

УДК 691:620.1

Экспериментальная отработка керамических изделий как залог исключения ЧС

Experimental exercise of ceramic products as a pledge for exclusion of emergencies

*А.А. Ковель¹,
д-р техн. наук, профессор,*

*С.В. Бабенышев¹,
канд. физ.-мат. наук,*

*С.Е. Тиняков²,
канд. техн. наук,*

Е.С. Тиняков²

¹ФГБОУ ВО Сибирская
пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России,
²ООО «Агро – промышленная
компания «ПаК»
г. Железногорск, Россия

*A.A. Kovel¹,
Holder of an Advanced
Doctorate in Engineering
Sciences,*

Full Professor,

*S.V. Babenyshev¹,
Ph.D. of Physico-mathematical
Sciences,*

*S.E. Tinyakov²,
Ph.D. of Engineering Sciences,
E.S. Tinyakov²*

¹FSBEE HE Siberian Fire and
Rescue Academy EMERCOM of
Russia,
²Ltd. «Agro – industrial company
«PaK» Zheleznogorsk, Russia

Аннотация:

В статье изложена методология проверки тех свойств строительных керамических элементов, которые непосредственно влияют на прочность и долговечность сооружений, и деградация которых может привести к чрезвычайным ситуациям. Указанный подход, опираясь на математическую теорию планирования эксперимента, дает эффективную, статистически обоснованную оценку остаточной прочности керамических изделий с учетом влияния внешних и технологических факторов. Методы, изложенные в статье относительно оценки биологической стойкости керамических изделий, защищены российскими и евразийскими патентами.

Ключевые слова: испытание строительных материалов, керамические изделия, математическое планирование эксперимента.

Abstract:

The article sets out a methodology for checking those properties of construction ceramic elements that directly affect the strength and durability of structures, and whose degradation can lead to emergencies. The indicated approach, based on the mathematical theory of experimental design, provides an effective, statistically valid estimate of the residual strength of ceramic products while taking into account the influence of environmental and technological factors. The methods described in the article on the assessment of the biological resistance of ceramic products are partially covered by Russian and Eurasian patents.

Key words: testing of building materials, ceramic products, mathematical design of the experiment.

Введение

Разрушения зданий и сооружений, которые имеют место в России, – свидетельство того, что качество строительных материалов далеко от совершенства и проблемы доработки технологии изготовления материалов должны оставаться в поле зрения специалистов.

Керамические блоки, кирпич (керамические изделия – КИ) – базовые элементы строительных конструкций, и, хотя они являются самыми древними и испытанными строительными элементами, должны постоянно совершенствоваться, так как их потенциальные возможности, как самых массовых строительных элементов, генетически транслируются в качество и долговечность конечного продукта – зданий и сооружений.

Часто, стремясь снизить стоимость КИ, получить выгодный за-

каз на поставку изделий, изготовители КИ выводят на рынок товар, не обладающий необходимыми качественными показателями, и потребитель должен понимать, какие требования и критерии предъявлять к качеству продукции, с учетом новых подходов.

Современные методы исследований и оптимизации компонентного состава и технологии изготовления КИ позволяют повысить качество последних при сохранении коммерческой выгоды их применения.

Математическое планирование эксперимента (МПЭ), хорошо проявившее себя в широком спектре научных исследований [1-3], показало большие возможности и при решении инженерных и прикладных задач [4-6].

В статье рассмотрены некоторые методологические аспекты применения математического планирования эксперимента при исследовании прочностных свойств керамических изделий. Например, исследовалась стойкость керамической плитки на истирание (имитация длительной эксплуатации), которое оценивалось по потере образцами массы.

Изменение прочности плиток обуславливалась различными режимами изготовления (температура и продолжительность обжига), а также составом сырья, которое могло поступить из двух разных источников, – всего три фактора. Учитывая количество факторов, необходимость использования серии образцов и трудоемкость анализа, выполняемого обычно в специализированной и сертифицированной лаборатории, для минимизации затрат и получения достоверной картины явления требуется применение математического планирования эксперимента (МПЭ).

Применение МПЭ

В таблице 1 приведена матрица планирования (МП) для реализации МПЭ и результаты экспериментов,

Таблица 1. Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	x_1	x_2	x_3	Результаты P_{oi}
1	-	-	-	9
2	+	-	-	17
3	-	+	-	5
4	+	+	-	19
5	-	-	+	29
6	+	-	+	15
7	-	+	+	25
8	+	+	+	24

где

- x_1 – продолжительность обжига (два уровня, обозначаемых «-» и «+» для нижней и верхней границ диапазона времени);
- x_2 – температура обжига (также два уровня, аналогично обозначаемых «-» и «+»);
- x_3 – сырьё из двух источников (карьеров); уровень «+» – 1-й источник, уровень «-» – 2-й источник;
- P_{oi} – значения параметра объекта исследования.

Для визуализации результатов лабораторных исследований опытных образцов КИ удобно использовать факторограмму (рис. 1), где по оси абсцисс – номера опытов по МП, а по оси ординат – значения параметра объекта исследования, по результатам опытов из МП.

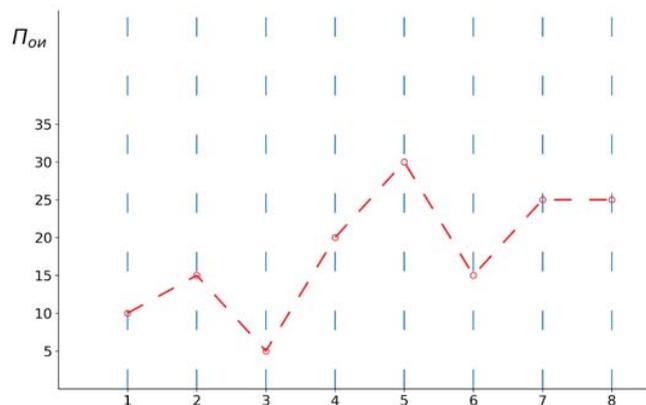


Рис. 1 - Факторограмма результатов МПЭ

Неоднородность сырья, неоднородность внутренней структуры каждого отдельного образца КИ, отличие температурных условий в пространстве печи, погрешности измерений – все это и многие другие факторы случайным образом отражаются на результатах измерений исследуемого показателя. На первом этапе анализа полученных данных желательно установить достоверность эффекта влияния выбранных факторов на исследуемый показатель. Так, например, в опытах 7 и 8, отличающихся только по значению фактора x_1 , значения исследуемого параметра (обычно, это выборочные средние) 25 и 24, соответственно, различаются только на 4% величины, что вполне может быть следствием случайной выборочной вариации. Стандартным методом оценки статистической значимости эффекта влияния множественных факторов является (многофакторный) дисперсионный анализ, известный в англоязычной литературе как ANOVA (ANalysis Of VAriations – анализ вариаций).

При n сериях испытаний, которые в общем случае могут проводиться в различные дни или даже

климатические сезоны, получают n факторограмм. Такие серии испытаний характеризуются тем, что образцы одной серии испытывают влияние общих факторов, которые, тем не менее, не учитываются при построении матрицы планировании эксперимента, например, такие как температура внешней среды или влажность воздуха в день испытаний, отклонение от технологии производства и др. Полученные факторограммы для различных серий формируют коридор откликов (рис. 2).

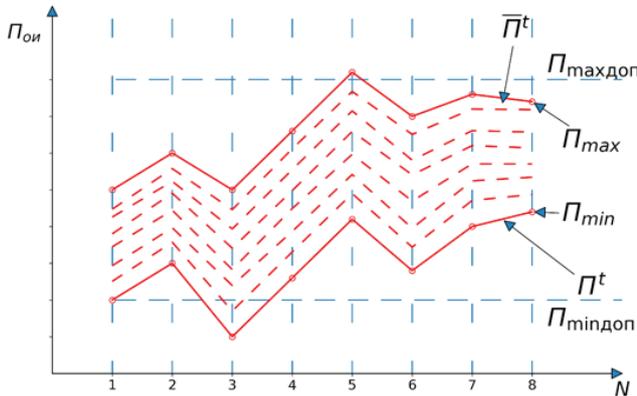


Рис. 2 - Конфигурация коридора откликов. Толерантные пределы

Учитывая отмеченные обстоятельства, используют концепцию коридора откликов, основанного на построении толерантных интервалов [8, 9, 15] по разбросам значений $\Pi_{ои}$ для каждого из 8 опытов. Также, исходя из необходимости малой выборки образцов КИ, вовлекаемых в исследование по алгоритму МПЭ, возникает необходимость переноса полученных результатов на будущую массовую продукцию.

Таким образом, в каждом опыте МП оценивают нижние ($\underline{\Pi}^t$) и верхние ($\overline{\Pi}^t$) допустимые (толерантные) пределы для $\Pi_{ои}$, которые рассчитывают, как

$$\underline{\Pi}^t = \Pi_{cp} - k^t \cdot S(\Pi),$$

$$\overline{\Pi}^t = \Pi_{cp} + k^t \cdot S(\Pi),$$

где

- Π_{cp} – среднее значение n серий испытаний в условиях каждого (1, 2, ..., N) опытов МПЭ:

$$\Pi_{cp} = \frac{\Pi_1 + \dots + \Pi_n}{n}.$$

- $S(\Pi)$ – оценка σ (среднеквадратичного отклонения) $\Pi_{ои}$ в условиях каждого опыта:

$$S(\Pi) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Pi_i - \Pi_{cp})^2}, (i = \overline{1, n});$$

- $k^t = k(n, \rho, \gamma)$ – табулированный толерантный коэффициент, определяемый количеством серий испытаний и выбранными значениями ρ и γ [15], здесь ρ – минимальная доля совокупности, накрываемая толерантным интервалом с заданным уровнем доверия γ .

Относительно необходимого количества серий испытаний может быть использовано следующее выражение из [7], связывающее зависимость минимального объема выборки n с ρ и γ :

$$1 - \rho = n\gamma^{n-1} - (n-1)\gamma^n.$$

Таким образом, исходя из представленной зависимости, при заданных ρ и γ можно определить минимальный объем выборки, обеспечивающий необходимый уровень достоверности рассмотренных допустимых пределов.

Естественно, располагая полученными данными в условиях каждого опыта, для необходимых параметров могут быть восстановлены математические модели (ММ) по традиционной процедуре МПЭ построения линеаризованных регрессионных моделей

$$\Pi(\bar{x}) \approx \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i + b.$$

Учет эффективности производства

Дополнив последний столбец МП, где фиксируются $\Pi_{ои}$, рядом затратных показателей, например, $T_{общ}$ – общее время, необходимое для обеспечения сырьем, подготовки и изготовления; \mathcal{E}_{Σ} – суммарные энергозатраты на изготовление; C_N – стоимость каждого образца, включающая затраты на сырьё и доставку и др. (см табл. 2), – получаем совокупность данных, которые выводят производителя КИ на задачу оптимизации по критериям, существенным для конкретного производства.

Таблица 2. МП с учетом затратных показателей

№ опыта	$\{x_i\}$	$T_{общ}$ время	\mathcal{E}_{Σ} эл. энергия	C_N стоимость
1	-	T_1	\mathcal{E}_1	C_1
2		T_2	\mathcal{E}_2	C_2
3	-	T_3	\mathcal{E}_3	C_3
4	-
5	
6		-
7		-
8		-	T_8	\mathcal{E}_8

Результаты оптимизации позволяют производителю выбрать такой вариант построения производственной линейки, который обеспечит достижение необходимых прочностных параметров КИ при ориентации на определённый сырьевой источник при оптимальных энергозатратах и стоимости единицы продукции.

Исследование методом МПЭ с учетом вскрытых нетрадиционных возможностей позволяет получить ряд показателей, существенных для формирования оптимального технологического процесса изготовления КИ и организации производства, начиная с выбора сырьевых источников, построения транспортной схемы и других важных аспектов конкретного производства.

Моделирование условий эксплуатации

Одной из причин, снижающих прочность строительных конструкций, являются взаимодействия материалов конструкций (КИ) с окружающей средой, способствующей развитию на поверхности и в объеме КИ биологических объектов, продукты жизнедеятельности которых нарушают целостность поверхности и внутреннюю структуру строительных элементов. Микроскопические повреждения накапливаются со временем и снижают прочность строительных конструкций.

Испытание КИ при воздействии реальных биологических факторов – процесс трудно реализуемый. Поэтому идут поиски моделирующих воздействий, результаты которых эквивалентны по своим последствиям реальным биовоздействиям.

Известен способ испытаний строительных материалов на биостойкость, при котором осуществляют моделирование взаимодействия строительных материалов со средой, вызывающей биологические повреждения строительных изделий и конструкций, путем погружения образцов строительных материалов в слабоагрессивную среду, в качестве которой используют смесь органических кислот: уксусной, лимонной и щавелевой, и последующей выдержки образцов в этой среде [10].

Реализация данного способа не требует воспроизведения среды с микроорганизмами, отсутствует необходимость использования специальных установок. Такой способ испытания образцов строительных материалов может быть применен в условиях лаборатории завода-изготовителя без специального разрешения органов санитарно-эпидемиологического надзора и без вреда для здоровья персонала, ввиду отсутствия контакта с патогенными микроорганизмами.

Состояния среды, вызывающей биологические повреждения строительных изделий и конструкций, имитируют, варьируя факторы, моделирующие эту среду: концентрации и соотношения органических кислот, значения температуры, при которых проводят выдержку, по плану полного факторного эксперимента.

Контроль осуществляется, как визуально, так и путем измерения прочности образцов, подверженных воздействию слабоагрессивной среды.

Способ позволяет выбирать ту комбинацию варьируемых факторов, которая больше устраивает производителя строительных материалов, включая важный фактор эксплуатационной среды – температуру, и отражающий специфику биосреды, в которой применяются строительные материалы [11].

При разных составах сырья и добавок возможны изменения продолжительности экспозиции при разных сочетаниях факторов, что определит выбор изготовителем окончательной совокупности воздействий при моделировании процессов биоповреждений. Учитывая, что биостойкость строительных материалов – один из признаков качества, подтверждение должно происходить на этапе изготовления продукции, а выбор моделирующей композиции (совокупность факторов) – на этапе подготовки производства и отработки технологии изготовления строительных материалов.

Результатом испытаний является выбор такого сырьевого состава и добавок, а также технологии изготовления, которые минимизируют восприимчивость КИ к биофакторам среды или полностью исключают её. При этом с учетом большого разнообразия условий РФ для каждого региона специфика состава и технологии будут разными.

Конечной целью выбора сырьевого состава и технологии изготовления КИ является достижение максимального срока «жизни» зданий и сооружений, которые обеспечивают КИ. Так как эти сроки должны быть многие десятилетия и даже столетия, натурные испытания исключены. Поэтому подтверждение долговременной прочности КИ возможно только применением ускоренных методов прогнозирования и моделирования износных (деградационных) процессов КИ.

Обеспечение долговременной прочности, как и других технических показателей продукции длительного применения, содержит две стороны:

- задание продукции необходимых свойств (параметров) и их сохранение (воспроизведение) в течение срока службы;

- подтверждение сохранения заданных параметров в течение длительного срока.

Вторая сторона становится самостоятельной научно-технической проблемой при сроках службы 10 и более лет, тем более, когда указанная длительность составляет 50-100 лет (строительная и другие керамики). Испытания в реальном времени исключены. Необходимы теоретико-экспериментальные методы, обеспечивающие адекватные результаты.

Теоретически рассмотрены возможности ускоренных испытаний [12], однако удовлетворительные прикладные методики отсутствуют.

Поиск способов подтверждения долговечности КИ идут в направлении моделирования процессов развития деградационных процессов в среде керамики с учетом влияния эксплуатационных условий [13, 14].

При реализации одного из способов [4, 5, 13] введено понятие запаса работоспособности (запаса прочности для КИ) как разности между фактической прочностью КИ (например, на сжатие) и минимально допустимой прочностью для данного типа КИ ($\Delta\Pi$). Тогда указанный запас может быть «израсходован» в течение срока службы на деградацию. Располагая величиной запаса работоспособности $\Delta\Pi$ и гарантированным временем эксплуатации (t_r), можно оценить допустимую скорость расходования указанного запаса:

$$V_{\text{доп}} = \frac{\Delta\Pi}{t_r}.$$

Далее необходимо получить фактическую скорость расходования запасов работоспособности на реальных КИ. Протекание деградации (постепенного изменения) внутренней структуры КИ моделируется, исходя из следующей картины реальных процессов.

КИ, обладающие запасами работоспособности, теряют их из-за развития внутренних дефектов, прогрессирующих во времени. Одна из преобладающих причин – пористость КИ. Увеличение размеров пор, возникновение микротрещин, приводящих к объединению пор в полости значительных размеров, снижают прочность КИ.

Пористость КИ обуславливает водопоглощение последних. Влага, заполняющая поры, при снижении температуры до точки замерзания, расширяется и приводит к образованию микротрещин, соединяющих соседние поры. После размораживания увеличивается объем пор, и постоянство объема влаги приводит к снижению давления и всасыванию дополнительной влаги, заполняющей поры.

Указанные циклические процессы характерны для весенне-осеннего переходного времени, когда ночные заморозки сменяются дневной положительной температурой, при этом количество циклов характерно для определенного региона с учетом его климатических условий.

Кроме того, развитию внутренних дефектов, снижающих прочность КИ, содействуют сопутствующие механические нагрузки, возникающие от близости железных дорог, забивания свай и др. производственных условий.

С учетом такой модели накопления дефектов, наличие потенциальных прочностных запасов работоспособности при испытаниях, ускорение возможно за счет исключения промежутков времени между циклическими изменениями температуры (зима-лето), а также сведения до технологического минимума длительности циклов замораживание-размораживание, которые реально равны 8-12 часов.

Учитывая эквивалентность при моделировании 25-30 циклов годовой эксплуатации, после 250-300 циклов от партии испытуемых КИ извлекают образцы, на которых проверяют снижение прочности ($\Pi_{\text{ки}}$) за счет износных процессов. С остальными керамическими изделиями продолжают моделирующие испытания (циклы), каждый раз определяя величины уменьшения расходования запасов работоспособности. Так как все повторные циклы эквивалентны годовым, полученные результаты позволяют определить момент достижения предельно допустимого уровня ($\Pi_{\text{миндоп}}$) и выявить картину накопления внутренних дефектов, снижающих прочность керамических изделий от группы к группе по мере увеличения количества циклов, моделирующих условия реальной эксплуатации, а также сделать оценку фактической скорости (v_{ϕ}) снижения прочности по мере увеличения количества циклов.

Сравнение ее с допустимой ($v_{\phi} < v_{\text{доп}}$, $v_{\phi} > v_{\text{доп}}$) позволяет судить о долговечности керамических изделий. Для окончательного решения должны быть привлечены также результаты $\Delta\Pi_{\text{max}}$ и $\Delta\Pi_{\text{cp}}$, которые, как при любых статистических оценках, позволяют оценить возможные разбросы долговечности испытываемых керамических изделий, от минимальной до максимальной.

Необходимая исходная информационная база для оценки реальных запасов работоспособности – результаты исследований, проводимых на этапе отработки технологии изготовления КИ по методологии математического планирования эксперимента (МПЭ) [8]. Так если в качестве варьируемых факторов при МПЭ взять разновидность сырья, температуру и продолжительность обжига

(пусть КИ – строительный кирпич), то можно исследовать модель линейной регрессии зависимости прочности КИ от трех факторов:

$$\Pi = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3,$$

где $x_1, x_2, x_3 = \{x_i\}$ – совокупность воздействующих факторов, каждый из которых влияет на исследуемый $\Pi_{он}$ (за x_3 здесь можно считать процентное соотношение сырья из первого карьера); $b_1, b_2, b_3 = \{b_i\}$ – параметры регрессионной модели (коэффициенты влияния, отражающие вклад каждого фактора x_i в Π). В случае адекватности полученной регрессионной модели, её можно использовать для построения оптимизационной задачи, например, в простейшем виде:

$$x_1 \cdot c_{эл} \cdot эл(x_2) + c_{сырья1} \cdot x_3 \cdot M + c_{сырья2} \cdot (1 - x_3) \cdot M \rightarrow \min$$

$$x_{min,i} \leq x_i \leq x_{max,i}, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \geq \Pi_{гост},$$

где $c_{эл}$ – цена электричества; $эл(x_2)$ – функция удельных затрат электричества в зависимости от температуры обжига (x_2); $c_{сырьяi}$ – цена единицы сырья из i -го карьера; M – затраты сырья на единицу продукции; $\Pi_{гост}$ – минимальная прочность, требуемая по ГОСТу [9].

Такую задачу с линейными ограничениями и нелинейной целевой функцией в общем случае можно решать численными методами.

Если на полученные результаты (рис. 2) нанести допустимые пределы для исследуемого параметра, например, пределы прочности на сжатие ($\Pi_{миндоп}, \Pi_{маходоп}$) то разность между толерантными пределами ($\underline{\Pi}^t, \overline{\Pi}^t$) и допустимыми пределами определяет запасы работоспособности КИ по отношению к указанному пределу (ограничению) (рис. 3):

$$\Delta \underline{\Pi} = \underline{\Pi}^t - \Pi_{миндоп} \text{ – по отношению к нижнему ограничению, и}$$

$$\Delta \overline{\Pi} = \Pi_{маходоп} - \overline{\Pi}^t \text{ – по отношению к верхнему ограничению.}$$

Принимая во внимание разброс прочностных и других параметров КИ, за разбросы работоспособности тоже могут быть взяты значения $\Delta \underline{\Pi}_{мин}, \Delta \overline{\Pi}_{мак}$, определяемые границами коридора откликов (рис. 3).

Таким образом, результаты МПЭ позволяют выбрать тот технологический процесс изготовления КИ (в зависимости от потребности, наличных ресурсов и т.д.), который, обеспечивая необходимые выходные параметры $\Pi_{ки}$, например, предел прочности на сжатие, может быть использован с учетом реальных условий применения керамических изделий.

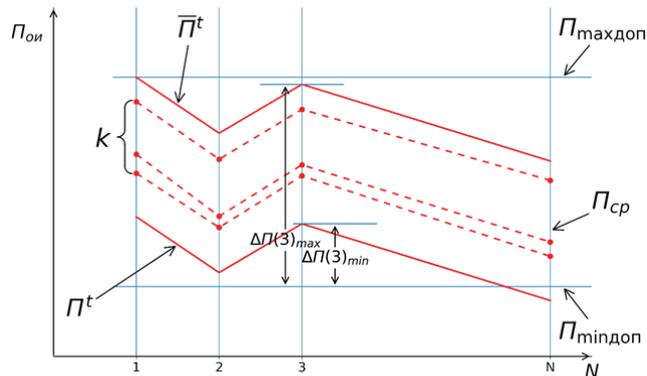


Рис. 3 – Совокупность факторограмм (коридор откликов)

При необходимости иметь нижнюю величину запасов работоспособности (например, $\Delta \Pi(3)_{мин}$), выбирают режимы и условия изготовления, определяемые, например, опытом 3 (температура, продолжительность обжига, процент примесей, сырье и др.). Далее экспериментально моделируют эксплуатационные режимы и условия и определяют, как долго КИ будут сохранять необходимые выходные параметры в допустимых пределах (до $\Pi_{миндоп}$).

Для другой продукции (электронные, электротехнические устройства) расходование запасов может идти в направлении верхнего ограничения, например, токов, напряжений, переходных сопротивлений и др. Но принципы оценки скоростей развития деградационных процессов при этом не изменяются.

Если использовать модели распределения (например, нормальный закон) между $\Delta \underline{\Pi}_{мин}$ - $\Delta \overline{\Pi}_{мак}$ относительно нижнего или верхнего ограничений, можно получить, например, для скорости развития деградационных процессов соответствующие статистико-вероятностные оценки.

Если в процессе моделирования эксплуатационных режимов с некоторого момента не подтверждается линейная модель расходования запасов работоспособности ($v = const$), для дальнейших исследований эта модель может быть уточнена введением учета нелинейных эффектов.

Рассмотренный подход моделирования расходования запасов работоспособности КИ за короткое время позволяет воспроизводить деградационные процессы в лабораторных условиях и переносить их на планируемые к сооружению объекты длительного использования.

Достоинство рассмотренных методов – реализуемость на лабораторном оборудовании и моделях образцов КИ, воспроизводящих пропорционально габаритные характеристики реальных КИ и их компонентный состав. А выработанные рекомендации

по режимам изготовления КИ легко встраиваются в технологию изготовления последних. В то же время результаты испытаний образцов реальных КИ полностью коррелируют с результатами, полученными на модельных образцах.

Результаты испытаний

Количественные показатели по результатам испытаний образцов КИ, изготовленных с учетом результатов моделирования, приведены в таблице. Испытаниям были подвергнуты изделия марки М125, М150, М175, М200. Согласно сертификату соответствия «Госэкспертсервис» испытания проведены в Испытательной лаборатории контроля качества ФГУП «ГУССТ № 9 при Спецстрое России» (г. Железногорск) [6].

Наименование контролируемого показателя по ГОСТ 530-2012	Требуемое значение показателя по НТД	Фактическое значение показателя образца
КЕРАМСИБ М125		
Предел прочности при сжатии, не менее Мпа	Средний показатель 15,0	15,8
	Наименьший показатель 2,5	12,6
Предел прочности при изгибе, не менее Мпа	Средний показатель 2,8	2,83
	Наименьший показатель 1,4	1,5
КЕРАМСИБ М150		
Предел прочности при сжатии, не менее Мпа	Средний показатель 15,0	16,4
	Наименьший показатель 12,5	12,9
Предел прочности при изгибе, не менее Мпа	Средний показатель 2,8	2,86
	Наименьший показатель 1,4	1,52
КЕРАМСИБ М175		
Предел прочности при сжатии, не менее Мпа	Средний показатель 17,5	19,2
	Наименьший показатель 15,0	16,9
Предел прочности при изгибе, не менее Мпа	Средний показатель 3,1	3,4
	Наименьший показатель 1,5	1,53
КЕРАМСИБ М200		
Предел прочности при сжатии, не менее Мпа	Средний показатель 20,0	21,6
	Наименьший показатель 17,5	18,0
Предел прочности при изгибе, не менее Мпа	Средний показатель 3,4	3,7
	Наименьший показатель 1,7	1,9

Заключение

Результаты испытаний показали, что применённые технологические решения позволили улучшить прочностные и теплоизоляционные характеристики КИ, в т.ч.:

- коэффициент теплопроводности: 0,42-0,45 Вт/м*К;
- предел прочности при сжатии: лучше показателей ГОСТ на 0,8 – 1,6 Мпа;
- предел прочности при изгибе: лучше показателей ГОСТ на 0,06–0,55 Мпа;

При этом:

- снижена энергоёмкость производственной линии на 27 %;
- сокращена себестоимость КИ на 0,8 руб. за штуку.

Результаты работы отражены в публикациях, патентах, и других документах [4, 6, 10, 11]. Рассмотренные подходы могут быть использованы изготовителями КИ при совершенствовании технологии изготовления КИ, а также потребителями КИ при анализе полноты испытаний потребляемой продукции.

Литература

1. Синдаев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализа статистических данных. – Москва: Юрайт, 2011. 399 с.
2. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошченко В.И. Планирование эксперимента в технике. – Киев, техника, 1984. 200 с.
3. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – Москва: Статистика, 1978. 245 с.
4. Ковель А.А., Тиняков С.Е. Моделирование расходования запасов работоспособности керамических изделий. Сборник докладов всероссийской конференции. Безопасность и живучесть технических систем. – Красноярск, 2015, т. 1, с. 231-236.
5. Ковель А.А., Тиняков С.Е. Моделирование деградационных процессов керамических изделий в эксплуатационных условиях исследования наукограда. – Железногорск: 2015. С. 32-34.
6. Протоколы лабораторного контроля качества. ФГП, Железногорск, 2018. 10 с.
7. Попов В.Н. Нормы и допуски на параметры функциональных узлов. – Москва: Энергия, 1976, 97 с.

8. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский. Курс теории вероятности и математической статистики. – М.: Наука, 1969. 512 с.
9. ГОСТ 530-2012. Кирпич и камень керамические. Общетеchnические условия. – Москва: Стандартинформ, 2013. 27 с.
10. Патент RU2471188 Способ испытания строительных материалов на биостойкость. Куколева Д.А. Стротаков В.Ф. Биол. № 36, 27.12.2012. 6 с.
11. Патент RU4609863 Способ моделирования взаимодействия строительных материалов со средой, вызывающей биологические повреждения. Ковель А.А., Тиняков С.Е. Биол. №4 06.02.2017. 7 с.
12. Евразийский патент 022402. Способ моделирования взаимодействия строительных материалов со средой, вызывающей биологические повреждения. Ковель А.А., Тиняков С.Е., Биол. №3, 30.03.2018. 6 с.
13. Пешес Л.Я., Степанова М.Д. Основы теоретически ускоренных результатов испытаний. Минск: Наука и техника, 1992. 168 с.
14. Патент RU2526299 Способ определения долговечности керамических изделий. Ковель А.А., Тиняков С.Е. и др. Биол. №23, 20.08.14. 8 с.
15. ГОСТ Р 50779.29 – 2017 Статистические методы. Статистические представления данных. Часть 6. Определение статистических толерантных интервалов. – Москва: Стандартинформ, 2017. 44 с.