

# **СНИЖЕНИЕ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЗАПРАВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**А.М. Астанков;**

**А.В. Спесивцев, кандидат технических наук, доцент.**

**Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.**

**А.В. Вагин, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Предложена эффективная экспресс-методика количественного оценивания технического состояния насосных агрегатов заправочного оборудования ракетно-космических комплексов на основе экспертных знаний, позволяющих снизить вероятность возникновения рисков аварийных ситуаций.

*Ключевые слова:* системы заправочного оборудования ракетно-космических комплексов, логико-лингвистическая модель, экспресс-методика количественного оценивания технического состояния, снижение рисков

## **REDUCE THE RISK OF DANGEROUS CONSEQUENCES IF USE OF THE PUMP UNIT FILLING EQUIPMENT ROCKET-SPACE COMPLEX**

A.M. Astankov; A.V. Spesivtsev. Military space academy of A.F. Mozhaisky.

A.V. Vagin. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

On the basis of the logical-linguistic model there has been offered an effective rapid method of quantitative evaluation of pumping unit performance of fuelling equipment of rocket and space complexes, which makes it possible to reduce the probability of emergencies.

*Keywords:* systems of fuelling equipment of rocket and space complexes, logical-linguistic model, rapid method of evaluation of equipment technical state, risk reduction of emergencies

За последнее десятилетие резко возросла роль создания развитых систем оценивания и прогнозирования состояния сложного технического оборудования (ТО). Оборудование ракетно-космических комплексов (РКК), ввиду своей уникальности и заложенной избыточной прочности, работает за пределами назначенных показателей ресурса, что увеличивает риски возникновения нештатных ситуаций. Существует два варианта решения этой проблемы: первый – радикальная замена устаревшего оборудования практически одновременно на всех стартовых комплексах (СК), что потребует значительных капитальных вложений и в существующих условиях экономики практически нереально; и второй путь – создание новых подходов к оцениванию оборудования по фактическому техническому состоянию (ТС) с достоверным прогнозированием возможности продления назначенного ресурса их безопасной эксплуатации [1].

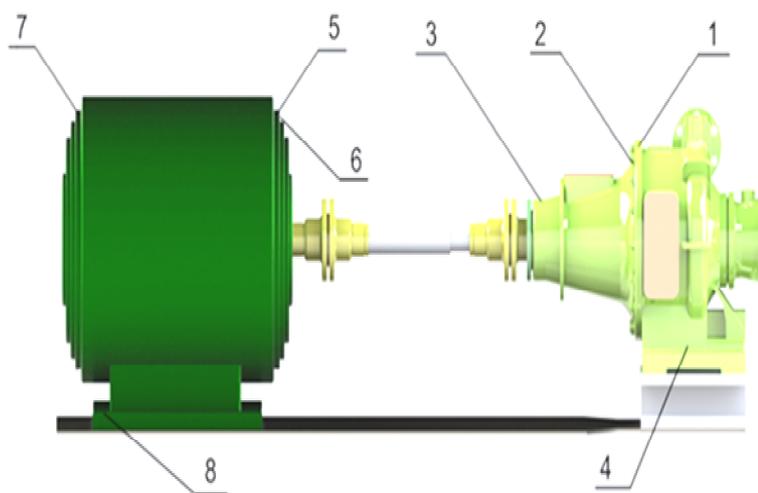
Общей тенденцией в эксплуатации и управлении сложными ТО, к которым относятся практически все техническое оборудование РКК, является выработка и принятие решения исключительно человеком. При этом правильность принятия решения

во многом зависит от адекватной диагностики технического состояния ТО. Как правило, сложные объекты функционируют в многомерных пространствах нечетких переменных, и для оценивания их ТС разработана технология использования экспертных знаний как наиболее действенный инструмент в условиях существенной неопределенности [2].

Целью настоящей работы является разработка эффективной экспресс-методики количественного оценивания ТС заправочного оборудования (ЗО) РКК, а именно насосных агрегатов (НА), в любой момент времени на основе экспертных знаний, позволяющих снизить вероятность возникновения рисков аварийных ситуаций.

В состав ЗО входят: хранилища компонентов ракетных топлив (КРТ), система подачи с оборудованием обвязки, трубопроводы, запорно-регулирующая арматура, а также система дистанционного управления заправкой (СДУЗ).

В системе подачи КРТ головным объектом выступают гидравлические НА (рис. 1). Следует отметить, что на космодромах Российской Федерации большая часть ЗО СК, в том числе и НА, работает за пределами назначенных показателей ресурса. Существующие методы контроля ТС НА, в связи со спецификой их эксплуатации на космодромах (всего несколько пусков в год с непредсказуемым временем простоев между пусками (рис. 2), не предусматривают полномасштабный непрерывный мониторинг основных эксплуатационных параметров, а регламентируют регистрацию их значений только в момент непосредственного проведения экспресс-оценки ТС перед предполагаемым пуском ракеты космического назначения (РКН).



**Рис. 1. Расположение точек контроля на насосном агрегате:  
1, 2 – опорный узел роликового подшипника НА; 3 – опорный узел шарикового подшипника НА;  
4 – крепление НА к фундаменту; 5, 6 – опорный узел электродвигателя № 1;  
7 – опорный узел электродвигателя № 2; 8 – крепление электродвигателя к фундаменту**

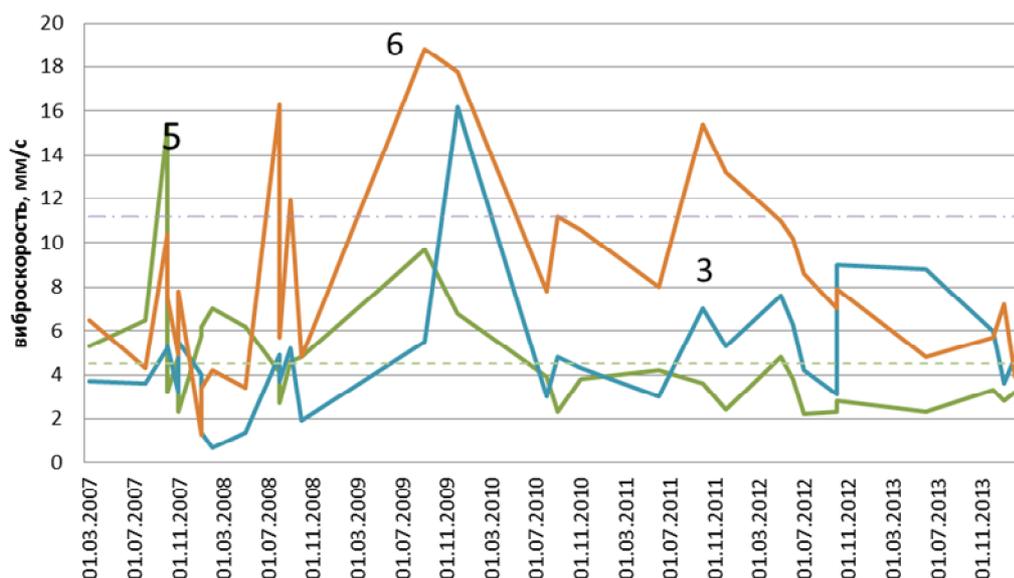


Рис. 2. Временная диаграмма проведения экспресс-оценок ТС НА: цифры у кривых соответствуют номерам точек измерения на рис. 1

В соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1-97 [3] и утвержденными методиками при продлении назначенных показателей ресурса и подготовке к пуску РКН специалисты контролируют температуру и параметры вибрации НА 3О СК: виброускорение, виброскорость, размах виброперемещения.

Методика обследования НА состоит в следующем. Из числа потенциально возможных выбирают точки контроля, которые в максимальной степени реагируют на динамические силы и характеризуют общее вибрационное состояние машины, как показано на рис. 1.

Измерения проводят виброметром ВК-5, что позволяет в реальном масштабе времени проводить экспресс-оценку ТС агрегата в контролируемых точках. Типичные результаты контроля НА ЦН-112М представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты контроля параметров вибрации НА\*

Тип и обозначение насосного агрегата	Наименование контролируемого параметра	Номера точек							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ЦН-112М «А»	Виброскорость, мм/с	10,4	11,1	10,2	6,3	3,3	8,7	4,5	4,4
	Виброперемещение, мкм	24	50	41	32	27	76	26	22
ЦН-112М «Б»	Виброскорость, мм/с	8,3	4,5	9,7	8,9	5,5	<b>18,8</b>	6,2	7,4
	Виброперемещение, мкм	68	48	10	32	52	<b>163</b>	49	67
ЦН-112М «В»	Виброскорость, мм/с	2,6	4,4	4,3	6,4	5,9	<b>13,7</b>	4,9	3,3
	Виброперемещение, мкм	17	20	17	12	57	<b>130</b>	46	26
ЦН-112М «Г»	Виброскорость, мм/с	6,0	9,1	13,4	7,3	2,4	<b>11,7</b>	4,4	2,4
	Виброперемещение, мкм	21	52	29	29	19	<b>109</b>	41	22

\* – жирным шрифтом выделены запредельные по ГОСТ значения

Согласно существующей классификации по допустимым вибрациям, электронасосные агрегаты ЦН-112М относятся к классу средних машин (до 300 кВт), жестко установленных на специальных фундаментах. Машины подобного класса при значениях виброскорости

до 4,5 мм/с считаются пригодными для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков, при значениях виброскорости от 4,5 мм/с до 11,2 мм/с рассматриваются как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации и могут функционировать ограниченный период времени, а при значениях свыше 11,2 мм/с вибрации рассматриваются как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение машины [3].

По такой регламентированной соответствующими инструкциями шкале на основании полученных результатов контроля делается вывод о ТС агрегата в данный момент времени. Так, по данным измерений, приведенных в табл. 1, можно сделать однозначный вывод, что три агрегата под литерами «Б», «В» и «Г» к эксплуатации в данный момент непригодны и нуждаются в техническом ремонте.

Следует отметить, что существующие методики рассматривают и оценивают каждый из факторов отдельно, хотя естественно полагать, что в процессе эксплуатации составные узлы НА обуславливают взаимовлияние и регистрируемые параметры являются, по своей сути, обобщенными характеристиками состояния НА в целом.

В данной работе НА рассматривается как единый целостный объект, функционирующий в многофакторном пространстве нечетких переменных, что обуславливает возможность комплексного использования как количественных, так и качественных переменных. Такой подход позволяет строить логико-лингвистическую модель состояния агрегата в виде обобщенного показателя (ОП) ТС НА с использованием знаний и опыта высококвалифицированных специалистов-экспертов, эксплуатирующих данный объект [2].

Эксплуатация НА СК имеет ряд специфических особенностей по сравнению с требованиями и методиками ТС, принятыми в ГОСТ ИСО 10816-1-97 [3]. Так, например, периодичность функционирования оборудования (рис. 2) составляет 1–4 цикла в год при кратковременности одного цикла 1–4 ч; существенными являются факторы, связанные с использованием агрессивных компонентов ракетного топлива; регламентированное проведение технических осмотров только непосредственно перед стартом РКН; уровень квалификации обслуживающего персонала; неопределенность степени влияния наведенной вибрации и др.

Проявлениями такой неопределенности являются отказы НА по некоторым видам дефектов, о чем свидетельствуют данные из многолетней практики их функционирования, представленные в виде круговой гистограммы на рис. 3.

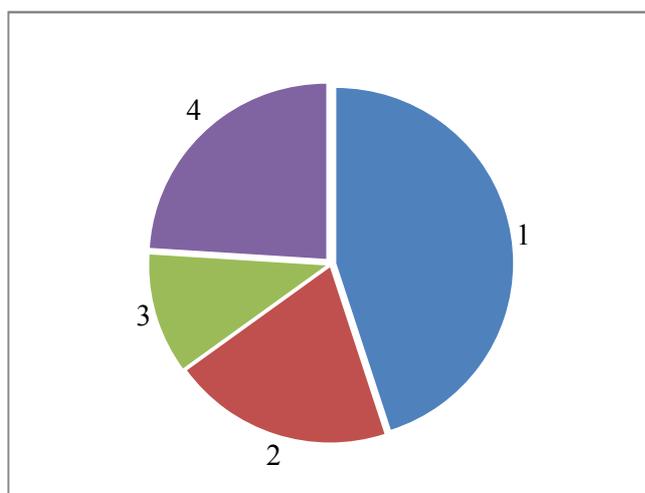


Рис. 3. Гистограмма распределения отказов в НА 30 СК по видам дефектов:  
1 – разрушение подшипника; 2 – разрушение ступицы;  
3 – разрушение торцевого уплотнения; 4 – перекося вала

Факторное пространство подобного рода, составленное из перечисленных особенностей эксплуатации НА 30 СК РКК, при наличии знаний и опыта высококвалифицированных специалистов-экспертов, позволяет применить метод построения логико-лингвистической модели [2].

Из числа потенциально возможных выбраны количественные и качественные (неколичественные, вербальные) переменные:

- $x_1$  – несоосность валов (градусы);
- $x_2$  – перекос колец (градусы);
- $x_3$  – показатель отсутствия ресурсной смазки (качественная переменная);
- $x_4$  – влияние наведенной вибрации (качественная переменная);
- $x_5$  – агрессивная среда в торцевом уплотнении (качественная переменная);
- $x_6$  – время простоя между циклами (мес.);
- $x_7$  – температура опорных узлов ( $^{\circ}\text{C}$ ).

В качестве выходной переменной выбрана  $Y$  – степень вибрации как обобщенный показатель ТС АН, по которому принимается решение о состоянии агрегата в целом.

В табл. 2 представлены характеристики, а на рис. 4 – графический вид лингвистической переменной  $Y$ . График на рис. 4 содержит шкалы: три по оси абсцисс – лингвистическую («Низкая», ..., «Высокая»), перевода лингвистической в числовую (5, ..., 13) и кодированных значений переменной (-1, ..., +1) для опросной матрицы (табл. 3), а по оси ординат – шкалу функции принадлежности в интервале [0, 1].

Таблица 2. Характеристика  $Y$  как лингвистической переменной

Интервалы	Мода	Значение моды	Характеристика
7 и ниже	Низкая (Н)	3	Профилактика не требуется
3–11	Ниже средней (НС)	7	Периодический контроль
7–15	Средняя (С)	11	Постоянный контроль. При выходе за предельный уровень – вывод в ремонт
11–19	Выше средней (ВС)	15	Постоянный контроль. Возможна эксплуатация только на нижней границе интервала
15 и выше	Высокая (В)	19	Эксплуатация недопустима

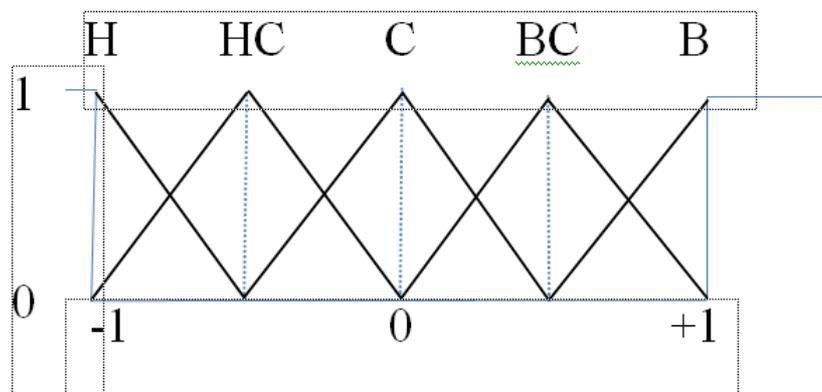


Рис. 4. Степень вибрации как обобщенный показатель ТС НА 30 СК

Согласно методике [2], экспертом заполняется опросная матрица специального вида (табл. 3) по технологии теории планирования экспериментов типа  $2^{7-1}$ , по которой далее строится полиномиальная модель (формула (1)).

В табл. 3 приведен фрагмент опросной матрицы с ответами эксперта в лингвистическом и оцифрованном виде, а также рассчитанные по формуле (1) значения  $Y$ .

Таблица 3. Фрагмент опросной матрицы с ответами эксперта и расчетными значениями по модели

№ п/п	Степень несоосности валов, МКМ	Перекося колен, угол	Степень отсутствия смазки	Степень наведенной вибрации	Возможность попадания агрессивной среды	Время простоя между циклами	Температура опорных узлов	Обобщенный показатель ТС НА		
								Экспертные моды термов	Числовые значения термов	Расчетные значения по формуле (1)
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$Y_3$	$Y_3$	$Y_{расч}$
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	H	3	3,1875
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	HC	7	6,8125
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	H-HC	5	5,0625
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	C	9	10,937
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	-1	-1	1	1	1	1	1	BC	15	14,875
62	1	-1	1	1	1	1	-1	BC-B	17	16,375
63	-1	1	1	1	1	1	-1	C-BC	13	12,625
64	1	1	1	1	1	1	1	B	19	18,281

По результатам обработки экспертных данных, приведенных в табл. 3, получено аналитическое выражение:

$$Y = 11,25 + 2,3125x_1 + 1,0625x_2 + 1,0x_3 + 1,0x_4 + 1,625x_5 + 0,8125x_6 + 0,5625x_7 - 0,4375x_1x_3 - 0,875x_1x_7 - 0,5x_2x_6 - 0,375x_2x_7 - 0,3125x_5x_6 - 0,375x_1x_5x_7 + 0,4375x_2x_4x_5. \quad (1)$$

Степень адекватности (1) оценим по критериям представительности [2]. Так, точность вычислений по формуле (1), определяемая по значению остаточного среднеквадратического отклонения  $s_{ост}$  по всему множеству точек табл. 2 ниже исходной нечеткости экспертных оценок  $0,5 d(A_y)$ :

$$s_{ост} = 0,752 < 2 = 0,5 d(A_y),$$

а сумма модулей полинома (1) существенно выше  $0,5 d(A_y)$ :

$$12,98 = \sum_{i=1}^n |b_i| \gg 0,5 d(A_y) = 2.$$

Оба эти критерия указывают на адекватность модели (1) экспертным знаниям и опыту при эксплуатации НА 30.

Дополнительно на рис. 5 показан график корреляции расчетных по полиному (1) и оценок эксперта, из которого следует отсутствие отклонения рассеяния точек от теоретической линии регрессии – диагонали квадрата.

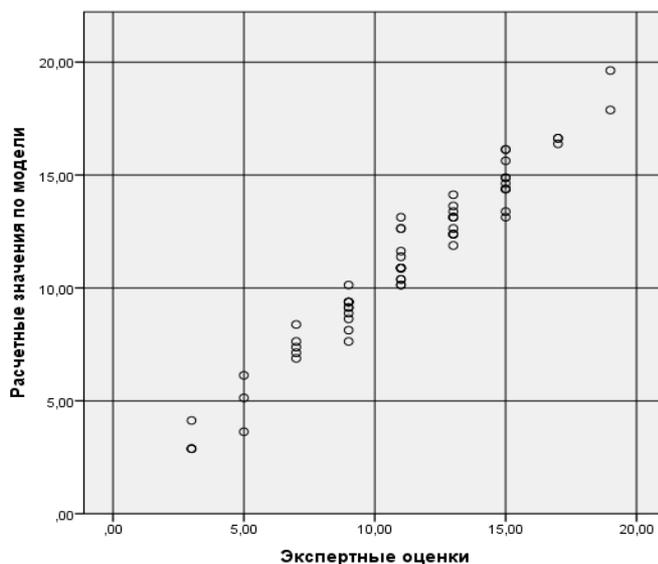


Рис. 5. Корреляции оценок эксперта (ось абсцисс) и расчетных по полиному (1)

Вычисленные по формуле (1) значения в условиях проведения обследования табл. 1 для точки 6 дают ошибку менее 5 отн. %. Так, рассчитанная для агрегата А, виброскорость составила 9,11; Б – 19,06; В – 14,16; Г – 12,23 мм/с.

Из проведенного оценивания следует вывод о том, что полином (1) адекватно описывает изучаемое явление и его можно использовать как модель [2].

На основе полученной модели (1) был проведен численный эксперимент, при расчетах в котором значения всех переменных фиксировались на определенном уровне, кроме одной, которая затем «пробегала» всю шкалу признака, как показано на рис. 6.

По поведению графиков можно судить о силе влияния соответствующего фактора на зависимую переменную в присутствии влияния остальных. Так, по графику на рис. 6 а можно сделать заключение, что если значения всех переменных находятся только на начальных уровнях, то наблюдаемая картина полностью соответствует сложившемуся мнению эксплуатационщиков: наибольшее влияние оказывает несоосность валов, а затем – перекос колец, отсутствие ресурсной смазки, попадание агрессивной среды в торцевое уплотнение и температура опорных узлов примерно равносильны. Однако даже наибольшие значения переменных поодиночке не дают превышения вибрации выше допустимой.

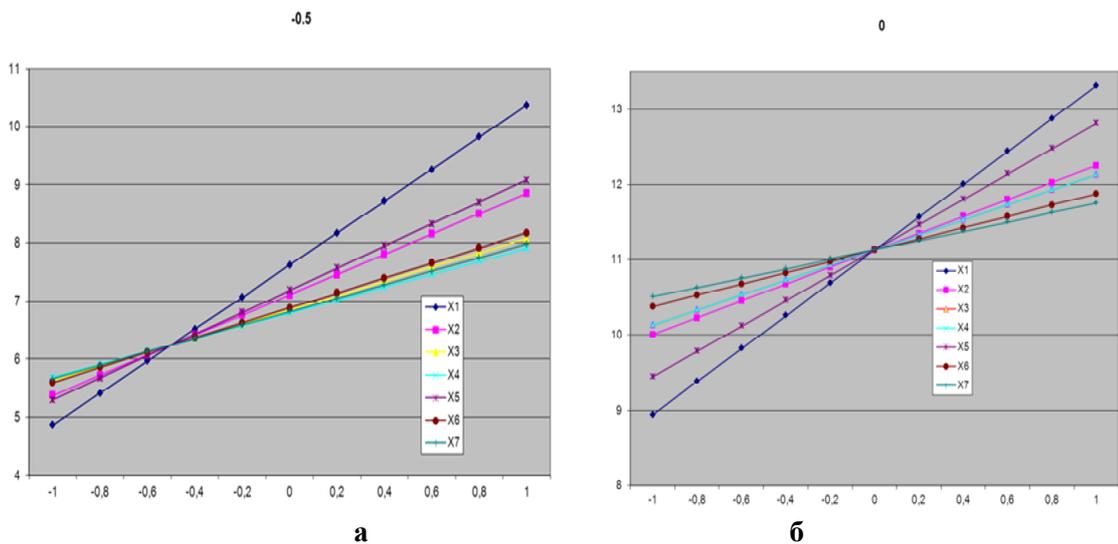


Рис. 6. Результаты численного эксперимента:

**а** – при начальных значениях эксплуатации; **б** – средних

Совершенно другая ситуация складывается, если все значения переменных одновременно достигают среднего уровня (рис. 6 б): превышение хотя бы одного из них приводит к превышению предельного значения вибрационной скорости 11,2 мм/с. Обращает на себя внимание усиление влияния переменных, характеризующих попадание агрессивной среды в торцевое уплотнение и степени наведенной вибрации. При этом можно отметить, что повышенное внимание эксперта на попадание агрессивной среды в торцевое уплотнение указывает скорее на необходимость более тщательного внимания к технике безопасности при работе с высокотоксичными агрессивными средами.

Наличие логико-лингвистической модели (1) дает возможность проведения более глубокого анализа изучаемого явления. Так, взятие частных производных по всем переменным факторного пространства позволяет определять их формирование другими переменными, как показано ниже:

$$\frac{\partial Y}{\partial x_1} = 2,3125 - 0,4375x_3 - 0,875x_7 - 0,375x_5x_7;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_2} = 1,0625 - 0,5x_6 - 0,375x_7 + 0,4375x_4x_5;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_3} = 1,0 - 0,4375x_1;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_4} = 1,0 + 0,4375x_2x_5;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_5} = 1,525 - 0,3125x_6 - 0,375x_1x_7 + 0,4375x_2x_4;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_6} = 0,8125 - 0,3125x_5;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_7} = 0,5625 - 0,875x_1 - 0,375x_2 - 0,375x_1x_5.$$

По частным производным представляется возможным определение градиента функции по формуле:

$$gradY = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i}\right)^2}$$

и рассчитать его значения для различных состояний НА.

Рассмотрим случаи благоприятного и неблагоприятного состояния НА. Так, в благоприятном случае в начале эксплуатации после очередного технического обслуживания и проведения соответствующего ремонта все переменные принимают значения  $x_1, \dots, x_7 = -1$ , а величина градиента составит  $gradY = 4,57$ .

При неблагоприятном случае значения всех переменных принимают значения  $x_1, \dots, x_7 = +1$ , а величина градиента составит  $gradY = 2,67$ .

Следует особо отметить еще одно важное обстоятельство, касающееся специфики эксплуатации НА ЗО СК, – специальные комплексные исследования мониторинга агрегатов или их узлов с применением различных методов диагностирования практически не проводились. Поэтому нерешенными остаются следующие насущные вопросы: виды вибрационных измерений, используемых для измерения; основные подходы к выбору диагностических признаков; правила построения эталонов и определения пороговых значений; подходы к диагностике и прогнозу состояния НА в целом и др. [4, 5]. По-видимому, уверенность в заложенной избыточной прочности при создании НА для космической отрасли и инерционность мышления ответственных руководителей («до сих пор же ракеты запускают») ограничивает применения всего спектра существующих методик для решения назревших задач по повышению безопасности НА СК РКК.

## Выводы

1. С использованием метода, основанного на синтезе элементов теории нечетких множеств и теории планирования эксперимента, построена логико-лингвистическая модель технического состояния НА ЗО СК РКК в виде обобщенного показателя состояния агрегата в целом.

2. Показана эффективность применения логико-лингвистических моделей для количественного оценивания состояния НА ЗО СК РКК в многомерном пространстве нечетких переменных, позволяющая получать принципиально новую обобщенную информацию о поведении агрегата в процессе его эксплуатации.

3. Построенная модель способна стать базой знаний для более глубокого изучения происходящих внутри НА ЗО СК РКК процессов и с расширением номенклатуры применяемых методов вибрационной диагностики получать данные для диагностирования предполагаемых дефектов, применяя при этом методы решения обратной задачи по полученной модели.

4. Предлагаемый метод построения логико-лингвистических моделей является универсальным и может служить для создания экспресс-методик количественного оценивания ТС различного оборудования РКК. Как и применительно к насосным агрегатам, подобные методики [5] позволяют получать данные о состоянии объектов в любой момент времени для принятия своевременных аргументированных решений, что снижает вероятность рисков возникновения аварийных ситуаций.

## Литература

1. Миронов А.Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. М.: Министерство обороны, 2000. 429 с.

2. Спесивцев А.В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации / под ред. В.С. Артамонова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 238 с.

3. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Межгосударственный стандарт. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1: Общие требования // StandartGOST.ru – открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru/> (дата обращения: 20.10.2015).

4. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учеб. пособие. СПб.: СЕВЗАПУЧЦЕНТР, 2012. 159 с.

5. Скориков Д.В., Спесивцев А.В., Вагин А.В. Исследование влияния метрологических характеристик средств измерения на оценку риска эксплуатации сложных технических комплексов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2010. № 4 (16). С. 48–53.