

Д.Н. Гула, кандидат технических наук

Логико-лингвистическая модель прогнозирования изменения технического состояния металлооблицовки нулевой отметки стартового комплекса

В статье представлена логико-лингвистическая модель (ЛЛМ) прогнозирования возможности (вероятности) возникновения дефекта листов как показателя изменения технического состояния (ТС) металлооблицовки нулевой отметки стартового комплекса (СК) различных конструкций (схем) в реальных условиях. Данная модель, в отличие от общепринятых математических моделей, построена с использованием знаний и опыта экспертов и позволяет осуществлять прогноз на заданное количество пусков ракет космического назначения (РКН).

Существующие методы анализа качественных признаков, такие как таблицы «объект-признак», матрицы связи «объект-объект» или дискретных распределений, применительно к техническим объектам не обеспечивают возможность дальнейшего их использования для получения содержательной оценки ТС.

Общепринято, что для оценивания ТС металлооблицовки СК применяются математические зависимости. Однако в реальных условиях эксплуатации ракетно-космической техники обслуживающий персонал находится в ситуации, когда практически невозможно достоверно получить значения многих переменных, входящих в теоретические уравнения, и поэтому приходится использовать знания и опыт высококвалифицированных специалистов. Таким образом, исследователь находится в типичных условиях неопределенности, когда вместе с количественными данными приходится пользоваться экспертными оценками. В подобных ситуациях целесообразно применение метода построения ЛЛМ, основой построения которой являются теория планирования экспериментов [1] и методы элементов теории нечетких множеств (лингвистические переменные) [2], в связи с чем возникает необходимость совместной обработки как качественных (количественных, вербальных), так и количественных переменных. Алгоритм построения обобщенного параметра изменений ТС в нечеткой информационной среде представлен на рисунке 1.

Согласно алгоритму сначала на основе теоретических исследований и экспертных знаний определяется факторное пространство из лингвистических переменных и строится опросная матрица в виде наборов продукционных правил, составляющих строки этой матрицы. Продукционные правила имеют вид «Если ..., то ...», а каждая продукция представляет собой сочетание значений переменных, определяющих конкретную возможную ситуацию, и оценивается исходя из целей решаемой задачи сочетаниями, например, «ситуация-действие» или «ситуация-состояние».

Заполненная экспертом матрица после обработки данных позволяет аппроксимировать результаты аналитической функцией вида:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{u,j=1}^n \beta_{ju} x_j x_u + \dots, \quad (1)$$

где $j \neq u$, Y – результаты эксперимента, учитываемые при анализе;

β – получаемые коэффициенты.

Применительно к оцениванию состояния металлооблицовки нулевой отметки СК в результате работы с экспертами выделены наиболее существенные переменные, которые составили факторное пространство для создания ЛЛМ [3]:

X_1 – количество циклов работы (количество пусков РКН);

X_2 – конструктивная схема закрепления листов металлооблицовки (качественная переменная: «-1» – болтовая, «+1» – сварная);
 X_3 – толщина листов металлооблицовки;
 X_4 – марка стали листов металлооблицовки (качественная переменная: «-1» – Ст3, «+1» – Ст45);
 X_5 – совокупная характеристика РКН (качественная переменная: «-1» – легкая, «+1» – тяжелая);
 X_6 – совокупная характеристика, определяющая климатические условия (качественная переменная: «-1» – лето, «+1» – зима);
 Y – возможность (вероятность) возникновения дефекта листов металлооблицовки нулевой отметки СК.

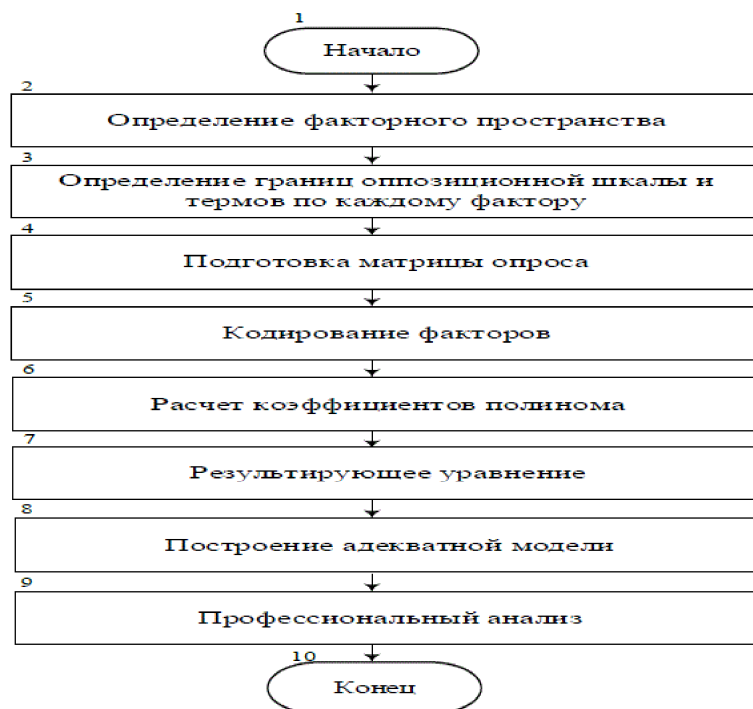


Рисунок 1 – Алгоритм построения логико-лингвистической модели

Выбранное факторное пространство обеспечивает системный подход к получению обобщенного показателя (ОП) Y , так как характеризует его с различных сторон, а именно: непосредственное воздействие на объект (X_1, X_5); характеристика объекта (X_2, X_3, X_4); внешние действующие факторы (X_6). В таблице 1 показана шкала ранжирования Y для оценивания возможности (вероятности) возникновения дефектов металлооблицовки СК. Поскольку нечеткость исходной информации обуславливает нечеткость предполагаемых выводов, то терм-множества возможных значений таблицы 1 пересекаются по всей области определения, как показано на рисунке 2.

На этапе выбора и формализации ОП Y использована ранжированная шкала оценивания возможности (вероятности) возникновения дефектов металлооблицовки СК, построенная на основании содержательных бесед (работы) с экспертами. Для реализации этой задачи осуществляется разбиение области определения Y на участки в интервале $[0, 1]$ (рисунок 2).

Фрагмент опросной матрицы вместе с оценками эксперта в лингвистическом виде и переведенными по шкале рисунка 1 в количественное выражение представлены в таблице 2. Все переменные, согласно методам теории планирования экспериментов [1], представлены в стандартизованном масштабе $[-1; +1]$.

Таблица 1 – Шкала нечетких значений зависимой переменной Y как ОП ТС металлооблицовки СК

Интервал	Мода интервала	Обозначение		Косвенные признаки изменения состояния
0,25 и ниже	0,10	низкое	H	Конструктивные элементы металлооблицовки не имеют явных дефектов и повреждений. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики металла полностью соответствуют эксплуатационной документации.
0,10 – 0,40	0,25	ниже среднего	HC	Основные конструктивные элементы металлооблицовки не имеют явно выраженных дефектов и повреждений. Отмечаются незначительные дефекты листов металлооблицовки. Эксплуатационные характеристики, конструктивная схема и прочностные характеристики металла соответствуют эксплуатационной документации.
0,25 – 0,55	0,40	среднее	C	Основные конструктивные элементы металлооблицовки имеют отдельные дефекты, не оказывающие влияние на использование металлооблицовки стартового сооружения (СС) по назначению и (или) на ее долговечность. Проведение ремонтно-восстановительных работ (РВР) требуется в незначительных объемах.
0,40 – 0,70	0,55	выше среднего	BC	Отмечаются дефекты, оказывающие влияние на использование металлооблицовки СК по назначению и (или) на ее долговечность. Наблюдаются деформации и разрушения. Проведение РВР в значительных объемах.
0,55 и выше	0,70	высокое	B	Отмечаются значительные дефекты, при наличии которых использование металлооблицовки СК невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности. Проведение РВР металлооблицовки стартового сооружения состоит в частичной замене металлооблицовки.

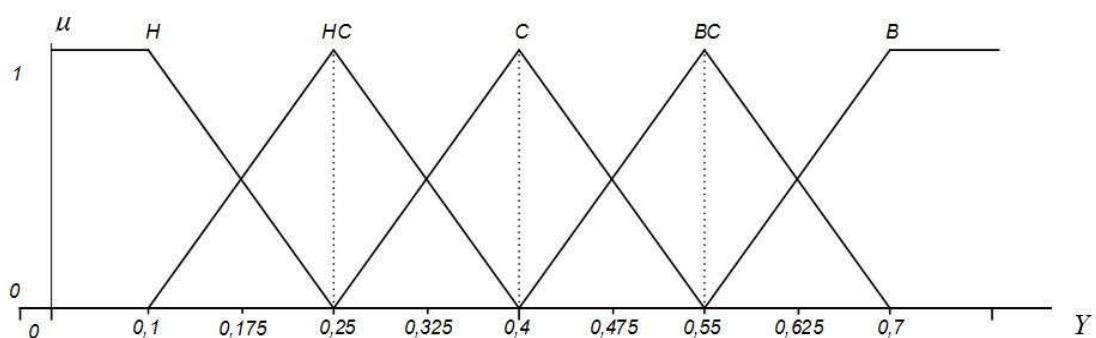


Рисунок 2 – Области определения возможности возникновения дефектов металлооблицовки нулевой отметки СК (как лингвистической переменной по таблице 1)

В результате обработки данных матрицы методами теории планирования экспериментов [1, 4] получено полиномиальное уравнение для расчета текущего значения Y :

$$Y = 0,412 + 0,073 x_1 + 0,059 x_2 - 0,026 x_3 + 0,105 x_5 + 0,026 x_6 + 0,035 x_1 x_4 - 0,045 x_2 x_5 - 0,026 x_3 x_4 - 0,021 x_4 x_6 - 0,035 x_1 x_2 x_6 + 0,026 x_1 x_3 x_5 + 0,04 x_2 x_3 x_4.$$

Таблица 2 – Опросная матрица с оценками эксперта и расчетными значениями по модели (2)

№ п/п	Количество пусков	Конструктивная схема закрепления листов металлооблицовки	Толщина листа металлооблицовки	Марка стали листов металлооблицовки	Совокупная характеристика РКН	Совокупная характеристика, определяющая климатические условия	Возможность возникновения дефекта листов металлооблицовки нулевой отметки СК Y		
							$Y_{\text{эксп}}$	$Y_{\text{расч}}$	$Y_{\text{расч}}$
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	$Y_{\text{эксп}}$	$Y_{\text{расч}}$	$Y_{\text{расч}}$
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	Н	0,1	0,088
2	1	-1	-1	-1	-1	1	НС	0,25	0,309
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-1	1	1	1	1	-1	НС-С	0,33	0,346
32	1	1	1	1	1	1	ВС-В	0,63	0,623

В полученном выражении (2) приведены только значимые коэффициенты, а находящиеся в пределах ошибки в дальнейшем считают равными нулю и из рассмотрения исключают.

Степень адекватности выражения (2) оценивалась ситуационно по результатам проведения РВР после пуска РКН на космодромах с различными схемами закрепления листов металлооблицовки нулевой отметки СК [5] (таблица 3). Такой подход обусловлен отсутствием достоверной количественной связи величины рассчитываемой вероятности с затратами на РВР.

Таблица 3 – Возможности возникновения дефектов в металлооблицовке СК

Космодром	Количество пусков	Конструктивная схема закрепления листов металлооблицовки	Толщина листа металлооблицовки, м	Марка стали листов металлооблицовки	Совокупная характеристика РКН	Совокупная характеристика климатических условий	Расчетная возможность (вероятность) возникновения дефекта	Класс состояния металлооблицовки	РВР
Пле-сецк	5	Сварная	0,02	Ст3	РН «Союз»	Зима	0,484	С-ВС	Сварка элемента разрешенного участка
Пле-сецк	7	Сварная	0,02	Ст3	РН «Союз-2» РБ «Фрегат»	Зима	0,519	С-ВС	Сварка разрушенного участка металлооблицовки с частичной заменой листов металлооблицовки (рисунок 3)
Пле-сецк	1	Болтовая	0,02	Ст3	Ангара А1	Лето	0,242	Н-НС	Не понадобились
Пле-сецк	2	Болтовая	0,02	Ст3	Ангара А5	Зима	0,305	НС	Не понадобились
Байко-нур	1	Сварная	0,02	Ст3	Протон	Лето	0,564	ВС	Полная замена листов металлооблицовки (рисунок 4)



Рисунок 3 – Фрагменты разрушения металлооблицовки при пуске РН «Союз»



Рисунок 4 – Отрыв от железобетонного покрытия СС металлооблицовки при пуске РН «Протон» (26.12.2007)

Анализ данных (таблица 3) позволяет сделать **вывод**, что возможность возникновения дефекта при болтовом способе закрепления металлооблицовки СК существенно ниже, чем при сварном способе закрепления листов металлооблицовки нулевой отметки СК.

Из проведенного оценивания следует:

- полином (2) адекватно описывает представленные ситуации в широком диапазоне их изменения и его можно использовать как модель ЛЛМ изучаемого явления;
- на основе построенной ЛЛМ можно проводить прогнозирование возможности возникновения дефектов в металлооблицовке нулевой отметки СК в качестве показателя изменения ее ТС при любом способе закрепления металлооблицовки и заданном количестве пусков РКН.

На основе ЛЛМ (2) был проведен численный эксперимент. При расчетах все переменные, кроме одной, фиксировались на определенном уровне. Затем эти переменные «пробегали» всю шкалу значений признака (ось абсцисс).

Результаты численного эксперимента показаны на рисунках 5, 6.

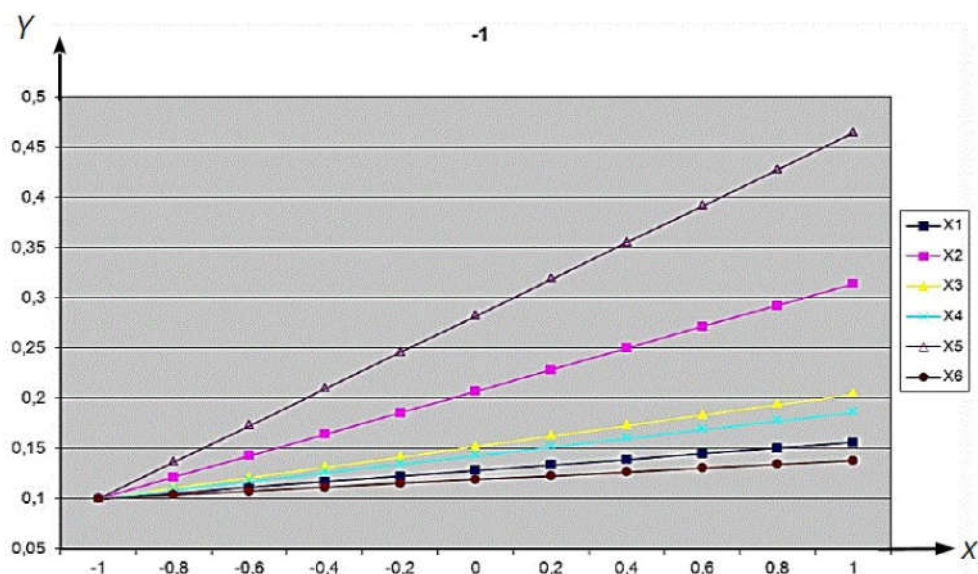


Рисунок 5 – Результаты численного эксперимента в начале эксплуатации металлооблицовки

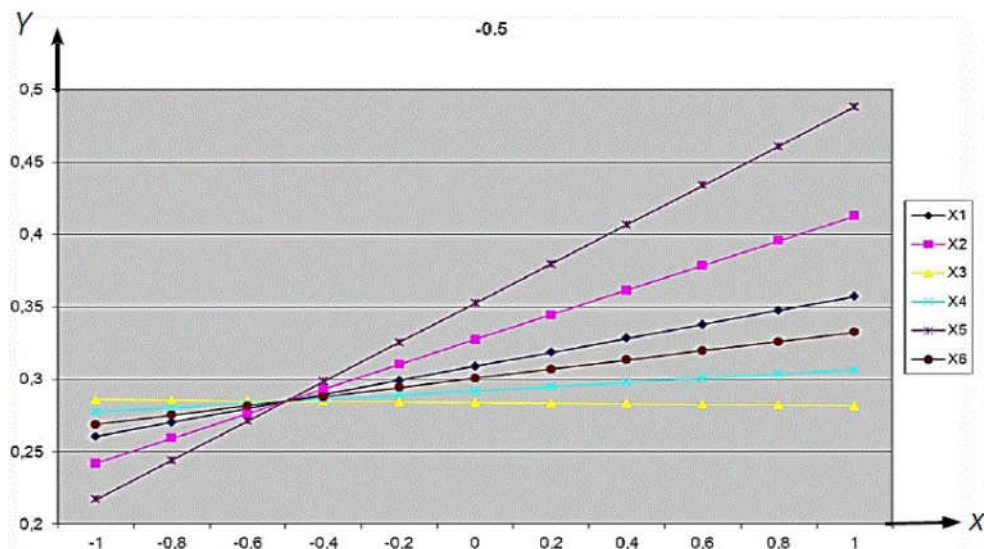


Рисунок 6 – Результаты численного эксперимента во второй четверти времени (периода) эксплуатации металлооблицовки

По поведению графиков можно судить о силе влияния соответствующего фактора на зависимую переменную в присутствии влияния остальных.

Так, результаты, полученные в ходе эксперимента (рисунок 5), позволяют сделать следующие **заключения:**

- если значения всех переменных находятся только на начальных уровнях (начало эксплуатации металлооблицовки СК, например, после капитального ремонта), то наблюдаемая картина полностью соответствует сложившемуся мнению специалистов по эксплуатации: наибольшее влияние на скорость разрушения оказывают такие факторы, как совокупная характеристика (класс) РКН (X_5) конструктивная схема закрепления листов металлооблицовки СК (X_2), а также толщина листов металлооблицовки (X_3);
- замена сварной схемы закрепления на болтовую схему закрепления (таблица 3) повышает ресурс металлооблицовки.

В качестве прогноза дальнейшей эксплуатации болтовой схемы закрепления листов металлооблицовки рассмотрим поведение переменных на рисунке 6. Когда все переменные принимают кодированное значение «-0,5» (первая четверть времени (периода) эксплуатации), кроме наблюдаемого в начале ключевого негативного воздействия класса РКН (X_5) и сварной схемы закрепления ($X_2=+1$), дополнительно сказывается негативное влияние переменной (X_1) – количество циклов (пусков РКН). При этом пуск РКН тяжелого класса способен привести к существенному росту повреждений металлооблицовки со всеми вытекающими последствиями (таблица 1), что существенно увеличивает риск возникновения дефектов в листах металлооблицовки нулевой отметки СК вместе с увеличением частоты пусков РКН.

Таким образом, применение ЛЛМ (2) дает возможность проведения более глубокого анализа изучаемого явления. Так, сравнительный анализ данных (рисунки 5, 6) показывает, что вычисленные значения Y представляют текущий уровень возможности (вероятности) возникновения дефектов количественно и использование болтового способа закрепления с применением толстых листов металлооблицовки повышает ресурс металлооблицовки, что, в свою очередь, ведет к уменьшению частоты и времени проведения РВР на СК.

Использование разработанной ЛЛМ (2) дает возможность более обоснованно принимать решение о состоянии металлооблицовки, а также использовать результаты расчетов при принятии

решения о продлении сроков эксплуатации металлооблицовки нулевой отметки СК. Ведение мониторинга по ЛЛМ текущего уровня металлооблицовки СК позволит делать адекватный прогноз и заблаговременно наметить порядок замены изделий, состояние которых оценивается между тер-множествами «Выше среднего» и «Высокий», когда выполнение пуска РКН находится под угрозой.

Список использованных источников

1. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
2. Спесивцев А.В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации / Под ред. проф. В.С. Артамонова. – СПб.: Политехнический университет, 2004. – 238 с.
3. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Наука, 1981. – 292 с.
4. Болдырев В.И. Метод кусочно-линейной аппроксимации для решения задач оптимального управления // Дифференциальные уравнения и процессы управления: электронный журнал. – 2004. – № 1.
5. Гула Д.Н. Анализ возможных схемных решений закрепления листов металлооблицовки нулевой отметки стартового сооружения универсального стартового комплекса «Ангара» // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 1. – Ч. 1.