

ков. – Ижевск, 2006. – 24 с. : ил. – Библиогр. : 5 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 23.03.2006 № 303-В2006.

4. Печенкин, А. Ю. Способы повышения скорости сходимости генетического алгоритма синтеза топологии РС-элементов с распределенными параметрами по заданным частотным характеристикам / А. Ю. Печенкин, П. А. Ушаков // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : тр. III науч.-техн. конф. (Ижевск, 14-15 апреля, 2006 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – С. 81–85.

УДК 666.3-13

Ф. А. Уразбахтин, доктор технических наук, профессор;  
Ф. Ф. Шайхразиев, ст. преподаватель;  
А. Р. Хабиров, соискатель

Ижевский государственный технический университет (Воткинский филиал)

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА ОБЫКНОВЕННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА (КАМНЯ)

*Предложена математическая модель качества керамического кирпича, основанная на количественной оценке предельных состояний. Предельное состояние считается наступившим, если нарушается хотя бы одно требование стандарта ГОСТ 530–95. Представлены числовые расчеты, проведенные на ЭВМ с помощью данной модели.*

Большая часть зданий в нашей стране возводится из керамических кирпичей и камней. Это связано, во-первых, с выполнением ручной кладки стен без использования мощного грузоподъемного оборудования; во-вторых, кирпичи и камни с малыми габаритами дают большие возможности выбора эффективного архитектурного решения здания; наконец, в-третьих, мелкоштучные камни и кирпичи делают фактуру поверхности стен зданий более выразительной и масштабной [1]. В этих условиях керамические кирпичи и камни как стеновые строительные материалы должны соответствовать ряду требований. Для строящихся зданий эти требования столь важны, что оформлены в государственном стандарте [2] в виде ограничений и требований на ряд характеристик.

В данной работе, в отличие от работы [4], предложена математическая модель, позволяющая количественно оценить качество керамического кирпича или камня по всем требованиям, представленным в стандарте. Такая модель особенно необходима при производстве кирпича и состоит из набора оценок, каждая из которых определяет степень выполнения требования или ограничения ГОСТ 530–95 [3].

Все требования и ограничения разделены на четыре группы качества по внешнему виду, сопротивляемости наличию известковых включений, прочности и теплотехническим свойствам. Все эти свойства керамического кирпича (камня) количественно оцениваются отдельным показателем  $Y_i$ . Предполагая равнозначными все требования и ограничения, представленные в ГОСТ 530–95, совместно эти показатели дают общую оценку качества керамического кирпича или камня:

$$Y = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Y_i . \quad (1)$$

При определении значений показателей  $Y_i$  были приняты следующие допущения.

1. Качество керамического кирпича или камня определяется степенью выполнения требований и ограничений стандарта ГОСТ 530–95. Качество считается приемлемым, если все требования и ограничения стандарта выполнены.

2. В группе находятся показатели  $\bar{y}_{i,j}$ , каждый из которых оценивает степень выполнения отдельного требования или государственного стандарта. В этом случае показатель качества всей группы определяется выражением

$$Y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{y}_{i,j}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество показателей в группе.

3. Показатели  $\bar{y}_{i,j}$  в математической модели являются равнозначными по степени важности и зависят от действительных значений параметра или характеристики и представленного в стандарте.

4. Показатели  $\bar{y}_{i,j}$  являются безразмерными. В математической модели они нормированы так, что наилучшее значение показателя равно 1,2, а наихудшее находится в интервале 0,5...0,8. При выполнении требований стандарта показатель  $\bar{y}_{i,j}$  принимает значение большее или равное 0,8.

Рассмотрим выражения показателей  $\bar{y}_{i,j}$  математической модели.

В *первую группу*  $Y_1$  входит 10 показателей. Сюда относятся, в первую очередь, показатели, оценивающие габаритные размеры кирпича (камня):

– по длине

$$\bar{y}_{1,1} = f_1(L, L_1, a_2); \quad (3)$$

– по ширине

$$\bar{y}_{1,2} = f_2(B, B_1, a_4); \quad (4)$$

– по толщине

$$\bar{y}_{1,3} = f_3(T, T_1, a_3), \quad (5)$$

где  $L_1, B_1, T_1$  – действительные значения, соответственно, длины, ширины и толщины кирпича (камня);  $L, B, T$  – номинальные значения, соответственно, длины, ширины и толщины кирпича (камня), определяемые стандартом;  $a_2, a_3, a_4$  – предельные отклонения, соответственно, по длине, толщине и ширине кирпича (камня), определяемые стандартом.

Например, функция в (5) нами предложена следующая:

$$f_3(T, T_1, a_3) = A_3 + B_3 \left( \frac{T}{T_1} \right) + C_3 \left( \frac{T}{T_1} \right)^2, \quad (6)$$

где  $A_3 = 1 - 0,2 \left( \frac{T_1}{a_3} \right)^2$ ;  $B_3 = 0,4 \left( \frac{T_1}{a_3} \right)^2$ ;  $C_3 = -0,2 \left( \frac{T_1}{a_3} \right)^2$ .

При производстве на поверхности керамического кирпича (камня) возникают дефекты в виде отколов углов, притуплений, трещин. Каждый из этих дефектов в стандарте учтен и имеет ограничения. Показатели, оценивающие степень выполнения этих требований и ограничений, имеют следующий вид:

– по количеству размеров отбитых углов, превышающих установленные в стандарте

$$\bar{y}_{1,4} = f_4(n_{\text{отб}}); \quad (7)$$

– по глубине отбитых углов

$$\bar{y}_{1,5} = f_5(h_{\text{отб}}); \quad (8)$$

– по количеству и глубине отбитых и притупленных ребер

$$\bar{y}_{1,6} = f_6(n_{\text{реб}}); \quad (9)$$

$$\bar{y}_{1,7} = f_7(h_{\text{реб}}); \quad (10)$$

– по длине отбитых и притупленных ребер

$$\bar{y}_{1,8} = f_8(L_{\text{реб}}); \quad (11)$$

– по длине трещины в кирпиче

$$\bar{y}_{1,9} = f_9(L_{\text{тр}}); \quad (12)$$

– по отклонению от перпендикулярности граней

$$\bar{y}_{1,10} = f_{10}(L_{\text{от}}), \quad (13)$$

где  $n_{\text{отб}}$ ,  $n_{\text{реб}}$  – количества отбитых углов и ребер в кирпиче сразу после его производства;  $h_{\text{отб}}$ ,  $h_{\text{реб}}$  – максимальные глубины отбитостей угла и притупленности ребра соответственно;  $L_{\text{реб}}$ ,  $L_{\text{тр}}$  – максимальные длины отбитых и притупленных ребер и трещин соответственно;  $L_{\text{от}}$  – максимальное отклонение от перпендикулярности граней.

Например, последняя функция, оценивающая отклонения от стандарта по перпендикулярности граней керамического кирпича, предлагается следующая:

$$\bar{y}_{1,10} = \begin{cases} 1,2 - L_{\text{от}}/15, & \text{если } 3 \geq L_{\text{от}} \geq 0, \\ 1,75 - 0,25L_{\text{от}}, & \text{если } 5 \geq h_{\text{реб}} > 3, \\ 0,0, & \text{если } L_{\text{от}} > 5. \end{cases} \quad (14)$$

Особую опасность с точки зрения эксплуатации керамического кирпича и камней представляет скрытый дефект, называемый дутик. Он проявляется не сразу, а лишь после того, как изделие некоторое время находилось во влажном состоянии. Тогда возникают отколы и разрушения поверхностей кирпича (камня) из-за нахож-

дения в составе кирпича (камня) известняка или другой карбонатной породы типа  $\text{CaCO}_3$ . При контакте с водой спустя некоторое время она превращается в гидроксид кальция, который имеет больший объем, чем исходный известняк.

Вследствие этого стандартом ограничено содержание известковых включений. Эти ограничения составляют *вторую группу* показателей. В этой группе всего два показателя. Первый производит оценку качества кирпича (камня) по количеству, а второй – по характерному размеру отколов после пропаривания:

$$\bar{y}_{2,1} = f_{11}(n_{\text{отк}}); \quad (15)$$

$$\bar{y}_{2,2} = f_{12}(L_{\text{отк}}), \quad (16)$$

где  $n_{\text{отк}}$ ,  $L_{\text{отк}}$  – количество и максимальная длина откола в кирпиче (камне) после пропаривания или разрушения.

Марка кирпича и камней устанавливается по результатам их испытания на прочность при сжатии и изгибе. Прочность является важнейшей характеристикой керамического кирпича (камня). Под ней понимают способность кирпича (камня) сопротивляться разрушению под действием напряжений, вызванных внешними силами. В стандарте прочность кирпича (камня) характеризуется средними и минимальными пределами прочности при сжатии и изгибе. Требования по этим характеристикам составляют показатели *третьей группы*. В математической модели эта группа состоит из четырех показателей.

Первые два показателя определяют сопротивляемость кирпича (камня) на сжатие, а последние два – на изгиб, соответственно, по средним и минимальным напряжениям:

$$\bar{y}_{3,1} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{ср}}}; \quad \bar{y}_{3,2} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{см}}}; \quad \bar{y}_{3,3} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{сп}}}; \quad \bar{y}_{3,4} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{им}}}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{\text{ср}}$ ,  $\sigma_{\text{сп}}$  – средние пределы прочности на сжатие и изгиб, определяемые стандартом;  $\sigma_{\text{см}}$ ,  $\sigma_{\text{им}}$  – минимальные пределы прочности на сжатие и изгиб, определяемые стандартом;  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}$  – действительные средний и минимальный пределы прочности на сжатие;  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}$  – действительные средний и минимальный пределы прочности на изгиб.

*Четвертую группу* составляют теплофизические характеристики керамического кирпича (камня). Сюда отнесены следующие показатели.

Показатель водопоглощения через массу кирпича (камня):

$$\bar{y}_{4,1} = \frac{W_{m1}}{W_{mm}}. \quad (18)$$

Показатели морозостойкости по числу циклов замораживания и изменению массы:

$$\bar{y}_{4,2} = f_{13}(W_{m2}, \text{Sct}(i), i = \overline{1,4}); \quad (19)$$

$$\bar{y}_{4,3} = f_{14}(M_m, M_1). \quad (20)$$

Показатели изменения массы и плотности:

$$\bar{y}_{4,4} = f_{15}(M_{\text{ст}}, M_1); \quad (21)$$

$$\bar{y}_{4,5} = f_{16}(M_{\text{ст}}, M_1, L, L_1, T, T_1, B, B_1), \quad (22)$$

где  $\{\text{Sct}(i), i = \overline{1,4}\} = \{15, 25, 35, 50\}$  – определяемое стандартом предельное количество циклов замораживания и оттаивания до появления дефектов на поверхностях керамического кирпича (камня);  $W_{\text{mm}}$  – установленное стандартом минимальное значение водопоглощения керамического кирпича (камня) по массе;  $W_{m2}$  – минимальное количество циклов замораживания кирпича до появления повреждений;  $M_2, M_m$  – масса кирпича в насыщенном водой состоянии и после замораживания и высушивания;  $M_1, M_{\text{ст}}$  – действительная и определяемая стандартом сухие массы керамического кирпича (камня).

Действительное водопоглощение по массе, определенное в результате испытаний керамического кирпича (камня):  $W_{m1} = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \cdot 100 \%$ .

Такова математическая модель качества керамического кирпича (камня). Как показала практика, она позволяет достаточно точно с использованием вычислительной техники количественно оценивать качество керамического кирпича (камня) в условиях реального производства.

Для этого составлена и апробирована программа на алгоритмическом языке *Delphi*, которая позволяет количественно оценить качество как отдельных керамических кирпичей (камней), так и их партий. Покажем это на числовом примере.

Рассмотрим качество керамического полнотелого кирпича, выпускаемого ООО «Феникс» на примере двух партий.

Непосредственным замером определены параметры в этих партиях (табл. 1). Значения параметров для первой партии, соответствующих стандарту ГОСТ 530-95, были приняты следующие:  $L = 250$  мм;  $B = 120$  мм;  $T = 65$  мм;  $a_2 = \pm 5,0$  мм;  $a_3 = \pm 3,0$  мм;  $a_4 = \pm 4,0$  мм;  $\sigma_{\text{ср}} = 12,5$  МПа;  $\sigma_{\text{ир}} = 2,5$  МПа;  $\sigma_{\text{см}} = 10$  МПа;  $\sigma_{\text{им}} = 1,2$  МПа;  $W_{\text{mm}} = 8,0 \%$ ;  $M_{\text{ст}} = 4,3$  кг. Для второй партии эти параметры были неизменными за исключением  $\sigma_{\text{ср}} = 25,0$  МПа;  $\sigma_{\text{ир}} = 3,4$  МПа;  $\sigma_{\text{см}} = 17,5$  МПа;  $\sigma_{\text{им}} = 1,7$  МПа.

Использование данной математической модели и составленной программы ЭВМ (см. рис.) позволило получить значения показателей для каждой из партий (табл. 2). Проанализируем полученные результаты.

В первой партии керамических кирпичей с точки зрения внешнего вида наилучшим оказался показатель, который оценивает отклонения длины кирпича по длине  $\bar{y}_{1,1}$ . Наилучшее качество у этой партии керамических кирпичей имеется по длинам трещин – всего 6 мм, на что указывает показатель  $\bar{y}_{1,9}$ .

По наличию известковых включений партия кирпичей удовлетворяет требованиям и ограничениям стандарта. Оба показателя –  $\bar{y}_{2,1}$  и  $\bar{y}_{2,2}$  – принимают одинаковое значение, равное единице.

Таблица 1. Параметры произведенного на предприятии керамического кирпича

№	Обозначение параметра в модели	Размерность	Действительные значения в партиях		№	Обозначение параметра в модели	Размерность	Действительные значения в партиях	
			I	II				I	II
1	$L_1$	мм	248,0	251,0	11	$n_{отк}$	–	2	1
2	$B_1$	мм	121,0	121,0	12	$L_{отк}$	мм	6	4
3	$T_1$	мм	64,5	64,0	13	$\sigma_{сж}$	МПа	12,5	25,5
4	$n_{отб}$	–	1	1	14	$\sigma_{мсж}$	МПа	11	20,3
5	$h_{отб}$	мм	5	4	15	$\sigma_{си}$	МПа	2,6	4,0
6	$n_{рвб}$	–	1	2	16	$\sigma_{ми}$	МПа	1,1	2,1
7	$h_{рвб}$	мм	3	2	17	$M_1$	кг	4,35	4,30
8	$L_{рвб}$	мм	4	5	18	$M_2$	кг	4,70	4,80
9	$L_{тр}$	мм	6	5	19	$W_{m2}$	–	37	44
10	$L_{от}$	мм	2	1	20	$M_m$	кг	4,25	4,20

Математическая модель качества полнотелого керамического кирпича

**Данные по стандарту ГОСТ 530-95**

Номинальные геометрические размеры

Длина, мм: 250 | Ширина, мм: 120 | Толщина, мм: 65

Предельные отклонения

Длины, мм: 5 | Ширины, мм: 4 | Толщины, мм: 3

Прочностные характеристики

Средний предел на сжатие, МПа: 12,5

Средний предел на изгиб, МПа: 2,5

Минимальный предел на сжатие, МПа: 10

Минимальный предел на изгиб, МПа: 1,2

Теплофизические характеристики

Стандартная масса, кг: 4,3

Минимальная степень водопоглощения, %: 8,0

Управление процессом

OK Close

**Действительные данные о кирпиче (камне)**

Геометрические размеры

Длина, мм: 248 | Ширина, мм: 121 | Толщина, мм: 64,5

Количество:

отбитых углов более 10,15 мм: 1

отбитостей и притуплений: 1

отколов и разрушений после пропаривания: 2

циклов замораживания до появления повреждений: 37

Максимальные значения:

глубины отбитости угла, мм: 5

глубины отбитости и притупленности ребра, мм: 3

длины отбитого и притупленного ребра, мм: 4

длины трещины, мм: 6

отклонения от перпендикулярности граней, мм: 2

глубины разрушения поверхности и откола после пропаривания, мм: 6

Пределы прочности, МПа

минимальный на сжатие: 11 | средний на сжатие: 12,5

минимальный на изгиб: 1,1 | средний на изгиб: 2,6

Масса кирпича, кг

в сухом состоянии: 4,35

в насыщенном водой состоянии: 4,7

после замораживания и высушивания: 4,25

**Показатели качества**

**Качество внешнего вида**

Y1\_1 - по длине кирпича (камня)

Y1\_2 - по ширине кирпича (камня)

Y1\_3 - по толщине кирпича (камня)

Y1\_4 - по количеству отбитых углов

Y1\_5 - по глубине отбитых углов

Y1\_6 - по количеству отбитых и притупленных ребер

Y1\_7 - по глубине отбитых и притупленных ребер

Y1\_8 - по длине отбитых и притупленных ребер

Y1\_9 - по длине трещины в кирпиче

Y1\_10 - по перпендикулярности граней

**Наличие известковых включений**

Y2\_1 - по количеству отколов и разрушений после пропаривания

Y2\_2 - по длине отколов и разрушений после пропаривания

**Прочность**

Y3\_1 - по средней прочности на сжатие

Y3\_2 - по минимальной прочности на сжатие

Y3\_3 - по средней прочности на изгиб

Y3\_4 - по минимальной прочности на изгиб

**Теплофизические характеристики**

Y4\_1 - по водопоглощению через массу

Y4\_2 - по морозостойкости через число циклов

Y4\_3 - по морозостойкости через массу

Y4\_4 - по массе

Y4\_5 - по плотности

**Оценка качества керамического кирпича (камня)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	CP	MIN
Качество внешнего вида Y1=	0,968	0,988	0,994	1,000	1,133	1,100	1,140	1,120	1,196	1,067	1,071	0,968
Наличие известковых включений Y2=	1,000	1,000									1,000	1,000
Прочность Y3=	1,000	1,100	1,040	0,917							1,014	0,917
Теплофизические характеристики Y4=	1,005	1,057	1,007	1,012	1,019						1,020	1,006
Среднее значение показателя качества	1,026											
Минимальное значение показателя качества	0,917											

Качество нормальное, соответствует стандарту

Исходные данные и результаты компьютерного моделирования качества первой партии керамического кирпича

Таблица 2. Показатели качества произведенного на предприятии керамического кирпича

№	Обозначение	Значения в партиях		№	Обозначение	Значения в партиях	
		I	II			I	II
Качество внешнего вида $Y_1$		1,071	1,069	Прочность керамического кирпича $Y_3$		1,014	1,028
1	$\bar{y}_{1,1}$	0,968	0,992	13	$\bar{y}_{3,1}$	1,000	1,020
2	$\bar{y}_{1,2}$	0,988	0,988	14	$\bar{y}_{3,2}$	1,100	1,015
3	$\bar{y}_{1,3}$	0,994	0,978	15	$\bar{y}_{3,3}$	1,040	1,026
4	$\bar{y}_{1,4}$	1,000	1,000	16	$\bar{y}_{3,4}$	0,917	1,050
5	$\bar{y}_{1,5}$	1,133	1,147	Теплофизические свойства керамического кирпича $Y_4$		1,020	1,082
6	$\bar{y}_{1,6}$	1,100	1,000	17	$\bar{y}_{4,1}$	1,006	1,200
7	$\bar{y}_{1,7}$	1,140	1,160	18	$\bar{y}_{4,2}$	1,057	1,20
8	$\bar{y}_{1,8}$	1,120	1,100	19	$\bar{y}_{4,3}$	1,007	1,007
9	$\bar{y}_{1,9}$	1,196	1,197	20	$\bar{y}_{4,4}$	1,012	1,000
10	$\bar{y}_{1,10}$	1,067	1,133	21	$\bar{y}_{4,5}$	1,019	1,003
Качество по наличию известковых включений $Y_2$		1,000	1,033	<b>Общий показатель качества <math>Y</math></b>		<b>1,026</b>	<b>1,053</b>
11	$\bar{y}_{2,1}$	1,000	1,000				
12	$\bar{y}_{2,2}$	1,000	1,067				

С точки зрения прочности качество партии керамических кирпичей также хорошее. Значения показателей изменяются от 0,917 до 1,100. Немного ниже качество по минимальному пределу прочности на изгиб, хотя среднее значение оказывается выше установленного стандартом.

По теплофизическим характеристикам требования и ограничения стандарта удовлетворены полностью. Все показатели этой группы превышают значение единицы.

Относительно второй партии керамического кирпича отметим следующее. Качество керамического кирпича  $M125$  с морозостойкостью  $F35$  по всем показателям одновременно составляет в среднем 1,026; по наименьшим значениям – 0,917, что удовлетворяет требованиям стандарта.

У керамического кирпича  $M250$  с морозостойкостью  $F35$  по качеству внешнего вида минимальное значение принимает показатель, характеризующий габаритный размер по толщине –  $\bar{y}_{1,3}$ . Нехватка одного миллиметра по толщине сбóит значения показателя, равного 0,978. Это в пределах допустимого. Тем не менее, качество внешнего вида этой партии керамического кирпича уменьшилось на 0,002.

Качество керамического кирпича по наличию известковых включений улучшилось за счет первого показателя  $\bar{y}_{2,1}$ , которым учтено уменьшение числа отколов после пропаривания. Улучшение качества произошло на 3,2 % по среднему значению показателя.

Прочность керамического кирпича по всем характеристикам удовлетворяет требованиям стандарта, на что указывают значения всех показателей третьей группы. Все они имеют значения большие единицы. По сравнению с первой партией керамического кирпича улучшились значения показателей качества и по средним, и по минимальным значениям.

Наконец, по четвертой группе показателей качество оказалось не только удовлетворяющим требованиям стандарта, но по сравнению с первой партией керамического кирпича оно улучшилось, и это произошло за счет показателей всех групп, кроме третьей. Качество улучшилось на 5,7 % по среднему значению и на 0,6 % по минимальному значению показателей качества.

В целом, качество второй партии керамического кирпича является более высоким, чем первой партии, хотя обе они удовлетворяют всем требованиям стандарта. Действительно, по средним значениям показателей качество составляет 1,053, что на 2,6 % больше, и по минимальным значениям – 0,978. Однако по показателям качества внешней формы первая партия керамических кирпичей является более предпочтительной.

Предложенная математическая модель, реализованная в виде программы на алгоритмическом языке *Delphi*, внедрена и используется на ООО «Феникс».

На основании изложенного материала можно сказать следующее.

1. Построена математическую модель качества, которая количественно оценивает все возможные предельные состояния керамического кирпича.

2. Внедрение данной математической модели как инструмента контроля качества производства керамического кирпича позволило оперативно производить сравнение качества партий керамического кирпича.

3. Полученная структурированная полная информация о керамическом кирпиче позволяет через параметры, входящие в показатели  $Y$ , управлять качеством производства.

#### Список литературы

1. Попов, К. Н. Оценка качества строительных материалов / К. Н. Попов, М. Б. Каддо, О. В. Кульков. – М. : Высш. шк., 2004. – 287 с.
2. ГОСТ 530–95. Кирпич и камни керамические. Технические условия. – М. : Издание официальное, 1996.
3. Проектирование технических систем на основе анализа упорядоченных во времени критических состояний / В. Н. Репко, Ф. А. Уразбахтин, Б. А. Якимович, Н. Ю. Орлова. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1999. – 268 с.
4. Ибрагимова, Д. М. Компьютерная программа оценки качества глинистого сырья и прогнозирования свойств керамического кирпича / Д. М. Ибрагимова, Б. Ф. Горбачев, А. В. Корнилов // Строительные материалы. – Сентябрь, 2005.