

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Логанина В. И., д-р техн. наук, проф.,

Куимова Е. И., канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ КРАСОЧНЫХ СОСТАВОВ НА КАЧЕСТВО ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ\*

loganin@mail.ru

Приведены сведения о применении метода канонических корреляций к оценке влияния технологических факторов на качество лакокрасочных покрытий строительных изделий и конструкций. Рассмотрен алгоритм расчетов метода канонических корреляций. Показано, что пористость подложки является решающим фактором, определяющим качество лакокрасочного покрытия. Вязкость краски при нанесении ее пневматическим способом влияет на показатели качества меньше по сравнению с кистевым нанесением

**Ключевые слова:** качества лакокрасочного покрытия, пористость подложки, вязкость краски, метод нанесения, корреляция

**Введение.** Проведенные ранее исследования показывают, что стойкость лакокрасочных покрытий в числе других факторов определяется качеством внешнего вида покрытий [1,2]. На качество внешнего вида покрытий существенное влияние оказывают технология нанесения краски, ее реологические свойства, качество окрашиваемой поверхности. Между тем, процесс создания лакокрасочных покрытий на пористой цементной подложке зачастую является нестабильным и невоспроизводимым [3]. В связи с этим актуальным является оценка наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на качество покрытий.

**Методология.** Современные знания о возможностях математической обработки статистической информации и интерпретации полученных результатов позволяют исследовать взаимосвязи отдельных сторон технологических процессов при вовлечении в процесс анализа сразу нескольких результативных факторов.

Рассмотрим возможность применения методов многомерного статистического анализа, в основе которых лежит гипотеза о возможности изучения существующих связей между наблюдаемыми явлениями косвенным путем, состоящим в построении корреляционных матриц и распознавании их на основе факторных оценок для выявления причин снижения качества покрытий и появления дефектов [4,5,6].

Качество определяется множеством различных величин – показателей качества

$y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ . Технологических факторов также множество  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Между записями измеренных значений факторов и показателей существует соответствие  $y_q \leftrightarrow x_q$ ,  $q=1,2,\dots,Q$ , где  $Q$  – число реализаций. Постараемся определить долю, вносимую отдельными технологическими факторами в общую нестабильность процесса.

Метод канонических корреляций дает возможность одновременно анализировать взаимосвязь нескольких выходных параметров и большого числа определяющих факторов. При этом не требуется отсутствия корреляции, как в группе результативных показателей, так и в группе факторных. Алгоритм расчетов метода канонических корреляций строится таким образом, что исходные переменные заменяются их линейными комбинациями, которые являются линейно независимыми. В то же время обеспечивается высокая степень связи между линейными комбинациями факторов и линейными комбинациями выходных параметров. Коэффициенты в канонических переменных характеризуют силу влияния соответствующих признаков-факторов и результативность показателей на уровень связи между ними.

Кратко приведем суть метода. В первую очередь по массиву измеренных значений факторов вычисляется ковариационная матрица, являющаяся характеристикой взаимодействия и его изменения:

$$S = \begin{pmatrix} K_{x_1x_1} & K_{x_1x_2} & \dots & K_{x_1x_m} & K_{x_1y_1} & \dots & K_{x_1y_n} \\ K_{x_2x_1} & K_{x_2x_2} & \dots & K_{x_2x_m} & K_{x_2y_1} & \dots & K_{x_2y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{x_mx_1} & K_{x_mx_2} & \dots & K_{x_mx_m} & K_{x_my_1} & \dots & K_{x_my_n} \\ K_{y_1x_1} & K_{y_1x_2} & \dots & K_{y_1x_m} & K_{y_1y_1} & \dots & K_{y_1y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{y_nx_1} & K_{y_nx_2} & \dots & K_{y_nx_m} & K_{y_ny_1} & \dots & K_{y_ny_n} \end{pmatrix}$$

где  $K_{x_i x_j} = M((x_i - \bar{x}_i) \cdot (x_j - \bar{x}_j))$  – ковариация указанных переменных.

Затем матрицу  $S$  представляют в виде блочной матрицы, объединяя в отдельные блоки характеристики вариаций факторных признаков, результативных показателей и их парных комбинаций. Фактически делим матрицу  $S$  на четыре части:

$$\begin{array}{c|c} S_{11} & S_{12} \\ \hline S_{21} & S_{22} \end{array}$$

где  $S_{11}$  – ковариационная матрица факторов  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , размерность матрицы  $(m \times m)$ ;  $S_{22}$  – ковариационная матрица показателей  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , размерность матрицы  $(n \times n)$ ;  $S_{12}$  – ковариационная матрица, содержащая ковариации  $K_{x_i y_j}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , размерность матрицы  $(m \times n)$ .

$S_{21}$  представляет собой результат транспонирования матрицы  $S_{12}$ .

Канонические коэффициенты корреляции можно рассчитывать и исходя из выборочной корреляционной матрицы, особенно если приходится работать с данными несравнимых единиц измерений.

$$\begin{array}{c|c} R_{11} & R_{12} \\ \hline R_{21} & R_{22} \end{array}$$

Задача определения максимальной корреляции между каноническими переменными  $U = U_1x_1 + U_2x_2 + \dots + U_mx_m$  и  $V = V_1y_1 + V_2y_2 + \dots + V_ny_n$  сведена к задаче определения собственных значений матриц  $R_{11}^{-1}R_{12}R_{22}^{-1}R_{12}^T$  и  $R_{22}^{-1}R_{12}^TR_{11}^{-1}R_{12}$  и их собственных векторов. Учитывая, что размерность указанных матриц получим  $n$  собственных чисел  $\lambda_1^2 \geq \lambda_2^2 \geq \dots \geq \lambda_n^2$ ,  $m$  собственных векторов  $U$  и  $n$  собственных векторов  $V$ .

**Основная часть.** Для анализа влияния способа нанесения красочного состава, его

реологических свойств и пористости подложки на качество поверхности покрытий нами был проделан следующий эксперимент.

Красочные составы с различными реологическими характеристиками наносились на растворную подложку пористостью 24%, 28%, 32% в два слоя с промежуточной сушкой в течение 20 минут. Перед нанесением красочных составов поверхность подложки загрунтовывалась. Кроме того, часть растворных образцов выравнивалась шпаклевочными составами. Реологические свойства красок оценивали по показателю их условной динамической вязкости и поверхностному натяжению. В качества красочных составов применяли эмаль алкидную марки ПФ-115, масляную краску марки МА-15, акриловую вододисперсионную (фасадную) краску. Красочные составы наносились пневматическим способом, кистью. Качество поверхности покрытий оценивалось по показателю шероховатости и прочности сцепления покрытий. Шероховатость поверхности покрытия определяли с помощью прибора профилографа марки TR-100, прочность сцепления – методом отрыва шайб.

Анализ данных, приведенных в табл.1, свидетельствует, что значение шероховатости поверхности покрытия зависит от способа нанесения красочного состава, его реологических свойств и пористости цементной подложки. Так, для масляной краски МА15 (цвет зеленый) минимальное значение шероховатости, равное  $R_a=3,12\text{мкм}$ , достигается на подложке с пористостью  $\Pi=24\%$  при вязкости краски  $0,00261 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью. Для краски ПФ-115 минимальное значение шероховатости, равное  $R_a=1,3\text{мкм}$ , достигается на подложке с пористостью  $\Pi=28\%$  при вязкости краски  $0,00065 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью. Для вододисперсионной краски минимальное значение шероховатости, равное  $R_a=3,5\text{мкм}$ , достигается на подложке с пористостью  $\Pi=32\%$  при вязкости краски  $0,013 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью, а максимальное значение шероховатости, равное  $R_a=6,5\text{мкм}$ , достигается на подложке с

пористостью  $P=24\%$  при вязкости краски  $0,0347 \cdot 10^3$  Па·с при нанесении ее кистью. Минимальное значение шероховатости характерны для поверхности покрытий, формируемых на зашпатлеванной подложке

независимо от способа нанесения и реологических свойств красочных составов.

Ниже приведен пример этапов работы по обработке исходной информации.

Таблица 1

**Шероховатость поверхности покрытий**

Вид краски	Пористость подложки, %	Шероховатость, $R_a$ , мкм			
		Способ нанесения			
		Кисть		Пневматическое	
		$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_1$	$\eta_2$
ПФ-115	24	3,14	3,26	6,7	4,7
	28	1,78	1,3	7,65	7,47
	32	4,34	2,57	6,98	5,31
	$0_{\text{вкл}}$ (шпак. подл.)	1,28	1,8	2,6	1,18
МА-15	24	3,12	7,4	4,37	5,27
	28	4,3	6,27	4,53	9,07
	32	5,65	3,76	5,4	6,42
	$0_{\text{вкл}}$ (шпак. подл.)	1,79	2,54	2,8	3,2
Вододисперсионная	24	6,5	4,7	-	-
	28	4,8	3,3	-	-
	32	3,5	3,7	-	-
	$0_{\text{вкл}}$ (шпак. подл.)	2,57	3,08	-	-

Примечание: для краски ПФ-115  $\eta_1=0,001 \cdot 10^3$  Па·с,  $\eta_2=0,00065 \cdot 10^3$  Па·с.; для краски МА-115  $\eta_1=0,0026 \cdot 10^3$  Па·с,  $\eta_2=0,0021 \cdot 10^3$  Па·с.; для вододисперсионной краски  $\eta_1=0,0347 \cdot 10^3$  Па·с,  $\eta_2=0,02317 \cdot 10^3$  Па·с,

Таблица 2

**Качество покрытий на основе краски МА-15**

Вид краски	Пористость подложки, %, $x_1$	Вязкость краски $\eta \cdot 10^3$ , Па·с, $x_2$	Шероховатость покрытия, мкм, $y_1$	Прочность сцепления, МПа, $y_2$
МА-15 кисть	24	0,0026	3,12	1,4
	24	0,0021	7,4	1,1
	28	0,0026	4,3	1,2
	28	0,0021	6,27	0,7
	32	0,0026	5,65	0,6
	32	0,0021	3,76	0,9
	0	0,0026	1,79	1,8
	0	0,0021	2,54	1,7

**1 этап Вычисление ковариационной или корреляционной матрицы.**

Поскольку дисперсии факторных переменных существенно отличаются одна от

другой и имеются разнородные единицы измерения, разумно использовать корреляционную матрицу (табл.3).

Таблица 3

**Корреляционная матрица**

	Пористость $x_1$	Вязкость $x_2$	Шероховатость $y_1$	Прочность сцепления $y_2$
Пористость $x_1$	1	0	0,6532	-0,8831
Вязкость $x_2$	0	1	-0,3518	0,1822
Шероховатость $y_1$	0,6532	-0,3519	1	-0,7619
Прочность сцепления $y_2$	-0,8831	0,1822	-0,7619	1

Таким образом, далее работаем с матрицей

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0,6532 & -0,8831 \\ 0 & 1 & -0,3518 & 0,1822 \\ 0,6532 & -0,3518 & 1 & -0,7619 \\ -0,8831 & 0,1822 & -0,7619 & 1 \end{pmatrix}$$

**2 этап Разбиение матрицы R на блоки.**

Корреляционная матрица факторных переменных  $x_1$  и  $x_2$ :  $R_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ .

Корреляционная матрица показателей качества  $y_1$  и  $y_2$ :  $R_{22} = \begin{pmatrix} 1 & -0,7619 \\ -0,7619 & 1 \end{pmatrix}$ .

Корреляционная матрица  $R_{12} = \begin{pmatrix} 0,6532 & -0,8831 \\ -0,3518 & 0,1822 \end{pmatrix}$  содержит парные

коэффициенты связи переменных  $x_1, x_2, y_1, y_2$ .

При этом  $R_{21} = R_{12}^T$ .

**3 этап Построение и расчет собственных значений вспомогательной матрицы.**

Вспомогательная матрица имеет вид:

$C = R_{11}^{-1} R_{12} R_{22}^{-1} R_{12}^T = \begin{pmatrix} 0,7808 & -0,1510 \\ -0,1510 & 0,1413 \end{pmatrix}$ . Решение

уравнения  $|C - \lambda^2 E| = 0$  дает следующие

результаты по собственным значениям матрицы

C:  $\lambda_1^2 = 0,815$ ,  $\lambda_2^2 = 0,107$ . Соответствующие собственные вектора:

$\lambda_1^2 = 0,815$	$\vec{\theta}_1 = (0,976; -0,219)$
$\lambda_2^2 = 0,107$	$\vec{\theta}_2 = (0,219; 0,976)$

**4 этап Расчет коэффициентов канонических корреляций факторных признаков**

Максимальное собственное значение  $\lambda_1 = 0,903$ , что свидетельствует об очень тесной связи рассмотренных факторов и показателей качества.

Получаем каноническую комбинацию технологических факторов:  $0,976x_1 - 0,219x_2$ . Таким образом, вклад первой факторной переменной в общую нестабильность показателей качества более, чем в 4 раза превышает вклад второго фактора.

При изменении способа нанесения краски на пневматический, каноническая комбинация для покрытий на основе краски МА-15 следующая:  $0,999x_1 + 0,054x_2$ , при  $\lambda_1 = 0,766$ .

**Выводы.** Изучая главные канонические корреляции по покрытиям на основе краски МА-15 при различных способах ее нанесения, можно заметить, что в обеих линейных комбинациях сохраняется наибольший коэффициент при  $x_1$  (пористость подложки). Из этого можно сделать вывод, что именно пористость подложки является в рассматриваемом контексте решающим фактором, определяющим качество лакокрасочного покрытия. Вязкость краски

(фактор  $x_2$ ) при нанесении ее пневматическим способом влияет на показатели качества на порядок слабее, по сравнению с кистевым нанесением. Аналогичные выводы можно сделать и по другим исследуемым краскам (табл.4).

Таблица 4

**Канонические корреляции**

ПФ-115 кисть	$0,993x_1 - 0,115x_2$	$\lambda_1 = 0,678$
ПФ-115 пневматический	$0,932x_1 - 0,363x_2$	$\lambda_1 = 0,921$
ВД кисть	$0,995x_1 + 0,1x_2$	$\lambda_1 = 0,89$

Следует добавить, что методы многомерного анализа при любом наборе факторов необходимо рассматривать как более сложную ступень анализа. Отличительным признаком ее является не только классификация факторов на главные и второстепенные, но вращение факторов по спирали, отслеживание их влияния друг на друга и на результивные показатели многократно, с целью оценить различные тенденции в их взаимодействии. Изучение динамики факторных характеристик нестабильности результата может быть важной составляющей обнаружения и устранения причин получения некачественного покрытия.

\*Работы выполнены по заданию Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Логанина В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочного покрытия в зависимости от качества его внешнего вида / В.И. Логанина, И.В. Волков, В.В. Голубев // Известия вузов. Строительство. 2008. №7. С.26-30
2. Логанина В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // Лакокрасочные материалы. 2004. №8. С.10-14
3. Логанина В.И. Управление качеством лакокрасочных покрытий строительных изделий и конструкций: монография, Пенза, ПГУАС, 2011. 251 с.
4. Кузнецов Л.А. Анализ состояния качества и технологии // Методы менеджмента качества. 2009. №8. С. 42-44.
5. Симчера В.М. Методы многомерного анализа статистических данных. М. Финансы и статистика, 2008.
6. Сошникова Л.А., Тамашевич В. Н., Уебе Г., Шефер М. Многомерный статистический анализ в экономике / под редакцией В.Н. Тамашевича, М. Юнити, 1999.