R}{M_R}$  и  $\nu_S = \frac{\sigma_S}{M_S}$  – коэффициенты

вариации несущей способности и нагрузки соответственно;  $\sigma_R$  и  $\sigma_S$  – среднеквадратичные отклонения несущей способности и нагрузки соответственно.

Для пневмо- и гидромагистралей высокого давления, входящих в состав ТО объектов НКИ, в качестве характеристики нагрузки используется величина эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эКВ}}$  в стенке магистрали (трубопровода), находящейся под внутренним давлением. При этом эквивалентные (равноопасные) напряжения равны кольцевым напряжениям, возникающим в поперечном сечении магистрали (трубопровода) и определяются с помощью следующего выражения [3–5]:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \frac{p \cdot R_{\text{тр}}}{h}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в магистрали (трубопроводе);  $R_{\text{тр}}$  – радиус магистрали (трубопровода);  $h$  – толщина стенки магистрали (трубопровода).

Так как толщина стенки магистрали (трубопровода)  $h$  является величиной случайной и определяется вариационным рядом  $\langle h \rangle$ , полученным по результатам выполнения толщинометрии, то:

$$\sigma_{\text{эКВ}_i} = \frac{p \cdot R_{\text{тр}}}{h_i}, \quad (2)$$

где  $h_i$  –  $i$ -е измеренное значение толщины стенки магистрали; при этом  $i$  изменяется от 1 до  $n$ , а  $n$  – количество измерений ( $n \geq 10$ ).

Математическое ожидание эквивалентных напряжений  $M_{\sigma_{\text{эКВ}}}$  определяется с помощью следующего выражения [3]:

$$M_{\sigma_{\text{эКВ}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{эКВ}_i}}{n}. \quad (3)$$

Среднеквадратичное отклонение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\sigma_{\text{эКВ}}}$  в данном случае определяется из следующего выражения [3]:

$$\sigma_{\sigma_{\text{эКВ}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{\sigma_{\text{эКВ}}} - \sigma_{\text{эКВ}_i})^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Для пневмо- и гидромагистралей высокого давления, входящих в состав ТО объектов НКИ, в качестве характеристики несущей способности используется величина значения предела текучести  $\sigma_T$  конструкционного материала магистрали (трубопровода), которая может быть определена по результатам твердометрии, исходя из следующего выражения:

$$\sigma_T = f(H), \quad (5)$$

где  $f(H)$  – эмпирическая зависимость, связывающая твердость материала с пределом текучести материала (по конкретной шкале в условиях применения конкретного средства измерений твердости) [4–6].

Для конкретных материалов могут быть использованы зависимости, представленные в И 1.2.1.02.019.1121–2016.

Твердость материала магистрали (трубопровода)  $H$  является величиной случайной и определяется вариационным рядом  $\langle H \rangle$ , полученным по результатам выполнения твердомерии. При этом математическое ожидание предела текучести  $M_{\sigma_T}$  определяется с учетом конкретной эмпирической зависимости из следующего выражения:

$$M_{\sigma_T} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{T_i}}{n}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{T_i}$  –  $i$ -е значение предела текучести материала магистрали (трубопровода), рассчитанное по эмпирической зависимости от твердости материала.

Среднеквадратичное отклонение предела текучести  $\sigma_{\sigma_T}$  в данном случае определяется с помощью следующего выражения<sup>1</sup>:

$$\sigma_{\sigma_T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{\sigma_T} - \sigma_{T_i})^2}{n-1}}. \quad (7)$$

Приведенные расчетные выражения (1–7) позволяют оценить текущие значения коэффициента запаса прочности и вероятности безотказной работы пневмо- и гидромагистралей на момент обследования  $t_k$  (значения параметров с верхним индексом  $k$  соответствуют моменту обследования  $t_k$  ТО объектов НКИ). При этом указанные величины могут быть рассчитаны с помощью следующих выражений:

$$k_{\text{зап}}^{(k)} = \frac{M_{\sigma_T}^{(k)}}{M_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}^{(k)}}, \quad (8)$$

$$p[(\sigma_T^{(k)} - \sigma_{\text{ЭКВ}}^{(k)}) \geq 0] = 0,5 + \Phi \left[ \frac{k_{\text{зап}}^{(k)} - 1}{\sqrt{V_{\sigma_T}^{(k)} \cdot k_{\text{зап}}^{(k)2} + V_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}^{(k)}}} \right]. \quad (9)$$

<sup>1</sup> Методика определения величины продленного срока эксплуатации агрегатов и систем по результатам оценки технического состояния в процессе эксплуатации. М.: ЦКБТМ, 1990. 30 с.

Для оценивания ОР используется модель изменения параметров нагрузки и несущей способности, которые отображаются регрессионными моделями изменения во времени:

– математических ожиданий эквивалентных напряжений:

$$M_{\sigma_{\text{эkv}}} = f_1(t); \quad (10)$$

– предела текучести:

$$M_{\sigma_T} = f_2(t). \quad (11)$$

Регрессионные модели определяются по вариационным рядам математических ожиданий эквивалентных напряжений  $\langle M_{\sigma_{\text{эkv}}} \rangle$  и предела текучести  $\langle M_{\sigma_T} \rangle$ . Адекватность регрессионных моделей подтверждается путем определения коэффициента детерминации  $R^2$  (при  $R^2 \geq 0,8$  зависимость принимается)<sup>2</sup>.

Средний ресурс  $T_0$  определяется на основе решения следующего выражения:

$$[f_1(t) = f_2(t)]. \quad (12)$$

Средний остаточный ресурс  $t_{\text{ост}}$  определяется, исходя из следующего выражения:

$$t_{\text{ост}} = T_0 - t^{(k)}, \quad (13)$$

где  $t^{(k)}$  – ресурс ТО на момент обследования.

Для оценивания гамма-процентного ресурса  $t_\gamma$  используется модель изменения во времени вероятности безотказной работы [7–9] пневмо- и гидромагистралей, которая отображается моделью с помощью следующего выражения:

$$p[(\sigma_T - \sigma_{\text{эkv}}) \geq 0] = g(t). \quad (14)$$

Регрессионная модель определяется по вариационному ряду вероятности безотказной работы пневмо- и гидромагистралей  $\langle p[(\sigma_T^{(t_j)} - \sigma_{\text{эkv}}^{(t_j)}) \geq 0] \rangle$ , где  $t_j$  – моменты обследования ТО ОНКИ в процессе мониторинга:  $j \in [0; k]$ . Адекватность регрессионной модели может подтверждаться путем определения коэффициента детерминации  $R^2$  (при  $R^2 \geq 0,8$  зависимость принимается).

Гамма-процентный ресурс  $t_\gamma$  определяется на основе решения следующего уравнения [6]:

$$[g_1(t) = \gamma]. \quad (15)$$

Задаваемое значение  $\gamma$  выбирается в диапазоне от 0,80 до 0,95.

<sup>2</sup> Методика определения величины продленного срока эксплуатации агрегатов и систем по результатам оценки технического состояния в процессе эксплуатации. М.: ЦКБТМ, 1990. 30 с.

Гамма-процентный остаточный ресурс  $t_{\gamma\text{ост}}$  определяется, исходя из следующего выражения:

$$t_{\gamma\text{ост}} = t_{\gamma} - t^{(k)}. \quad (16)$$

Исходными данными для определения величины ОР являются результаты обследования элементов ТО – сведения об их эксплуатации, ТС, применяемых конструкционных материалах, конструктивных характеристиках.

Измеряемыми параметрами, определяющими ТС и ОР элементов пневмо- и гидромагистралей высокого давления, в представленной методике выбраны:

- толщина стенок трубопроводов;
- твердость конструкционного материала.

Состав исходных данных, необходимых для определения ОР по предлагаемой методике, приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Состав исходных данных, необходимых для определения ОР**

Наименование параметра	Обозначение	Размерность
Вариационный ряд значений твердости конструкционного материала магистрали (трубопровода)	$\langle H_i \rangle^{(t_j)}$	Значения твердости
Вариационный ряд толщины стенки магистрали (трубопровода)	$\langle h_i \rangle^{(t_j)}$	м
Давление в магистрали (трубопроводе)	$P$	МПа
Радиус магистрали (трубопровода)	$R_{\text{тр}}$	м

На основании данных об обследовании пневмо- и гидромагистралей методами толщинометрии и твердометрии, характере действующих нагрузок, физико-механических свойствах конструкционного материала определяется средний остаточный и  $\gamma$ -процентный ОР, в пределах которых элемент ТО сохранит свою работоспособность.

В основу алгоритма положены аналитические зависимости (2–16), связывающие показатели ОР с полученными исходными данными.

Расчет величины ОР выполняется с учетом уточнения и изменения показателя твердости [9–12] конструкционного материала пневмо- и гидромагистралей.

Алгоритм применения методики оценивания ОР на основе физико-статистической модели «нагрузка – несущая способность» представлен на рис. 2.

Основные этапы алгоритма:

1. Определение исходных данных (табл. 1).

2. Расчет величины значения предела текучести  $\sigma_T$  конструкционного материала магистрали (трубопровода), которая может быть определена по результатам твердометрии. Вычисление значений математического ожидания значения предела текучести  $M_{\sigma_T}^{(t_j)}$  и среднеквадратичного отклонения значения предела текучести  $\sigma_{\sigma_T}^{(t_j)}$ .



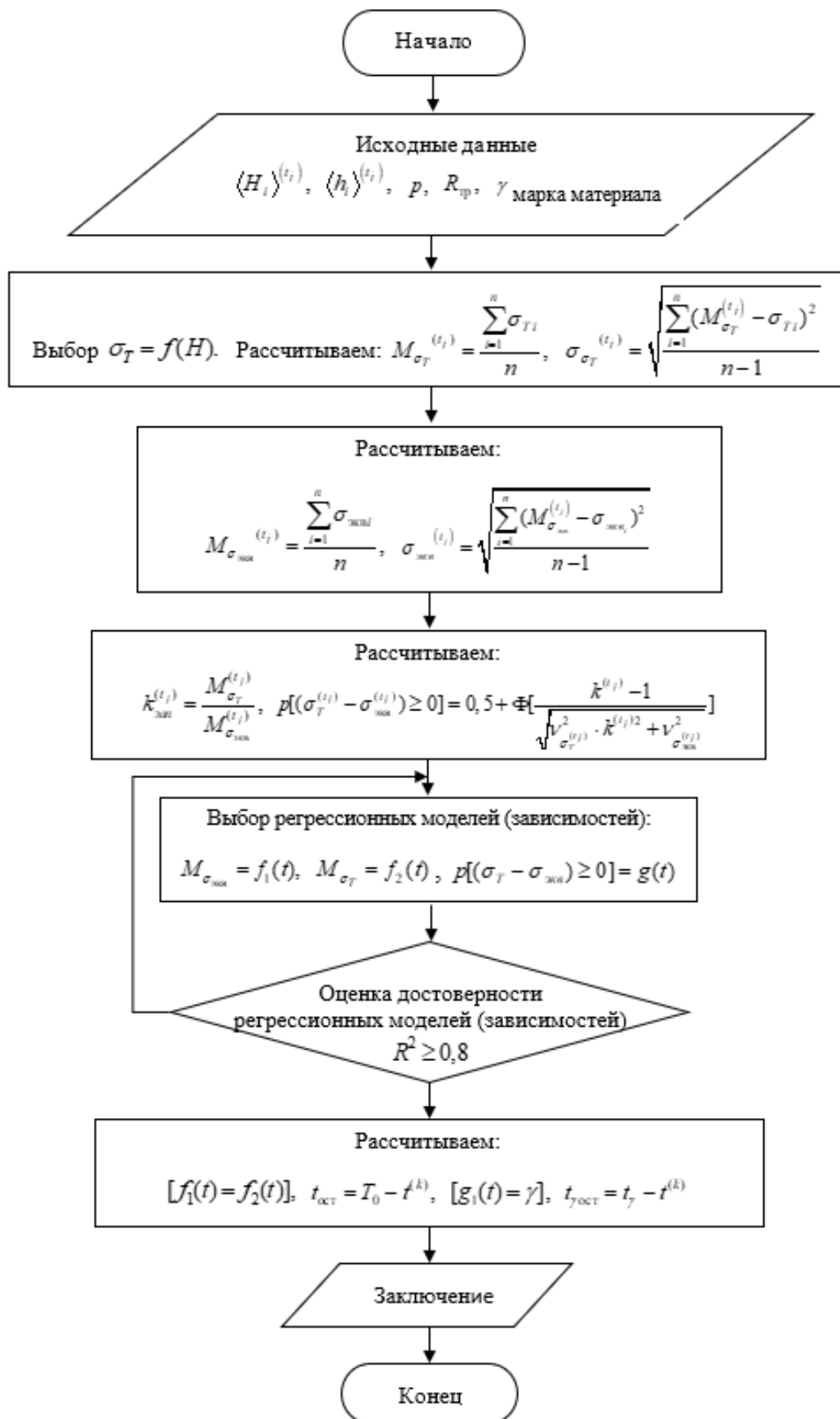


Рис. 2. Алгоритм применения методики оценивания ОР на основе физико-статистической модели «нагрузка – несущая способность»

3. Вычисление значений математического ожидания эквивалентных напряжений  $M_{\sigma_{\text{экв}}}^{(t_j)}$  и среднеквадратичного отклонение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\sigma_{\text{экв}}}^{(t_j)}$ .

4. Вычисление текущего значения коэффициента запаса прочности  $k_{\text{зап}}^{(t_j)}$  и вероятности безотказной работы пневмо- и гидромагистралей  $p [(\sigma_T^{(t_j)} - \sigma_{\text{экв}}^{(t_j)}) \geq 0]$ .

5. Выбор регрессионных моделей изменения параметров нагрузки и несущей способности: математического ожидания эквивалентных напряжений  $M_{\sigma_{\text{экв}}} = f_1(t)$  и предела текучести  $M_{\sigma_T} = f_2(t)$ .

Оценивание гамма-процентного ресурса  $t_\gamma$  путем применения модели изменения во времени вероятности безотказной работы пневмо- и гидромагистралей, которая отображается регрессионной зависимостью:  $p [(\sigma_T - \sigma_{\text{экв}}) \geq 0] = g(t)$ .

6. Оценивание достоверности регрессионных моделей.

Адекватность регрессионной модели подтверждается путем определения коэффициента детерминации  $R^2$  (при  $R^2 \geq 0,8$  зависимость принимается).

7. Выполнение следующих расчетов:

– среднего ресурса  $T_0$ ;

– среднего ОР  $t_{\text{ост}}$ ;

– гамма-процентного ресурса  $t_\gamma$  (задаваемое значение  $\gamma$  выбирается в диапазоне от 0,80 до 0,95);

– гамма-процентного остаточного ресурса  $t_{\gamma\text{ост}}$ .

8. Формирование заключения о ТС и ОР подконтрольного ТО (агрегата, системы) объекта НКИ на основе анализа полученных результатов.

На основании представленного заключения, а также заключений других частных методик осуществляется разработка решения о продлении назначенных показателей с планом мероприятий по обеспечению эксплуатации объектов НКИ на продлеваемый период [6, 7].

### Результаты исследования

Исходя из представленного алгоритма определяем средний ОР  $t_{\text{ост}}$  и гамма-процентного ОР  $t_{\gamma\text{ост}}$  элемента ТО объекта НКИ.

Исходные данные:

– материал стенки магистрали (трубопровода) – сталь 08X18H10T;

– давление в магистрали (трубопроводе)  $p = 40$  МПа;

– радиус магистрали (трубопровода)  $R = 0,06$  м;

– задаваемое значение  $\gamma = 0,98$ .

Пусть в процессе эксплуатации на протяжении трех лет и далее с периодичностью 1 г. ведется контроль за толщиной стенки  $h$  и твердостью материала  $H$  магистрали (трубопровода).

Результаты контроля представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты контроля толщины стенки  $h$  и твердости материала  $H$  магистрали (трубопровода)**

№ изм.	$h$ , м	$H$ , НВ	$h$ , м	$H$ , НВ	$h$ , м	$H$ , НВ	$h$ , м	$H$ , НВ
	$t_0$		$t_1$		$t_2$		$t_3 = t_k$	
1	0,01	174	0,0096	166	0,0096	164	0,0098	162
2	0,0099	170	0,0097	174	0,0097	168	0,0096	164
3	0,01	174	0,0098	172	0,0098	170	0,0092	170
4	0,0101	178	0,0096	170	0,0096	160	0,0094	158
5	0,0099	176	0,0098	168	0,0098	164	0,0096	166
6	0,01	174	0,0096	166	0,0096	166	0,009	166
7	0,01	178	0,0092	172	0,0092	160	0,0092	174
8	0,0101	180	0,0097	170	0,0092	174	0,0093	164
9	0,0099	178	0,0094	176	0,0094	168	0,0098	172
10	0,01	174	0,0096	166	0,0092	172	0,0092	162

С помощью выражений (2–9) рассчитываются текущие значения эквивалентных напряжений предела текучести, их математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений, а также коэффициентов запаса прочности и вероятности безотказной работы. В качестве зависимости  $\sigma_T = f(H)$  используется зависимость из И 1.2.1.02.019.1121–2016 для стали 08X18N10T, где  $\sigma_T = 1,7HВ$ . Результаты данных расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты расчетов текущих значений эквивалентных напряжений предела текучести, их математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений, коэффициентов запаса прочности и вероятности безотказной работы**

№ изм.	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа
	$t_0$		$t_1$		$t_2$		$t_3 = t_k$	
1	240,0	295,8	250,0	250,0	250,0	278,8	244,9	275,4
2	242,4	289,0	247,4	247,4	247,4	285,6	250,0	278,8
3	240,0	295,8	244,9	244,9	244,9	289,0	260,9	289,0
4	237,6	302,6	250,0	250,0	250,0	272,0	255,3	268,6
5	242,4	299,2	244,9	244,9	244,9	278,8	250,0	282,2
6	240,0	295,8	250,0	250,0	250,0	282,2	266,7	282,2
7	240,0	302,6	260,9	260,9	260,9	272,0	260,9	295,8
8	237,6	306,0	247,4	247,4	260,9	295,8	258,1	278,8
9	242,4	302,6	255,3	255,3	255,3	285,6	244,9	292,4
10	240,0	295,8	250,0	250,0	260,9	292,4	260,9	275,4
$M_x$ , МПа	240,3	298,5	250,1	250,1	252,5	283,2	255,2	281,9
$\sigma_x$ , МПа	1,8	5,0	4,9	4,9	6,5	8,0	7,5	8,4
$k$	1,24		1,16		1,12		1,10	
$P$	1,0000		1,0000		0,9985		0,9911	

Далее строятся регрессионные модели изменения во времени математических ожиданий эквивалентных напряжений, предела текучести и вероятности безотказной работы по результатам четырех наблюдений. Регрессионные модели определяются по вариационным рядам математических ожиданий эквивалентных напряжений  $\langle M_{\sigma_{\text{ЭКВ}}} \rangle$ , предела текучести  $\langle M_{\sigma_T} \rangle$  и вероятности безотказной работы  $p(t)$ :

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 4,7 t + 240,3, \quad R^2 = 0,88;$$

$$\sigma_T = -5,6 t + 298,5, \quad R^2 = 0,90;$$

$$p = -0,0019 t^2 + 0,0028 t + 1, \quad R^2 = 0,98.$$

Графическое отображение полученных зависимостей представлено на рис. 3, 4.

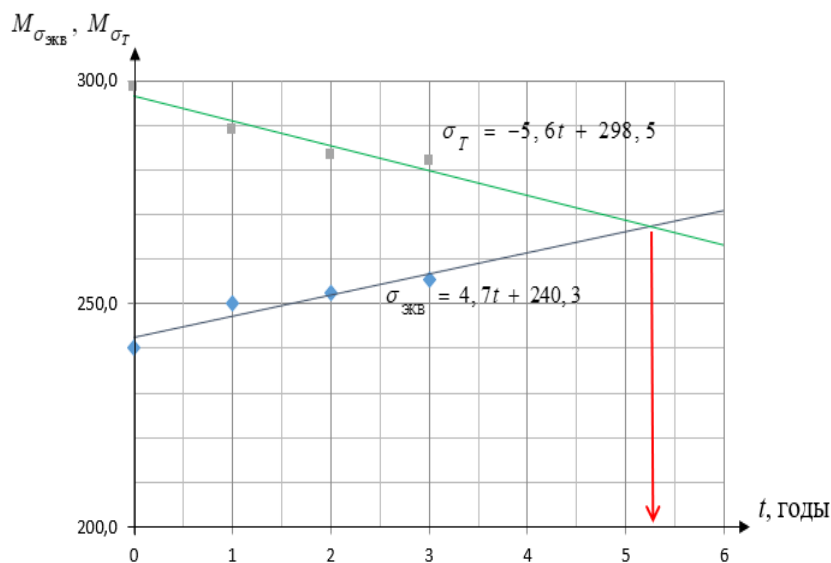


Рис. 3. Зависимости изменения во времени математических ожиданий эквивалентных напряжений и предела текучести

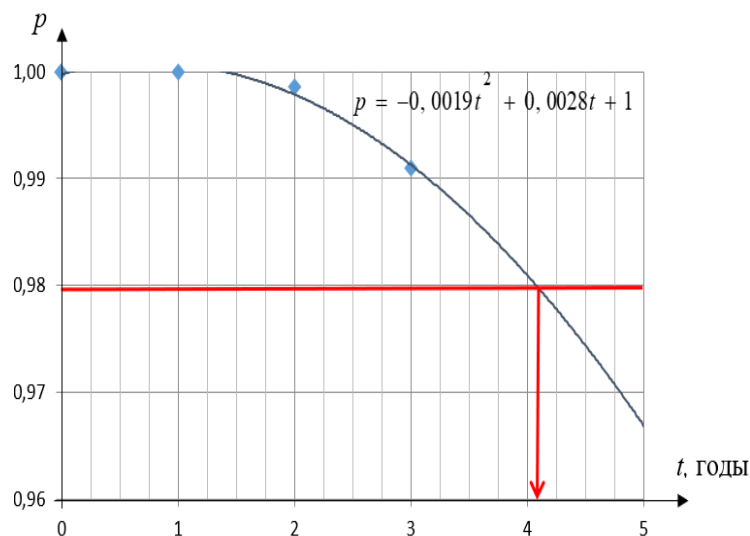


Рис. 4. Зависимости изменения во времени вероятности безотказной работы

Необходимо отметить, что расчет ОР  $t_{\text{ост}}$  и гамма-процентного ОР  $t_{\gamma\text{ост}}$  в данной работе выполняется для временного интервала, начинающегося с третьего года наблюдения за ТС ТО объекта НКИ. Таким образом, анализ зависимостей, представленных на рис. 3, 4, позволяет получить следующие расчетные величины:  $t_{\text{ост}} = 2,25$  года ;  $t_{0,98\text{ост}} = 1,1$  года.

### Заключение

Одной из важнейших задач в современной космической отрасли является разработка, обоснование и внедрение мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций, аварий и инцидентов, поэтому безотказная работа такого важного элемента объекта НКИ, как гидро- и пневмомагистрали высокого давления, требует внимательного рассмотрения. В комплексе мер, обеспечивающих решение этой задачи, важная роль принадлежит разработке расчетных методов прогнозов прочности, долговечности и, как следствие, ОР указанных конструкций.

В работе показана актуальность разработки методики прогнозирования ОР элементов пневмо- и гидромагистралей высокого давления на основе физико-статистической модели «нагрузка – несущая способность», позволяющей определить текущие значения коэффициента запаса прочности, вероятности безотказной работы, остаточного и гамма-процентного ОР указанных элементов ТО объектов НКИ.

Таким образом, представленная методика может быть использована для расчета основных параметров ОР (срока службы) гидро- и пневмомагистралей высокого давления и других элементов машин и механизмов, обоснования выбора наиболее предпочтительных конструкционных материалов для изготовления узлов и агрегатов ТО НКИ, для оценивания эффективности эксплуатации указанных конструкций, а также может являться частью системы обеспечения прогнозирования риска отказа работы объекта НКИ.

### Список источников

1. Медведев А.А. Инновационные подходы при создании ракетно-космической техники: монография. 2-е изд. М.: Изд-во «Доброе слово и Ко», 2020. 400 с.
2. Волков В.М. Надежность машин и тонкостенных конструкций. Н. Новгород: Изд-во ИГТУ, 2011. 365 с.
3. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 464 с.
4. Материаловедение: учеб. для студентов вузов / В.С. Кушнер [и др.]. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. 232 с.
5. Спащенко А.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов нефтегазового оборудования и трубопроводов с коррозионно-механическими трещинами: дис. ... канд. тех. наук. М., 2007. 129 с.
6. Оценка механических свойств металла по твердости при диагностировании технического состояния стальных газопроводов / М.В. Сигайлов [и др.] // Молодой ученый. 2016. № 3 (107). С. 206–208.
7. Куренков В.И., Капитонов В.А. Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов // Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 320 с.
8. Прогнозирование остаточного срока службы гидравлического оборудования с применением методов машинного обучения / А.М. Гареев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 3. С. 72–82.
9. Корольков Д.И. Оценка остаточного ресурса строительных конструкций: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 168 с.
10. Равин А.А., Хруцкий О.В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 33–47.

11. Дружинин П.В., Бабушкин М.Ю. Диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса рукавов высокого давления // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2013. № 3 (25). С. 6–12.

12. Мощенок В.И. Новые методы определения твердости материалов: монография. Харьков: ХНАДУ, 2013.

### References

1. Medvedev A.A. Innovacionnye podhody pri sozdanii raketno-kosmicheskoy tekhniki: monografiya. 2-e izd. M.: Izd-vo «Dobroe slovo i Ko», 2020. 400 s.

2. Volkov V.M. Nadezhnost' mashin i tonkostennykh konstrukcij. N. Novgorod: Izd-vo IGTU, 2011. 365 s.

3. Ostrejkovskij V.A. Teoriya nadezhnosti. M.: Vysshaya shkola, 2003. 464 s.

4. Materialovedenie: ucheb. dlya studentov vuzov / V.S. Kushner [i dr.]. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2008. 232 s.

5. Spashchenko A.Yu. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa konstruktivnykh elementov neftegazovogo oborudovaniya i truboprovodov s korrozionno-mekhanicheskimi treshchinami: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2007. 129 s.

6. Ocenka mekhanicheskikh svoystv metalla po tverdosti pri diagnostirovaniy tekhnicheskogo sostoyaniya stal'nykh gazoprovodov / M.V. Sigajlov [i dr.] // Molodoj uchenyj. 2016. № 3 (107). S. 206–208.

7. Kurenkov V.I., Kapitonov V.A. Metody rascheta i obespecheniya nadezhnosti raketno-kosmicheskikh kompleksov // Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2007. 320 s.

8. Prognozirovaniye ostatochnogo sroka sluzhby gidravlicheskogo oborudovaniya s primeneniem metodov mashinnogo obucheniya / A.M. Gareev [i dr.] // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2022. № 3. S. 72–82.

9. Korol'kov D.I. Ocenka ostatochnogo resursa stroitel'nykh konstrukcij: monografiya. SPb.: SPbGASU, 2020. 168 s.

10. Ravin A.A., Hruckij O.V. Inzhenernye metody prognozirovaniya ostatochnogo resursa oborudovaniya // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2018. № 1. S. 33–47.

11. Druzhinin P.V., Babushkin M.Yu. Diagnostirovaniye i prognozirovaniye ostatochnogo resursa rukavov vysokogo davleniya // Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. 2013. № 3 (25). S. 6–12.

12. Moshchenok V.I. Novye metody opredeleniya tverdosti materialov: monografiya. Har'kov: HNADU, 2013.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 20.02.2025; одобрена после рецензирования: 09.04.2025; принята к публикации: 12.05.2025

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 20.02.2025; approved after review: 09.04.2025; accepted for publication: 12.05.2025

*Информация об авторах:*

**Ляшевский Александр Валерьевич**, начальник отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13), e-mail: 11k77@mail.ru, кандидат технических наук, <https://orcid.org/0009-0003-4158-1737>, SPIN-код: 8370-8711

**Головчинская Наталья Владимировна**, научный сотрудник лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13), e-mail: nataliyavg1962@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9425-8260>, SPIN-код: 1220-8764

**Вагин Александр Владимирович**, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: vagin@igps.ru, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-7966-4947>, SPIN-код: 3296-1936

*Information about the authors:*

**Lyashevsky Alexander V.**, head of the department of the Military institute (scientific research) of the Mozhaysky military space academy (197082, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13), e-mail: 11k77@mail.ru, candidate of technical sciences, <https://orcid.org/0009-0003-4158-1737>, SPIN: 8370-8711

**Golovchinskaya Natalya V.**, researcher at the laboratory of the Military institute (scientific research) of the Mozhaysky military space academy (197082, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13), e-mail: nataliyavg1962@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9425-8260>, SPIN: 1220-8764

**Vagin Alexander V.**, associate professor of the department of building fire safety and automated fire fighting systems of the Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: vagin@igps.ru, candidate of technical sciences, associate professor, <https://orcid.org/0000-0002-7966-4947>, SPIN: 3296-1936