



УДК 621.396.6-001.4

**<sup>1</sup>А. А. Ковель, <sup>2</sup>С. Е. Тиняков**

*<sup>1</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
г. Железногорск, Красноярский край, Россия*

*<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

*Предложен эффективный метод прогнозирования и экспериментального подтверждения долговечности керамических изделий с использованием результатов математического планирования эксперимента, полученных на этапе отработки технологии изготовления керамических изделий.*

*Ключевые слова: керамические изделия, математическое планирование эксперимента, запасы работоспособности, долговечность, толерантные пределы.*

**<sup>1</sup>A. A. Kovel, <sup>2</sup>S. E. Tinyakov**

*<sup>1</sup>Siberian Institute of Fire Safety Service of EMERCOM of Russia,  
Zheleznogorsk, Russia*

*<sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

## THE MODELING OF DEGRADATION PROCESSES OF CERAMIC PRODUCTS IN OPERATING CONDITIONS

*An efficient method of prediction and experimental validation of the durability of ceramic products by using the results of mathematical design of the experiment, obtained at the stage of fine-tuning technologies for ceramic products manufacturing.*

*Key words: pottery, mathematical design of experiment, inventory efficiency, durability, tolerance limits.*

Керамические изделия – широкий спектр материалов, полуфабрикатов и законченных изделий, находящихся свое незаменимое место в высоких технологических сферах (обшивки многоразовых космических челноков) до элементов земных зданий и сооружений, где верно служат веками. Отдельную нишу занимают так называемые функциональные керамики, без которых немыслима современная электронная элементная база, где керамики определяют уровень упомянутой техники. Можно также

упомянуть керамику для медицины и других сфер человеческой жизнедеятельности.

Таким образом, изготовление керамических изделий (КИ), технология этого процесса имеют многовековую историю. Но динамика технологических усовершенствований не только не замедлилась, но в век информационных технологий приобрела ряд новых направлений.

Одно из этих направлений успешно использует возможности математического планирования, эксперимента (МПЭ) [1–3], что будет показано также на примере прогнозиро-

вания долговечности образцов строительной керамики.

За время прикладного использования методов МПЭ для решения научных, инженерных и технологических задач накоплены значительный опыт и конкретные результаты [4–6 и др.] При этом движение прикладников шло как по традиционным путям, определенным принципами МПЭ, так и нетрадиционным, которые диктовали и вызывали потребности инженерной практики [7–9 и др.]

Для многих задач достаточно получить по результатам МПЭ регрессионную модель, связывающую некоторый параметр  $\Pi$  объекта исследования (ОИ) с управляемыми воздействиями (факторами):

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ои}} &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n; b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) = \\ &= \Pi_{\text{ои}} \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x} \Delta x \right), \end{aligned}$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n = \{x_i\}$  – совокупность воздействий (факторов), каждый из которых влияет на исследуемый  $\Pi_{\text{ои}}$ ;  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n = \{b_i\}$  – параметры модели регрессионного анализа, коэффициенты влияния, отражающие вклад каждого  $x_i$  соответственно в  $\Pi_{\text{ои}}$ .

Для решения ряда задач после получения зависимости  $\Pi_{\text{ои}} = \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x} \Delta x \right)$  и выбора совокупности факторов, обеспечивающих уровни  $\Pi_{\text{ои}}$ , удовлетворяющие экспериментатора по его критериям, необходимо представить, например, некоторый прогноз поведения  $\Pi_{\text{ои}}$  при длительной эксплуатации ОИ.

Пример решения такой задачи – прогнозирование срока службы керамических изделий, т.е. оценка временной продолжительности работы ОИ от начала эксплуатации до наступления отказовых явлений КИ (кирпича), широко используемого изделия, являющегося неизменным элементом при возведении зданий и сооружений.

Экспериментальное подтверждение долговечности КИ – серьезная проблема, поскольку для проверки в реальном масштабе времени (годы, десятилетия) такие исследования практически не реализуемы, а известные ускоренные методы [7–9] не дают достоверных результатов. Решение усложняет то обстоятельство, что износные (деградационные) явления зависят от воздействия на здания и сооружения климатических, механических и других факторов, что значительно расширяет спектр возможных специфических

нюансов, которые необходимо учитывать при моделировании условий эксплуатации.

Был выбран путь, исходной базой которого явились результаты многофакторного планируемого эксперимента, проводимого на этапе отработки режимов изготовления и формирования технологического процесса изготовления КИ.

Обобщенно этот этап может быть представлен следующим образом. Первое – определение набора факторов, которые свелись к двум видам сырья  $x_1, x_2$ , температуре и продолжительности обжига  $x_3, x_4$ . Предполагалось наличие внутренних неуправляемых факторов (% добавок и влаги в подготовленном тесте). Указанные факторы определили матрицу планирования (МП), ориентированную на полученные на первом этапе линейные зависимости по всем факторам (МП – табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования

№ ОИ	$x_1/x_2$	$x_3$	$x_4$	Результаты $\Pi_{\text{ои}}$
1	+	+	+	$\Pi_1$
2	–	+	+	$\Pi_2$
3	+	–	+	$\Pi_3$
4	–	–	+	$\Pi_4$
5	+	+	–	$\Pi_5$
6	–	+	–	$\Pi_6$
7	+	–	–	$\Pi_7$
8	–	–	–	$\Pi_8$

Факторы  $x_i$  варьировались на двух уровнях (минимальный – «–», максимальный – «+»); один из видов сырья был принят за нижний уровень – «–», другой – верхний – «+»).

МП явилась исходной информационной базой для подготовки технологического процесса, определения технологического оборудования, режимов и условий испытаний при реализации МПЭ. Результаты МПЭ отражались в последнем столбце МП ( $\Pi_{\text{ои}}$  – предел прочности КИ на сжатие).

На рис. 1 представлены факторограммы, которые иллюстрируют результаты опытов: по оси абсцисс отложены номера опытов  $N_i$  согласно МП, по оси ординат – значения  $\Pi_{\text{ои}}$ , полученные в соответствующих опытах.

Результаты отмечены на соответствующих осях точками, которые для наглядности

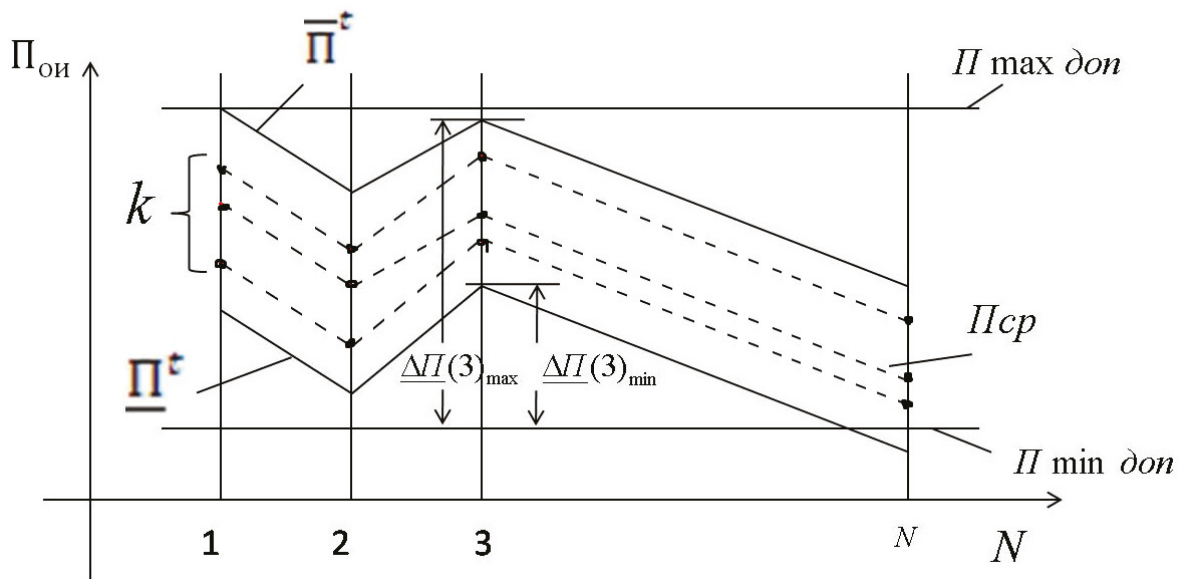


Рис. 1. Совокупность факторограмм (коридор откликов)

соединены прямыми. Ломаные кривые, соответствующие одной серии опытов, – факторограммы; совокупность  $K$  факторограмм образует коридор откликов.

Одну факторограмму дают испытания образцов КИ из одного сырья с одинаковыми процентами влаги и добавок, а изменение сырья и случайные изменения внутренних факторов смещают факторограммы ( $K$  факторограмм), однако все факторограммы в пределах коридора откликов демонстрируют общую для всех результатов тенденцию (изменение  $\Pi_{он}$  при переходе от опыта к опыту).

Такой подход – отступление от «классического» МПЭ, оперирующего с одним ОИ, что связано с необходимостью формирования стратегии изготовления массовой продукции, какой являются КИ.

Учитывая ограниченное количество исследуемых образцов (малая выборка), которые не могут отразить тенденции при массовом изготовлении, необходимо оценить возможные границы разбросов  $\Pi_{он}$  при массовом производстве КИ, например, толерантные пределы  $\Pi_N^t$  возможных результатов в каждом опыте [10]:

$$\Pi_N^t = \Pi_{ср} \pm k^t S(N),$$

где  $\Pi_N^t$  – толерантные пределы ( $\underline{\Pi}_N^t$  – нижний,  $\overline{\Pi}_N^t$  – верхний), в каждом опыте (1, 2, 3, ...,  $N$ ) – рис. 1;

$\Pi_{ср}$  – среднее значение  $\Pi_{он}$  в каждом опыте;

$k^t$  – толерантный коэффициент (табулированный [10]);

$S(N)$  – оценка среднеквадратичного отклонения  $\Pi_{он}$  в каждом опыте:

$$S(N) = \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Pi_N - \Pi_{ср})^2}{k-1}},$$

где  $k$  – количество испытанных образцов.

Если на полученные результаты нанести допустимые пределы (рис. 1) для исследуемого  $\Pi_{он}$  (в нашем случае предел прочности на сжатие), то разность между толерантными пределами  $\underline{\Pi}^t$ ,  $\overline{\Pi}^t$  и нижним ограничителем  $\Pi_{мин доп}$  определяет запасы работоспособности  $\Delta \Pi$  КИ по отношению к указанному пределу (ограничению) в каждом опыте:

$\Delta \underline{\Pi} = \underline{\Pi}^t - \Pi_{мин доп}$  – по отношению к нижнему ограничению,

$\Delta \overline{\Pi} = \Pi_{макс доп} - \overline{\Pi}^t$  – по отношению к верхнему ограничению (рис. 1)

При исследовании долговечности КИ, естественно, определяющими являются первые запасы  $\Delta \underline{\Pi}$ .

Полученные результаты, в частности, могут быть использованы при выборе того технологического процесса изготовления КИ (в зависимости от спроса, наличных ресурсов и т.д.), который, обеспечивая необходимый  $\Pi_{он}$ , одновременно обладал бы необходимым запасом работоспособности. Так, если выбраны режимы и условия изготовления КИ, определенные, например, опытом 3 (температура

и продолжительность обжига, сырье, процент примесей), то при этом будет обеспечен минимальный запас работоспособности  $\Delta\Pi(3)_{\min}$  (рис. 1). Естественно, если в оценочный процесс ввести вероятностные показатели, то запасы работоспособности могут отсчитываться от среднего значения  $\Pi_{\text{он}}$  в каждом опыте. В принципы моделирования износных процессов это не вносит принципиальных изменений.

Так как оценен минимальный запас работоспособности  $-\Delta\Pi(3)_{\min}$  – и известно время, в течение которого изготовитель гарантирует сохранение  $\Pi_{\text{он}}$  не ниже  $\Pi_{\text{миндоп}}(t_T)$ , возможно получить минимально допустимую скорость  $V_{\min}$  расходования указанного запаса:

$$V_{\min} = \frac{-\Delta\Pi(3)_{\min}}{t_T}.$$

Введение понятия запаса работоспособности позволяет количественно оценить наличие превышения прочности на сжатие относительно минимально допустимого уровня. Если такого запаса нет, то образцы КИ соответствующей марки, обладающие прочностью на нижней границе коридора откликов (рис. 1), могут разрушаться уже в процессе строительства.

Образцы, обладающие запасами работоспособности, снижают (расходуют) их из-за развития внутренних дефектов, прогрессирующих во времени.

Физическое моделирование расхода запасов зависит от физической модели развития дефектов, определяющей технологию моделирования влияния реальных эксплуатационных условий.

Была принята следующая физическая модель развития внутренних дефектов. Одна из преобладающих причин – пористость КИ. Увеличение размеров пор, возникновение микротрещин, объединяющих мелкие поры в полости (пустоты) значительных размеров, – все это снижает прочность КИ.

Пористость КИ обуславливает влагопоглощение последних. Влага, заполняющая поры, при снижении температуры до уровня заморзания воды расширяется и приводит к возникновению внутренних усилий, вызывающих образование микротрещин, соединяющих и объединяющих соседние поры. После повышения температуры и размораживания воды в порах увеличенный объем не может быть заполнен прежним количеством

влаги, что приводит к снижению давления и привлечению в новые объемы пор дополнительной влаги. Указанные процессы обладают цикличностью в период весенне-осенних переходных периодов, когда температурные условия нестабильные и знакопеременные (ночные заморозки сменяются дневной положительной температурой). При этом количество циклов различно для каждого региона обширной Российской Федерации. Летние и зимние условия с учетом выбранной модели являются константными и практически не вносят вклад в развитие внутренних дефектов. Кроме того, развитию внутренних дефектов и снижению прочности КИ способствуют сопутствующие механические воздействия, возникающие от близости железных дорог, строек (забивание свай) и других производственных условий.

С учетом принятой физической модели развития и накопления внутренних дефектов ускорение выявления расходования потенциальных прочностных запасов при моделировании условий эксплуатации возможно за счет создания температурного циклирования с одновременным механическим воздействием и исключения временных промежутков между циклированием, обладающих относительно стабильными температурными режимами (зима, лето), а также сведения до технологического минимума длительности переходных температурных режимов (повышение, понижение), которые в реальных условиях достигают 6–8 часов.

Оценка годовых эквивалентных температурных циклов при эксплуатации была принята равной 25–30. После 250–300 циклов с последующим действием вибрациями (совместить термоциклы и вибрацию не позволило оборудование) из партии испытываемых КИ извлекались образцы, на которых проверялось снижение прочности  $\Pi_{\text{он}}$  за счет износных процессов. С оставшимися КИ продолжали моделирующие процедуры (циклы), каждый раз определяя уменьшение запасов работоспособности и оценивая скорость расходования последних.

Так как все повторные циклы эквивалентны годовым (предположительно) срокам реальной эксплуатации, полученные результаты позволяют:

- оценить и уточнить (при необходимости) принятую модель равномерного расходования запасов;

- располагая результатами и установив тенденцию снижения прочности КИ от группы к группе по мере увеличения количества циклов, экстраполировать тенденцию до момента достижения  $P_{oi}$  КИ допустимого уровня  $P_{mindop}$  и при необходимости принимать решение о продолжении или прекращении испытаний;
- оценивать реальные скорости снижения прочности по мере увеличения циклов, сравнивать расчетную  $V_{min}$  и фактическую  $V_{\phi}$  скорости расходования запасов и еще до окончания испытаний судить о качестве испытываемых КИ.

Рассмотренная методика – одна из возможных по моделированию расходования запасов прочности в эксплуатационных условиях. Она позволяет уточнить в процессе испытаний исходную физическую модель и принципы моделирования, так, результаты циклирования с воспроизведением механических воздействий могут подтвердить линейную модель расходования запасов ( $V = const$ ) на всем промежутке моделирования или, начиная с некоторого момента наработки, уточнить ее введением нелинейных эффектов. Существенно и то, что при воспроизведении различных эксплуатационных условий (например, климата Краснодарского края и Крайнего Севера) будут, естественно, получены разные результаты для однотипных КИ.

На всех этапах отработки технологии (МПЭ), расчетных работ, оценки запасов работоспособности и др. широко используются возможности современной вычислительной техники. Кроме традиционных для МПЭ расчетов это также визуализация полученных результатов (построение факторограмм, коридора откликов, толерантных пределов, оценки запасов по всем опытам и др.). Накопление данных по мере изготовления КИ (повторные испытания) позволяет уточнять  $S(N)$  отдельных опытов и толерантные границы в этих опытах и «параллельно», в силу выявленных

закономерностей, переносить их на другие опыты, тем самым уточняя запасы работоспособности. И этот процесс непрерывно сопровождается изготовлением КИ, все виды испытаний, выявление запасов и моделирования их расходования, являясь тем самым примером выстраивания информационных технологий создания КИ.

### Библиографические ссылки

1. Синдяев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализа статистических данных. М. : Юрайт, 2011. 399 с.
2. Голубцова Е. С., Каледин Б. А. Статистические методы исследования конструкционной керамики. Минск : УП и «Технопринт», 2004. 259 с.
3. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М. : Мир, 1988. 520 с.
4. Иботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электромеханике. М. : Энергия, 1975. 184 с.
5. Михайлов В. И., Федосов К. М. Планирование экспериментов в судостроении. Л. : Судостроение, 1978. 198 с.
6. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. Киев : Техника, 1984. 200 с.
7. А.с. 901887. Способ определения долговечности конструкционного материала / Никольский С. Г., Терентьев В. П. Опубликовано 30.01.1982, Бюл. № 4.
8. Патент RU 2359244. Способ определения долговечности изделия из хрупкого материала / Никольская Т. С., Никольский С. Г. Опубликовано 20.06.2009, Бюл. № 17.
9. Патент RU 2526299. Способ определения долговечности керамических изделий / Ковель А. А., Тиняков С. Е., Андреев В. О., Качан А. С. Опубликовано 20.08.2014, Бюл. № 23. 8 с.
10. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. М. : Финансы и статистика, 1982. 278 с.

*Статья поступила в редакцию  
30.04.2015 г.*