

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 3 / 2023, Vol. 15, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/44NZVN323.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Катков, Д. С. Разработка структурной схемы газоперекачивающего агрегата, включающей в себя совокупность элементов и подсистем, и математической модели изнашивания его ресурсолимитирующих трибоэлементов / Д. С. Катков, О. В. Наумова, Е. В. Спиридонова, К. А. Елманов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/44NZVN323.pdf>

**For citation:**

Katkov D.S., Naumova O.V., Spiridonova E.V., Elmanov K.A. Development of a block diagram of a gas-pumping unit, which includes a set of elements and subsystems, and a mathematical model of wear of its resource-limiting triboelements. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(3): 44NZVN323. Available at: <https://esj.today/PDF/44NZVN323.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

**УДК 621.515**

**Катков Данила Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия  
Доцент  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [syberberg@yandex.ru](mailto:syberberg@yandex.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=674883](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=674883)

**Наумова Ольга Валерьевна**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия  
Доцент  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [uunaumov@mail.ru](mailto:uunaumov@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=393383](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=393383)

**Спиридонова Елена Владимировна**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», Саратов, Россия  
Доцент  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [spiritlena77@yahoo.com](mailto:spiritlena77@yahoo.com)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=713953](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=713953)

**Елманов Кирилл Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия  
E-mail: [Elmanov.k2000@gmail.com](mailto:Elmanov.k2000@gmail.com)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1125825](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1125825)

**Разработка структурной схемы газоперекачивающего агрегата, включающей в себя совокупность элементов и подсистем, и математической модели изнашивания его ресурсолимитирующих трибоэлементов**

**Аннотация.** В контексте напряженной геополитической обстановки решение проблемы обеспечения надежности магистрального транспорта природного газа, а следовательно, и основного оборудования компрессорных станций, приобретает все большую актуальность.

В данной статье предложена структурная схема газоперекачивающего агрегата, включающая в себя совокупность механизмов и технических систем. Авторы предлагают рассматривать газоперекачивающий агрегат как сложную двухуровневую трибомеханическую систему, состоящую из ряда элементов с входными и выходными параметрами. Данная схема описывает взаимосвязь трибоэлементов и подсистем газоперекачивающего агрегата между собой и внешней средой. Также ставится задача определения основных факторов, влияющих на работу любой подсистемы газоперекачивающего агрегата, и построения математической модели изнашивания его ресурсолимитирующих трибоэлементов в зависимости от этих факторов.

В статье приведен график зависимости величины износа деталей трибосопряжения от продолжительности наработки, рассмотрены три периода: начального износа (приработка трущихся деталей); установившегося износа; аварийного износа. Определено ключевое значение качества приработки для последующего установившегося износа. В качестве основных факторов, влияющих на интенсификацию и процесс приработки определены: концентрация присадки к маслу; толщина прирабочного покрытия, полученного методом финишной антифрикционной безабразивной обработки; результирующая величина динамических нагрузок. Рассчитаны коэффициенты размерности, характеризующие степень реакции системы на изменение каждого из выбранных факторов. Получены зависимости, позволяющие определить влияние позитивных (применение модифицированного смазочного материала и антифрикционного покрытия) и негативных (динамических нагрузок) на величину начального износа деталей трибосопряжения в период приработки, а также их износа в период установившейся работы, прогнозировать величину износа при различных величинах наработки и ресурс газоперекачивающего агрегат в целом за счет улучшения и совершенствования процесса приработки.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат; трибосопряжение; подшипник скольжения; торцевое уплотнение; динамическая нагрузка; ресурс; финишная антифрикционная безабразивная обработка; присадка; смазочный материал

В условиях сложившейся системы технического обслуживания и ремонта обеспечение надежного функционирования газоперекачивающих агрегатов (ГПА) по-прежнему является вопросом частично нерешенным.

С позиций системного анализа надежности функционирования магистрального газопровода в его составе можно выделить две укрупнённые структурные единицы: линейную часть и компрессорные станции.

С точки зрения обеспечения надежности линейной части следует отталкиваться от состояния материала труб и сварных стыков (обусловленного соблюдением технологии изготовления, транспортировки, строительства, эксплуатации), их целостности (наличия-отсутствия, глубины коррозионных и абразивных поражений внутренней и наружной стенок) и несущей способности, состояния средств пассивной и активной защиты от коррозии, а также почвенно-климатических и геологических условий района прокладки.

Бесперебойная работа компрессорных станций обеспечивает надежное функционирование магистрального газопровода в целом. При выходе ГПА из строя происходит полная остановка компрессорной станции.

Вопрос обеспечения надежности основного оборудования компрессорных станций, входящих в систему магистрального транспорта природного газа на территории Российской Федерации, оказывает непосредственное влияние на своевременность поставок потребителям,

в том числе и зарубежным. В контексте напряженной геополитической обстановки решение данной проблемы приобретает все большую актуальность.

Исходя из оценки статистических данных, приведенных в работах [1; 2] были определены ресурсолимитирующие узлы эксплуатируемых в настоящее время газоперекачивающих агрегатов, а также влияющие на них динамические нагрузки.

К узлам, отказ которых повлечет выход из строя всего ГПА, можно отнести торцевые уплотнения, а также опорные и упорные подшипники скольжения, на которых установлены валы осевого компрессора, турбин высокого и низкого давления и непосредственно нагнетателя газа. Причем условиям работы последних следует уделить наибольшее внимание, так как нарушение гидродинамического режима их работы влечет за собой изменение условий трения с ухудшением режима смазки, образованием задиров, что в свою очередь вызывает увеличение радиального биения валов, а также их осевые перемещения, нагрузки от которых сказываются на ресурсе торцевых уплотнений.

Моделированию процессов динамического скольжения вала в подшипнике и определению динамических нагрузок на подшипники и ГПА в целом посвящен ряд работ [3; 4].

Авторами данной статьи ставится задача разработки структурной схемы ГПА, учитывающей параметры и факторы, оказывающие решающее влияние на его долговечность. Осевой компрессор, турбины высокого и низкого давления, центробежный газовый компрессор определены основными структурными единицами, отвечающими за технологический процесс компримирования газа.

Рассмотрим ГПА в качестве двухуровневой трибомеханической системы, включающей в себя ряд элементов, имеющих последовательное и параллельное соединение по надежности (рис. 1).

На рисунке представлены следующие подсистемы ГПА и элементы в их составе:

1 — осевой компрессор ( $A_1$  — опорные подшипники,  $B_1$  — упорные подшипники,  $V_1$  — торцевые уплотнения,  $\Gamma_1$  — направляющие лопатки компрессора);

2 — турбина высокого давления ( $A_2$  — опорные подшипники,  $B_2$  — упорные подшипники,  $V_2$  — рабочие лопатки);

3 — турбина низкого давления ( $A_3$  — опорные подшипники,  $B_3$  — упорные подшипники,  $V_3$  — рабочие лопатки);

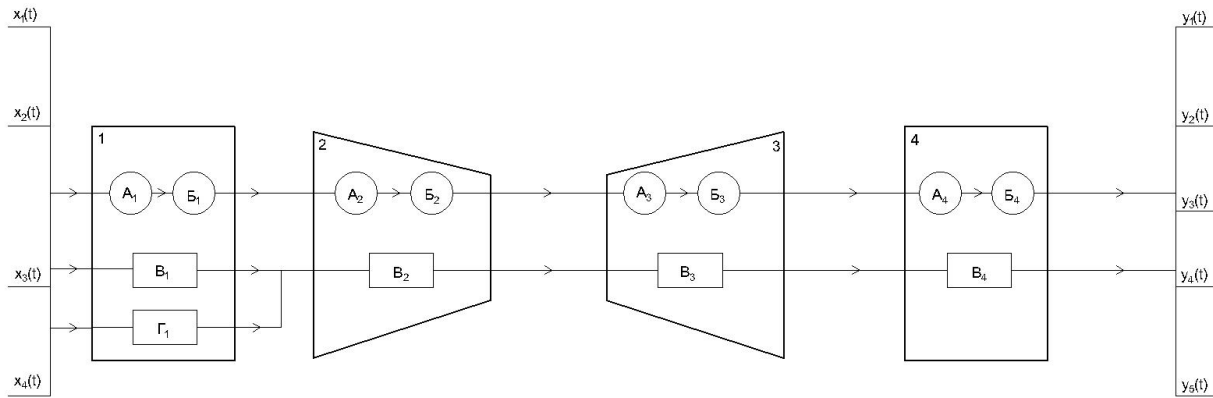
4 — нагнетатель ( $A_4$  — опорные подшипники,  $B_4$  — упорные подшипники,  $V_4$  — торцевые уплотнения).

В каждый из элементов системы в различные моменты времени могут поступать входные сигналы, а именно: динамические нагрузки ( $x_1(t)$ ), скорость перемещения деталей ( $x_2(t)$ ), физические и химические свойства смазочного материала ( $x_3(t)$ ), температура ( $x_4(t)$ ). Обозначим их совокупность  $X(t)$ .

Реакцией элемента на входящие сигналы будут сигналы исходящие, а именно: износ пар трения ( $y_1(t)$ ), шероховатость поверхности ( $y_2(t)$ ), коэффициент трения ( $y_3(t)$ ), температура ( $y_4(t)$ ), фактическая площадь контакта ( $y_5(t)$ ). Обозначим их совокупность  $Y(t)$ .

Основные элементы данной системы ГПА соединены между собой и внешней средой с помощью контактов и каналов.

Воздействие внешней среды на систему можно описать в качестве фиктивного элемента  $O$  (на рисунке не представлен), который будет иметь соответственно ряд входных  $m_0$  и выходных  $r_0$  контактов, имеющих связь с системой.



*A, B, B, Г — элементы системы; 1, 2, 3, 4 — подсистемы в системе ГПА*

**Рисунок 1.** Двухуровневая система ГПА (разработано авторами)

Сигналы, выдаваемый системой  $x_1^{(0)}, \dots, x_{m_0}^{(0)}$ , будут воспринимается этим фиктивным элементом как входные. А сигналы  $y_1^{(0)}, \dots, y_{r_0}^{(0)}$ , поступающие в систему из внешней среды — как выходные. Элементарный сигнал  $y_e^{(0)}$  выдается выходным контактом  $Y_e^{(0)}$ , а  $x_e^{(0)}$  принимается контактом  $X_e^{(0)}$ .

Таким образом, математической моделью одного из элементов системы ГПА-С<sub>j</sub>, используемой для описания сопряжения его с прочими элементами системы и внешней средой, будет служить пара множеств [5; 6]:

$$\left[ X_i^{(j)} \right]_1^{m_i} \text{ и } \left[ Y_e^{(j)} \right]_1^{r_e}.$$

Рассмотрим множество всех входных контактов для каждого из элементов системы и внешней среды  $U \left[ X_i^{(j)} \right]_1^{m_i}$ .

Тогда все выходные контакты можно представить  $U \left[ Y_e^{(j)} \right]_1^{r_e}$ .

Введем оператор  $R_e$ . Пусть данный оператор будет имеет область определения в множестве  $U \left[ X_i^{(j)} \right]_1^{m_i}$  и область значений в множестве  $U \left[ Y_e^{(j)} \right]_1^{r_e}$ . Тогда он будет сопоставлять входной контакт  $X_i^{(j)}$  с выходным  $Y_e^{(k)}$ , связанным с ним и будет равен:

$$R_e(X_i^{(j)}) = Y_e^{(k)}. \tag{1}$$

Полученная совокупность  $\left[ R_e, U \left[ X_i^{(j)} \right]_1^{m_i}, U \left[ Y_e^{(j)} \right]_1^{r_e} \right]$  будет являться схемой сопряжения элементов ГПА в единой системе.

Данная модель ГПА показывает взаимосвязь его ресурсолимитирующих трибоэлементов и подсистем между собой и внешней средой.

Далее необходимо определить основные факторы, и степень их влияния на работу подсистем, а также разработать математическую модель выходного параметра (например величины износа) в зависимости от этих факторов.

Процесс приработки является состоянием динамическим, в котором входящие и выходящие сигналы зависят от времени и могут быть описаны системой дифференциальных уравнений.

В частном случае условия на входе остаются неизменными, а на выходе изменяются. Это объясняется тем, что приработка проводится при постоянных нагрузке, скорости и ряде других параметров.

Так как дать наиболее полного описания структуры приработки как поведения трибосистемы не представляется возможным, ограничимся подходом на основе укрупненного описания информационной структуры трибосистемы.<sup>1</sup>

Приработку можно считать процессом перехода трибосистемы в устойчивое состояние, которое характеризуется физико-механическими свойствами поверхностных слоев и начальным износом [7].

Рассмотрим износ детали как функцию времени  $U(T)$ , которая не монотонна [7–9]. Ее можно разделить на 3 участка (рис. 1) <sup>Ошибка! Закладка не определена.</sup>,<sup>2</sup>.

- I — период начального износа (приработка трущихся деталей);
- II — период установившегося износа (устойчивая эксплуатация);
- III — период аварийного износа (выход сопряжения из строя).

Рассмотрим участок *опт* (рис. 2) на кривой износа. Данный участок описывает равномерного-замедленный процесс изнашивания.

Зависимость величины износа от наработки соответствует выражению:

$$U(T) = a(T - T_m)^c + b, \quad (2)$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты;  $T_m$  — наработка до точки  $m$ , находящейся между  $T_n$  и  $T_k$  (рис. 2);  $T_k$  — наработка до форсированного (аварийного) износа;  $T_n$  — время приработки;  $T$  — переменное.

В точке  $T = T_m$  зависимость  $U(T)$  будет иметь перегиб, т. е.:

$$\frac{d^2U}{dT^2} \Big|_{T=T_m} = 0.$$

После проверки:

$$U'(T) = -ac(T_m - T)^{c-1},$$

$$U''(T) = a(c-1)(T_m - T)^{c-2},$$

отсюда  $U''(T_m) = 0$ , что подтверждается при  $c > 2, T = T_m$ .

<sup>1</sup> Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе // Теоретические основы: [в 3 т.]. — М.: Машиностроение, 1990. — Т. 2. — 480 с.

<sup>2</sup> Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р.М. Матвеевский [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989. — 224 с.

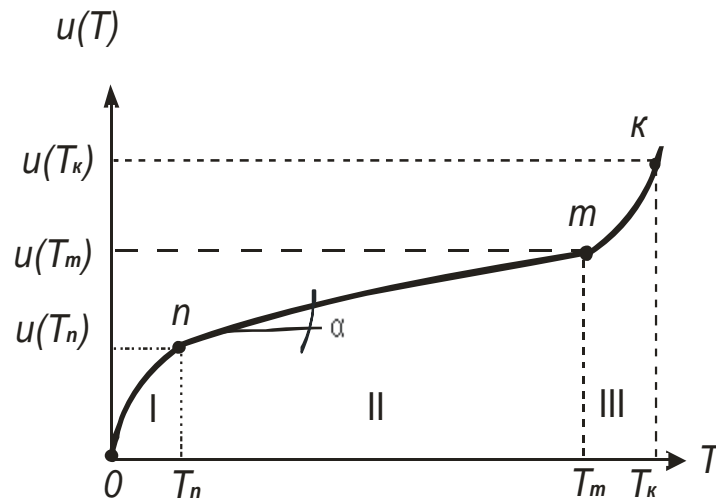


Рисунок 2. Кривая износа [8–10]

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определим из следующих условий:

1.  $U(0) = 0$  (деталь еще не работала).
2.  $U(T_n) = U_n$ , где  $T_n$  — время приработки;  $U_n$  — износ по окончании приработки.
3.  $U(T_m) = U_m$ , где  $U_m$  — износ в точке  $m$ .

Рассмотрим эти условия:

1.  $U(0) = 0$ :

$$-aT_m^c + U_m = 0;$$

$$a = \frac{U_m}{T_m^c}.$$

2.  $U(T_n) = U_n$ :

$$-\frac{U_m}{T_m^c}(T_m - T_n)^c + U_m = U_n;$$

$$U_m \left(1 - \frac{T_n}{T_m}\right)^c = U_m - U_n;$$

$$\left(1 - \frac{T_n}{T_m}\right)^c = 1 - \frac{U_n}{U_m};$$

$$c = \frac{\ln\left(1 - \frac{U_n}{U_m}\right)}{\ln\left(1 - \frac{T_n}{T_m}\right)}.$$

3.  $U(T_m) = U_m$ :

$$a(T_m - T_m)^c + b = U_m;$$

$$b = U_m.$$

С учетом изложенного выше, зависимость износа от наработки  $U(T)$  можно записать:

$$U(T) = U_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right)^c \right] \text{ при } T < T_m. \quad (3)$$

В данном выражении коэффициент  $c$  характеризует изменение скорости износа в период приработки. Чем больше значение  $c$ , тем интенсивнее осуществляется приработка.

Экспертные оценки путей практической реализации эффекта избирательного переноса (ИП) при трении приведенные в работах [10–13] говорят о том, что наилучший эффект дает комплексное использование нескольких условий, например применение трущихся пар, которые дают ИП; применение трущихся пар с предварительным нанесением антифрикционного покрытия способом ФАБО (финишной антифрикционной безабразивной обработки) для реализации эффекта безызносности; применение модифицированных смазочных материалов с металлосодержащими компонентами (присадками), обеспечивающими процессы формирования сервоитной пленки, позволяющей увеличить ресурс сопряжения<sup>3, 4, 5</sup>.

Также важным фактором, оказывающим влияние на ресурс, является величина динамических нагрузок [1].

Таим образом мы определились с факторами, оказывающими определяющее влияние на процесс приработки и ее интенсивность, это:  $x_1$  — концентрация присадки к смазочному материалу;  $x_2$  — толщина приработочного ФАБО-покрытия;  $x_3$  — результирующая величина динамических нагрузок.

Рассмотрим функцию  $U(T)$  с учетом  $x_1, x_2, x_3$ , когда  $x_1 \neq 0, x_2 \neq 0, x_3 \neq 0$ , т. е.  $U(T, x_i) = U^x(T)$ .

Применим гипотезу о том, что увеличение износа (его приращение  $dU$ ) пропорционально значению фактора  $x_i$  и величине износа  $U$ :

$$dU_1^x = U_1^x \alpha_1 x_1 (x_2 = x_3 = 0) - \frac{dU_1^x}{U_1^x} = \alpha_1 x_1;$$

$$dU_2^x = U_2^x \alpha_2 x_2 (x_1 = x_3 = 0) - \frac{dU_2^x}{U_2^x} = \alpha_2 x_2;$$

$$dU_3^x = U_3^x \alpha_3 x_3 (x_1 = x_2 = 0) - \frac{dU_3^x}{U_3^x} = \alpha_3 x_3,$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — коэффициенты размерности, характеризующие степень реакции системы на изменение фактора.

Совместная зависимость:

$$\frac{dU^x}{U^x} = \frac{dU_1^x}{U_1^x} + \frac{dU_2^x}{U_2^x} + \frac{dU_3^x}{U_3^x},$$

<sup>3</sup> Избирательный перенос в узлах трения. Сборник статей. — М., Дом научно-технической пропаганды имтуб Ф.Э. Дзержинского, 1971.

<sup>4</sup> Garkunow D.N. Einige Erkenntnisse zu der Prozessen bei der selektiven Ubertragung // Schmierungstechnik. Fachzeitsschrift fur Tribotechnik. Verlag Technik Gmb H, Berlin, 1990, H. 12. — S. 361...362.

<sup>5</sup> Garkunov D.N. Effekt der Verschleiblosigkeit ntue Effekt bei der Verbesserung der Verschleib verhaltens von Maschinenelementen. Smierungstechnik, Berlin 18. 1987. H. 3. — S. 68.



или

$$dU^x = (\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3)U^x.$$

Интегрируя это уравнение, получим:

$$\int_{U(T)}^{U^x(T)} \frac{dU^x}{U^x} = (\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3),$$
$$\ln\left(\frac{U^x(T)}{U(T)}\right) = (\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3) + C',$$

где  $C'$  — постоянная.

Тогда:

$$U^x(T) = U(T)e^{-(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3)} \tag{4}$$

при  $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ ,  $U^x(T) = U(T)$ , а  $C' = 1$  при любых значениях факторов.

Соответственно выражение для износа с учетом влияния выбранных нами факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  примет вид:

$$U^x(T, x_1, x_2, x_3) = U(T)e^{-(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3)}, \tag{5}$$

Определим параметры для какой-либо произвольной наработки  $T^*$ . При  $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ :

$$U(T) = U_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right)^c \right], T \leq T_m. \tag{6}$$

Теперь определим влияние каждого из факторов при условии, что остальные равны нулю.

То есть при определении  $x_1$  факторы  $x_2 = x_3 = 0$ :

$$x_1 = x_1^1, U^{x_1}(T^*) = U_1^{x_1}(T^*),$$
$$x_1 = x_1^2, U^{x_1}(T^*) = U_2^{x_1}(T^*),$$

...

...

...

$$x_1 = x_1^{N_1}, U^{x_1}(T^*) = U_{N_1}^{x_1}(T^*),$$

где  $N_1$  — количество точек эксперимента для  $x_1$ ;  $T^*$  — наработка при проведении эксперимента.

В результате будем иметь два вектора:

$$\left\{ x_1^i \right\}_{i=1 \dots N_1} \text{ и } \left\{ U_i^{x_1}(T^*) \right\}_{i=1 \dots N_1}.$$



Аналогично определим  $x_2$  ( $x_1 = x_3 = 0$ ) и  $x_3$  ( $x_1 = x_2 = 0$ ):

$$\left\{x_2^i\right\}_{i=1\dots N_2} \text{ и } \left\{U_i^{x_2}(T^*)\right\}_{i=1\dots N_2};$$

$$\left\{x_3^i\right\}_{i=1\dots N_3} \text{ и } \left\{U_i^{x_3}(T^*)\right\}_{i=1\dots N_3}.$$

Коэффициенты, определяющие степень влияния каждого из факторов на износ  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  рассчитаем по методу наименьших квадратов [3]:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \left[ \ln \left( \frac{U(T^*)}{U_i^{x_1}(T^*)} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{N_1} x_1^i},$$

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} \left[ \ln \left( \frac{U(T^*)}{U_i^{x_2}(T^*)} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{N_2} x_2^i}, \quad (7)$$

$$\alpha_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} \left[ \ln \left( \frac{U(T^*)}{U_i^{x_3}(T^*)} \right) \right]}{\sum_{i=1}^{N_3} x_3^i}.$$

где  $T^*$  — величина наработки, при которой определены значения износа в зависимости от значений факторов  $x_1, x_2, x_3$ .

Тогда выражение (5) с учетом факторов  $x_1, x_2, x_3$  можно записать в следующей форме:

$$U^x(T) = U_m K \left[ 1 - \left( 1 - \frac{TK}{T_m} \right)^c \right], T \leq \frac{T_m}{K}, \quad (8)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства поверхностного слоя деталей трибосопряжения, условия трения и смазки:

$$K = e^{-(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3)}. \quad (9)$$

$c$  — показатель степени, определяемый по выражению:

$$c = \frac{\ln \left( 1 - \frac{U_n}{U_m} \right)}{\ln \left( 1 - \frac{T_n}{T_m} \right)}. \quad (10)$$

Полученная математическая модель изнашивания деталей на этапе приработки ресурсолимитирующих трибосопряжений ГПА дает возможность определить влияние позитивных (применение модифицированного смазочного материала и антифрикционного покрытия) и негативных (динамических нагрузок) на величину начального износа в период их

приработки, а также износа в период установившейся работы, прогнозировать величину износа при различных величинах наработки и ресурс ГПА.

Проведем проверку предлагаемой модели. Рассмотрим влияние выбранных факторов.

Предположим, что износ в процессе приработки детали составил  $U_n(T_n) = 15$  мкм за время приработки  $T_n = 10$  ч.

Аварийный износ детали  $U_m(T_n) = 30$  мкм, соответствующее ему время наработки  $T_n = 1000$  ч.

Выбранным величинам факторов соответствуют следующие значения износов по достижении наработки  $T^* = 10$  ч:

$$\begin{aligned}x_1^1 &= 5 \% \rightarrow U_1^{x_1^1}(T^*) = 12 \text{ мкм}; \\x_2^1 &= 10 \text{ мкм} \rightarrow U_2^{x_2^1}(T^*) = 10 \text{ мкм}; \\x_3^1 &= 1,6 \text{ МН} \rightarrow U_3^{x_3^1}(T^*) = 12 \text{ мкм}; \\x_1^2 &= 0,8 \% \rightarrow U_1^{x_2^2}(T^*) = 10 \text{ мкм}; \\x_2^2 &= 1 \text{ мкм} \rightarrow U_2^{x_2^2}(T^*) = 9 \text{ мкм}; \\x_3^2 &= 1,8 \text{ МН} \rightarrow U_3^{x_2^2}(T^*) = 16 \text{ мкм}; \\x_1^3 &= 1 \% \rightarrow U_1^{x_3^3}(T^*) = 18 \text{ мкм}; \\x_2^3 &= 5 \text{ мкм} \rightarrow U_2^{x_3^3}(T^*) = 20 \text{ мкм}; \\x_3^3 &= 2,04 \text{ МН} \rightarrow U_3^{x_3^3}(T^*) = 26 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Выполним расчеты по выражениям (7):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{\ln \frac{15}{12} + \ln \frac{15}{10} + \ln \frac{15}{12}}{5 + 10 + 1,6} = 0,051; \\ \alpha_2 &= \frac{\ln \frac{15}{10} + \ln \frac{15}{9} + \ln \frac{15}{16}}{0,8 + 1 + 1,8} = 0,236; \\ \alpha_3 &= \frac{\ln \frac{15}{18} + \ln \frac{15}{20} + \ln \frac{15}{26}}{1 + 5 + 2,04} = -0,00054.\end{aligned}$$

Положительные значения коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  свидетельствуют о по позитивном влиянии модифицированного смазочного материала и антифрикционного покрытия, а отрицательное значение коэффициента  $\alpha_3$  говорит о негативном влиянии динамических нагрузок на ресурс сопряжения.

Далее определим коэффициент  $c$  по формуле (10):

$$c = \frac{\ln\left(1 - \frac{15}{30}\right)}{\ln\left(1 - \frac{10}{1000}\right)} = 68,97.$$

Тогда зависимость величины износа о наработки и выбранных нами факторов  $U^x(T, x_1, x_2, x_3)$  можно записать:

$$U^x(T) = 30 K \left[ 1 - \left( \frac{TK}{1000} \right)^c \right], T \leq \frac{1000}{K}, \quad (11)$$

При значениях коэффициента  $c = 68,97$  и коэффициента  $K$ :

$$K = e^{-(0,051x_1 + 0,236x_2 - 0,00054x_3)}. \quad (12)$$

Рассмотрим пример. Зададимся значениями факторов:  $x_1 = 2\%$  (концентрация присадки к смазочному материалу),  $x_2 = 2$  мкм (толщина антифрикционного покрытия, полученного способом ФАБО),  $x_3 = 2,3$  МН (результатирующая динамическая нагрузка). Тогда:

$$K = e^{-(0,051 \cdot 2 + 0,236 \cdot 2 - 0,00054 \cdot 2,3)} = 0,564.$$

Если наработка без учета факторов  $x_1, x_2, x_3$  составляла  $T_m = 1000$  ч, то с их учетом:

$$T^{x_1, x_2, x_3} = \frac{T_m}{K} = \frac{1000}{0,564} = 1773 \text{ ч.}$$

Если износ без учета факторов  $x_1, x_2, x_3$  составлял  $U_m = 30$  мкм, то с их учетом:

$$U^{x_1, x_2, x_3} = U_m K = 30 \cdot 0,564 = 16,92 \text{ мкм.}$$

Полученные результаты соответствуют эмпирическим данным, полученным исследователями в ходе многочисленных экспериментов при испытаниях модифицированных смазочных материалов и антифрикционных покрытий [12–14].<sup>4, 5, 6</sup>

Для увеличения ресурса трибоэлементов требуется определенный резерв прочности и износостойкости.

Износостойкие свойства трущихся деталей можно рассматривать как совокупность таких взаимосвязанных процессов и явлений, как контактное взаимодействие шероховатостей, структурное и химическое изменение поверхностных слоев материалов, пластическое деформирование тонких поверхностных слоев и т. д. Резервирование по этим характеристикам должно осуществляться в процессе приработки путем управления процессами трения посредством нанесения на прирабатываемые детали антифрикционных покрытий, добавления активных присадок в смазочный материал, а также повышения его качества.

Распределение вероятности разрушения (изнашивания) детали трибосопряжения соответствует нормальному закону распределения [14; 15]<sup>7, 8</sup>:

$$P(\sigma_{II} < \sigma_{II}) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{II}} F(\sigma) d\sigma,$$

где  $\sigma_{II}$  — напряжение разрушения (изнашивания);  $\sigma_{II}$  — предельная прочность.

Таким образом, запас прочности можно определить:

$$[K] = \sigma_{II} / \sigma_{II}.$$

При создании резерва износостойкости произойдет смещение математического ожидания распределения  $\sigma_{II} \pm 3\Delta\sigma$ . Запас износостойкости перейдет в запас надежности — функцию  $[n] = F(P)$ <sup>8</sup>.

С учетом изложенного выше, главной задачей процесса приработки можно определить создание путем резервирования характеристик рабочих поверхностей деталей, в которых при дальнейшей эксплуатации наблюдается эффект безыносности, т. е. сопряжение переходит в режим избирательного переноса.

<sup>6</sup> Рекомендации по обезвоживанию нефтепродуктов в сельскохозяйственном производстве с помощью гидрофильного полимера. — М.: ВИМ, 1991. — 20 с.

<sup>7</sup> Советов, Б.Я. Моделирование системы / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. — М.: Высшая школа, 1985. — 279 с.

<sup>8</sup> Решетов, Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. — М.: Высшая школа, 1988. — 238 с.

Подводя итог, можно определиться с выводами:

1. Авторами статьи предложена новая структурная схема ГПА, состоящая из совокупности элементов и подсистем, описывающая их взаимосвязь между собой и позволяющая определить параметры и факторы, влияющие на ресурс подсистем и ГПА в целом.
2. Авторами статьи предложена математическая модель изнашивания трибоэлементов на этапе приработки трибосопряжений ГПА, дающая возможность определять влияние выбранных факторов (концентрация присадки к смазочному материалу, толщина прирабочного ФАБО-покрытия, результирующая величина динамических нагрузок) на величину начального и установившегося износа деталей трибосопряжений и прогнозировать ресурс ГПА в целом за счет улучшения и совершенствования процесса приработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Катков, Д.С. Анализ факторов, влияющих на ресурс трибосопряжений газоперекачивающих агрегатов [Электронный ресурс] / Д.С. Катков, О.В. Наумова, Е.В. Спиридонова, К.А. Елманов // Вестник Евразийской науки. — № 5, Т. 13, 2021. — ISSN 2588-0101. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/37SAVN521.pdf> (дата обращения: 17.01.2022).
2. Катков, Д.С. Анализ текущего состояния парка газоперекачивающих агрегатов в Российской Федерации [Электронный ресурс] / Д.С. Катков, О.В. Наумова, К.А. Елманов // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения / Сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции. — Саратов: СГТУ, 2022. — с. 36–39. — ISBN 978-5-7433-3521-3.
3. Майоров, В.С. Метод повышения надежности гидродинамических подшипников скольжения [Электронный ресурс] / В.С. Майоров // Известия вузов. Приборостроение. — 2012. — Т. 55 № 1. — С. 43–47. — ISSN 0021-3454. — Режим доступа: <http://pribor.ifmo.ru/file/article/5800.pdf>.
4. Сердобинцев, Ю.П., Модель динамического скольжения вала во втулке подшипника газоперекачивающего агрегата [Текст] / Ю.П. Сердобинцев, М.П. Кухтик, Д.К. Куач, А.И. Репников // Известия Волгоградского государственного технического университета. — № 8(231), 2019. — ISSN 1990-5297.
5. Доленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Доленко. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
6. Браун, Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун. — М.: Машиностроение, 1982. — 181 с.
7. Михин, Н.М. Механизм приработки при исходном пластическом контакте / Н.М. Михин // Трение и износ. — 1985. — Т. 6. — № 5. — С. 807–811.
8. Власов, В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей / В.М. Власов. — М.: Машиностроение, 1987. — 304 с.
9. Ханин, И.В. Механическое изнашивание трущихся деталей / И.В. Ханин. — М.: Машиностроение, 1987. — С. 123.

10. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. М., Транспорт, 1969.
11. Гаркунов Д.Н. Некоторые закономерности износа металлов в условиях сухого и граничного трения и пути его уменьшения // Труды III Всесоюз. конф. по трению и износу в машинах. Т. 2. Сухое и граничное трение. Фрикционные материалы. — М.: Изд. АН СССР, 1960. — с. 26–34.
12. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса / Под ред. Д.Н. Гаркунова. — М.: Машиностроение, 1977. — 214 с.
13. Быстров В.Н. Избирательный перенос при трении — новые возможности при изготовлении и использовании машин / Эффект безыноса и триботехнологии. № 1, 1992. — С. 17–33.
14. Кужаров, А.С. Комплексообразование при трении в режиме избирательного переноса / А.С. Кужаров // Трение, износ и смазочные материалы: матер. Междунар. конф. — Ташкент, 1985 — С. 48–49.
15. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.

**Katkov Danila Sergeevich**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia  
E-mail: syberberg@yandex.ru  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=674883](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=674883)

**Naumova Olga Valerevna**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia  
E-mail: uunaumov@mail.ru  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=393383](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=393383)

**Spiridonova Elena Vladimorovna**

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia  
E-mail: spiritlena77@yahoo.com  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=713953](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=713953)

**Elmanov Kirill Alekseevich**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia  
E-mail: Elmanov.k2000@gmail.com  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1125825](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1125825)

## Development of a block diagram of a gas-pumping unit, which includes a set of elements and subsystems, and a mathematical model of wear of its resource-limiting triboelements

**Abstract.** In the context of a tense geopolitical situation, solving the problem of ensuring the reliability of natural gas trunk transport, and hence the main equipment of compressor stations, is becoming increasingly important.

This article proposes a block diagram of a gas compressor unit, which includes a set of mechanisms and technical systems. The authors propose to consider a gas pumping unit as a complex two-level tribomechanical system consisting of a number of elements with input and output parameters. This scheme describes the relationship of triboelements and subsystems of the gas compressor unit between themselves and the external environment. Also, the task is to determine the main factors affecting the operation of any subsystem of a gas-pumping unit, and to build a mathematical model for the wear of its resource-limiting triboelements depending on these factors.

The article presents a graph of the dependence of the amount of wear of tribocoupling parts on the duration of operating time, three periods are considered: initial wear (running in of rubbing parts); steady wear; emergency wear. The key value of the running-in quality for subsequent steady-state wear is determined. As the main factors influencing the intensification and the running-in process, the following are determined: the concentration of the oil additive; thickness of the running-in coating obtained by the method of finishing anti-friction non-abrasive processing; the resulting value of dynamic loads. Dimension coefficients are calculated that characterize the degree of the system's response to a change in each of the selected factors. Dependences are obtained that make it possible to determine the effect of positive (the use of a modified lubricant and anti-friction coating) and negative (dynamic loads) on the amount of initial wear of tribo-coupling parts during the running-in period, as well as their wear during the period of steady operation, to predict the amount of wear at various values of operating time and resource gas compressor unit as a whole by improving and improving the running-in process.

**Keywords:** gas-pumping unit; tribocoupling; plain bearing; mechanical seal; dynamic load; service life; finished anti-frictional non-abrasive treatment; additive; lubricant