

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.254, 666.3-187

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-85-96

Определение зависимости кажущейся плотности керамических образцов от формовочной влажности глинистого сырья и давления прессования на основе регрессионных моделей*

О.С. ЧЕРНИКОВА^а, Н.А. ЧЕРНЕНКО^б

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет

^а chernikova@corp.nstu.ru ^б N.Chernenko@corp.nstu.ru

В работе предлагается для усовершенствования производства проволочно-керамических резисторов использовать белую глину с наибольшей кажущейся плотностью. Предварительные исследования белой глины показали, что она более чувствительна к сушке, нежели красная глина, что, в свою очередь, определяет большую интенсивность выхода влаги из центра изделия к его поверхности в процессе изготовления, и сушильные характеристики глинистого сырья дают большую усадку и прочность сухих образцов.

Для нахождения зависимости кажущейся плотности глинистого сырья от влажности и давления прессования рассмотрены линейная и нелинейные модели множественной регрессии с учетом и без учета мультиколлинеарности. Для уточнения модельных структур применяется двухэтапный подход, предполагающий дополнительно построение модели для остатков. Установлено, что сочетание модели множественной регрессии с учетом мультиколлинеарности с моделью авторегрессии, построенной для остатков, позволяет вычислить кажущуюся плотность глинистого сырья с наименьшим среднеквадратичным отклонением от экспериментальных данных.

Полученные модельные структуры будут применяться для определения оптимальных параметров формования керамических образцов: влажности глинистого сырья и давления прессования, при которых достигается наибольшая кажущаяся плотность образцов, и могут быть использованы для совершенствования технологии производства проволочно-керамических резисторов. Применение проволочно-керамических резисторов на основе белой глины с наибольшей кажущейся плотностью позволит ускорить одну из стадий технологического процесса – сушку – и уменьшить их гигроскопичность. В результате применения проволочно-керамических резисторов с наибольшей кажущейся плотностью повысится механическая прочность изделий, что улучшит эксплуатационные характеристики и продлит срок использования изделий.

* Статья получена 25 августа 2023 г.

Ключевые слова: кажущаяся плотность керамических образцов, пористость сырья, влажность сырья, давление прессования, резистор большой мощности, проволочно-керамический резистор, метод наименьших квадратов, регрессионная модель, авторегрессионная модель

ВВЕДЕНИЕ

Термин «резистор» введен Государственным комитетом стандартов, мер и измерительных приборов в 1962 г. для обозначения электрического сопротивления как изделия. Важная функция резисторов – поглощение электрической энергии благодаря сосредоточенному в них большему или меньшему активному электрическому сопротивлению, создаваемому резистивными материалами. Имеющаяся в настоящее время техническая литература в основном освещает технологию, расчет и конструирование резисторов преимущественно для радиотехнических устройств, для которых характерны малая мощность рассеивания и незначительные габаритные размеры [1]. Резисторы, используемые в качестве шунтирующих сопротивлений к воздушным и масляным выключателям, токоограничивающих сопротивлений в цепи разрядников с принудительным дугогашением, сопротивлений при резистивном заземлении нейтрали электрических сетей и т. п., должны рассеивать значительное количество энергии, порядка 5 МДж. Для этих целей необходимы резисторы объемного типа, а не тонкопленочные, тогда образующиеся в них кратковременно или длительно очень большие количества энергии распределяются в сравнительно большом объеме. Основной задачей, возникающей при проектировании резисторов большой мощности, является обеспечение работоспособности в течение определенного промежутка времени, или, иными словами, энергия, выделяющаяся в теле резистора, не должна превышать допустимого значения.

Характеристики резистора при номинальном напряжении сети 35 кВ и максимальном рабочем напряжении $U_{\text{раб}} = 23,4$ кВ будут следующими: сопротивление резистора определяется емкостным током замыкания и составляет $R = 3$ кОм. При протекании тока замыкания 10 А требуемая мощность резистора должна составлять 234 кВт, а при кратковременном нагреве ($\tau = 10$ с) выделившаяся энергия составит 2,34 МДж, при этом необходимо, чтобы температура нагрева модуля резистора не превысила допустимой $T_{\text{доп}} = 200$ °С. Габаритные размеры модуля резистора определяются техническими условиями подстанции и с учетом коэффициента формы [2] составляют $D = 0,135$ м, $L = 0,5$ м. Указанные характеристики резистора при кратковременном режиме работы обеспечивает высоковольтный проволочно-керамический резистор, разработанный в Новосибирском государственном техническом университете [3, 4]. Керамическая часть резистора выполнена из красной глины. При эксплуатации проволочно-керамических резисторов на основе красной глины в течение долгого времени выявился ряд недостатков, таких как низкая механическая прочность, которая, в свою очередь, ведет к увеличению стоимости их перевозки, и гигроскопичность, снижающая эксплуатационные характеристики изделий [5].

При усовершенствовании производства проволочно-керамических резисторов планируется использовать новое глинистое сырье – белую глину. Предварительные исследования белой глины показали, что она более чувстви-

тельна к сушке, нежели красная глина, что, в свою очередь, определяет большую интенсивность выхода влаги из центра изделия к его поверхности в процессе сушки; сушильные характеристики нового глинистого сырья дают большую усадку и прочность сухих образцов. Прочность керамических изделий также зависит и от структурных изменений глинистых минералов при обжиге. Увеличение механической прочности у глин разного минералогического состава зависит от структуры глинообразующего минерала. Формирование оптимальной структуры керамического изделия достигается за счет моделирования таких процессов, как помол, грануляция, прессование, сушка и обжиг изделий [6].

В работе приводятся экспериментальные результаты, полученные при изготовлении образцов из белой глины при различных значениях формовочной влажности глинистого сырья и давления прессования. Исследуется точность моделей множественной регрессии при описании зависимости кажущейся плотности керамических образцов от формовочной влажности и давления прессования.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Изготовление образцов из белой глины предполагает последовательное выполнение этапов формования и сушки.

Этап формования образцов

Формование образцов выполнялось методом полусухого прессования. При таком способе прессования существуют такие области значений влажности и давления прессования, при которых можно получить бездефектный сырец с плотной структурой, имеющий максимальные значения прочности [7].

Пресс-форма в виде цилиндра заполнялась подготовленной глиняной массой с заданными показателями влажности глинистого сырья X_1 , и затем глинистое сырье уплотнялось односторонним прессованием при различном давлении прессования X_2 .



Рис. 1. Сформированные образцы

Fig. 1. Formed samples

Этап сушки

Сформованные образцы помещались в эксикатор на несколько дней для равномерного распределения влаги в объеме образца, затем в течение нескольких дней образцы сушились до постоянного веса на открытом воздухе и в дальнейшем перемещались в сушильный шкаф, где равномерно нагревались до температуры 120 °С, при которой происходило удаление адсорбционной и капиллярной влаги. Для обеспечения отсутствия дефектов в высушенном образце изделие необходимо высушить до влажности 1...2 % [8].



Рис. 2. Сушка образцов в сушильном шкафу

Fig. 2. Samples drying in a drying oven

Для определения кажущейся плотности ρ были измерены диаметр d , высота h , масса m образцов после сушки.

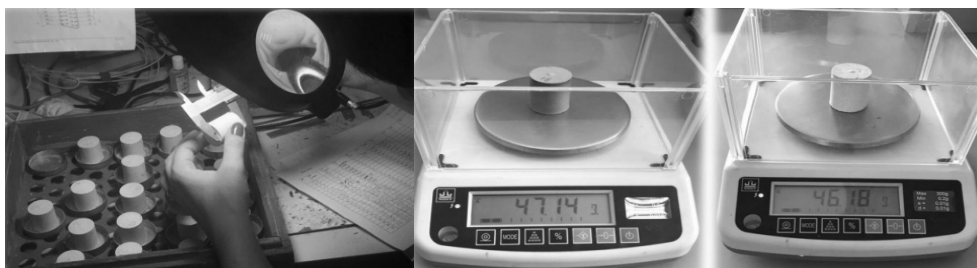


Рис. 3. Измерение геометрических характеристик и массы образцов

Fig. 3. Measurement of geometric characteristics and mass of samples

Таким образом, в результате выполнения всех этапов были изготовлены образцы (21 изделие из белой глины, табл. 1) при различных значениях формовочной влажности глинистого сырья (варьировалась от 5,6 до 12,4 %) и давлении прессования (варьировалось от 16,6 до 33,4 МПа).

На основе приведенных в табл. 1 измерительных данных рассчитаем объем V и кажущуюся плотность образцов ρ по следующим формулам:

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} \text{ [мм}^3\text{]},$$

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{г}}{\text{мм}^3} \right] \quad \left(\text{или } \rho = \frac{m}{V} 10^6 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \right). \quad (1)$$

Таблица 1

Table 1

Геометрические размеры, масса, значения влажности и давления прессования образцов

Geometrical dimensions, weight, values of humidity and pressure of samples compaction

Номер образца	Влажность X_1 , %	Давление прессования X_2 , МПа	Размеры образца		
			d , мм	h , мм	m , г
1	11	30	30,5	33,5	46,18
2	11	30	30,5	33,55	46,3
3	11	20	30,5	34,4	46,22
4	11	20	30,5	34,4	46,26
5	7	30	30,5	35,1	47,75
6	7	30	30,5	35,2	47,79
7	7	20	30,5	36,25	47,65
8	7	20	30,5	36,2	47,85
9	12,4	25	30,5	33,75	46,1
10	5,6	25	30,5	36,4	48,64
11	9	33,4	30,5	34,2	46,9
12	9	16,6	30,5	35,85	46,96
13	9	25	30,5	34,65	46,89
14	9	25	30,5	34,75	46,95
15	9	25	30,5	34,5	46,89
16	9	25	30,5	34,85	46,93
17	9	25	30,5	34,3	47,07
18	9	25	30,5	34,8	47,18
19	9	25	30,5	34,65	46,86
20	9	25	30,5	34,9	46,9
21	11	30	30,5	33,55	46,25

Также определим следующие коэффициенты:

1) парные (линейные) коэффициенты корреляции, отражающие тесноту связи между плотностью и влажностью (давлением) образцов:

$$r_{\rho X_i} = \frac{\overline{\rho X_i} - \bar{\rho} \bar{X}_i}{\sigma_{X_i} \sigma_{\rho}}, \quad \sigma_{X_i} = \sqrt{X_i^2 - \bar{X}_i^2}, \quad \sigma_{\rho} = \sqrt{\rho^2 - \bar{\rho}^2}, \quad i=1,2; \quad (2)$$

2) парные (линейные) коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту взаимосвязи влажности и давления образцов:

$$r_{X_i X_j} = \frac{\overline{X_i X_j} - \bar{X}_i \bar{X}_j}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}, \quad i=1,2. \quad (3)$$

По формулам (2), (3) получим $r_{\rho X_1} = 0,5$, $r_{\rho X_2} = 0,83$, $r_{X_1 X_2} = 0,07$. Несмотря на небольшое значение парного коэффициента корреляции между факторами X_1 и X_2 , нельзя исключить наличие мультиколлинеарности.

В связи с этим для нахождения зависимости плотности глинистого сырья от влажности и давления прессования рассмотрим следующие модели множественной регрессии [9, 10]:

1) линейная модель (М1)

$$\rho = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \varepsilon,$$

2) нелинейная модель (М2)

$$\rho = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_2^2 + \varepsilon,$$

3) нелинейная модель с учетом мультиколлинеарности (М3)

$$\rho = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_1 X_2 + \varepsilon,$$

где a_i , $i = 0, 1, \dots, 5$, – параметры моделей М1 – М3; ε – случайная ошибка.

Представим в табл. 2 параметры моделей М1 – М3, найденные на основе метода наименьших квадратов [11, 12].

Таблица 2

Table 2

Оценки параметров моделей М1-М3
Parameter estimates of the M1-M3 models

Модель	Оценки параметров
М1	$a_0 = 1658,2857, a_1 = 7,038, a_2 = 5,939$
М2	$a_0 = 1486,7868, a_1 = 11,8778, a_2 = 17,4203, a_3 = -0,265, a_4 = -0,246$
М3	$a_0 = 1447,4036, a_1 = 16,2195, a_2 = 18,9693, a_3 = -0,256,$ $a_4 = -0,2446, a_5 = -0,1775$

Далее в табл. 3 представим найденную кажущуюся плотность керамическим образцов, вычисленную на основе построенных моделей М1 – М3 по формуле (1). Гипотезу о независимости ошибок проверим посредством расчета статистики Дарбина – Уотсона (верхнее значение статистики Дарбина – Уотсона при 5 %-ном уровне значимости 1,54):

$$D = \frac{\sum_{i=2}^{21} (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=2}^{21} e_i^2},$$

где $e_i = \rho_i - \hat{\rho}_i$; $\hat{\rho}_i$ – плотность i -го образца, определенная на основе выбранной модели.

Точность построенных модельных структур М1 – М3 оценим на основе среднеквадратичной ошибки RMSE (от англ. Root Mean Square Error).

Таблица 3

Table 3

Значения кажущейся плотности керамических образцов

Values of the apparent density of ceramic samples

Номер образца	Плотность, рассчитанная по формуле (1), кг/м ³	Плотность, определенная на основе М1, кг/м ³	Плотность, определенная на основе М2, кг/м ³	Плотность, определенная на основе М3, кг/м ³
1	1886,7726	1888,5199	1886,6102	1885,1437
2	1888,8562	1888,5199	1886,6102	1885,1437
3	1839,0009	1837,581	1835,3915	1837,2604
4	1840,5924	1837,581	1835,3915	1837,2604
5	1861,9872	1860,368	1858,1812	1860,0522
6	1858,2529	1860,368	1858,1812	1860,0522
7	1799,1416	1809,4292	1806,9625	1805,0681
8	1809,1885	1809,4292	1806,9625	1805,0681
9	1869,5522	1872,9036	1875,0966	1875,4001
10	1828,9533	1825,0454	1826,7673	1826,7089
11	1876,9693	1891,7631	1879,6639	1879,9699
12	1792,8724	1806,1859	1793,6164	1793,5613
13	1852,1981	1848,9745	1853,9956	1854,0221
14	1849,2313	1848,9745	1853,9956	1854,0221
15	1860,2511	1848,9745	1853,9956	1854,0221
16	1843,1395	1848,9745	1853,9956	1854,0221
17	1878,2808	1848,9745	1853,9956	1854,0221
18	1855,6204	1848,9745	1853,9956	1854,0221
19	1851,0131	1848,9745	1853,9956	1854,0221
20	1839,3224	1848,9745	1853,9956	1854,0221
21	1886,8164	1888,5199	1886,6102	1885,1437
D	–	1,8988	2,4708	2,5804
RMSE	–	9,0627	7,4599	7,3706

Результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что наилучшей моделью, описывающей зависимость кажущейся плотности глинистого сырья от влажности и давления прессования, является М3, при этом, по критерию Дарбина – Уотсона [13], автокорреляция остатков отсутствует.

На практике для повышения точности построенной модели используется подход, предполагающий идентификацию модельной структуры остатков [14].

Для проверки стационарности временного ряда остатков e_i , определенных на основе модели М3, воспользуемся расширенным тестом Дики – Фуллера (ADF-тестом). Согласно ADF-тесту (Р-значение: $6,557 \cdot 10^{-7}$), полученный ряд является стационарным и допускает описание его авторегрессионной моделью вида [15]

$$e_i = \sum_{j=1}^p \alpha_j e_{i-j} + \eta_i, \quad (4)$$

где p – порядок модели; $\alpha_j, j=1, 2, \dots, p$ – параметры модели; $\eta_i, i=1, 2, \dots, 21$ – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией. Порядок модели определялся на основе информационного критерия Акаике исходя из выбранной точности ($p = 6$). Для определения параметров модели (4) применялся метод наименьших квадратов ($\alpha_1 = -0,6971$, $\alpha_2 = -0,4423$, $\alpha_3 = -0,3589$, $\alpha_4 = -0,1305$, $\alpha_5 = -0,2105$, $\alpha_6 = -0,8047$). Результаты уточнения кажущейся плотности, найденной на основе МЗ, с учетом построенной модели остатков модели (4) представим в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Уточнение значений кажущейся плотности керамических образцов

Refinement of the apparent density values of ceramic samples

Номер образца	Плотность, определенная на основе МЗ, кг/м ³	Плотность, определенная на основе МЗ с учетом модели (4), кг/м ³
1	1885,1437	1884,2009
2	1885,1437	1884,2009
3	1837,2604	1837,2569
4	1837,2604	1837,2569
5	1860,0522	1860,8677
6	1860,0522	1860,8677
7	1805,0681	1804,6775
8	1805,0681	1804,4903
9	1875,4001	1874,4752
10	1826,7089	1826,6024
11	1879,9699	1879,2439
12	1793,5613	1793,3155
13	1854,0221	1854,319
14	1854,0221	1854,4191
15	1854,0221	1854,0613
16	1854,0221	1853,2463
17	1854,0221	1853,9979
18	1854,0221	1853,6727
19	1854,0221	1853,6561
20	1854,0221	1853,4014
21	1885,1437	1885,2106
RMSE	7,3706	7,2752

Таким образом, для описания зависимости кажущейся плотности керамических образцов от формовочной влажности и давления прессования наилучшей модельной структурой является нелинейная модель множественной регрессии с учетом мультиколлинеарности. Двухэтапная процедура построения математической модели кажущейся плотности, предполагающая описание остатков авторегрессионной моделью, дает некоторое уточнение модели нелинейной регрессии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для нахождения зависимости кажущейся плотности глинистого сырья от влажности и давления прессования были рассмотрены линейные и нелинейные регрессионные модели с учетом и без учета мультиколлинеарности. Установлено, что сочетание моделей множественной регрессии с учетом мультиколлинеарности и авторегрессии, построенной для остатков, позволяет вычислить кажущуюся плотность глинистого сырья с наименьшим среднеквадратичным отклонением от экспериментальных данных.

Полученные модельные структуры будут применяться для определения влажности сырья и давления прессования, при которых достигается наибольшая плотность образцов, и могут быть использованы для совершенствования технологии производства проволочно-керамических резисторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Врублевский Л.В., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И. Силовые резисторы. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Мартюшов К.И., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И. Методы расчета резисторов. – М.: Энергия, 1971. – 207 с.
3. Заявка на изобретение № 94028412 Российская Федерация. Способ изготовления высоковольтного проволочного резистора: № 94028412/28: заявл. 27.07.94: опубл. 27.04.96 / Ю.В. Целебровский, Т.В. Вербицкая, Г.Н. Ледяев.
4. Целебровский Ю.В. Расчет, конструкция и технология изготовления энергоемких проволочно-керамических изделий // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 60–64.
5. Крюков Д.О., Сельменева Д.С. Определение оптимальной влажности сырья и режима сушки при изготовлении проволочно-керамических резисторов // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI Международной молодежной научно-технической конференции, Иваново, 9–13 ноября 2015 г.: в 2 т. – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 508–511.
6. Иванов А.И., Столбоушкин А.Ю., Стороженко Г.И. Принципы создания оптимальной структуры керамического кирпича полусухого прессования // Строительные материалы. – 2015. – № 4. – С. 65–69.
7. Повышение прочности изделий строительной керамики: от теории к практике / А.М. Салахов, Л.Р. Тагиров, Р.А. Салахов, Г.Р. Фасеева, А.И. Хацринов // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 17. – С. 18–22.
8. Столбоушкин А.Ю., Столбоушкина О.А., Бердов Г.И. Оптимизация параметров прессования гранулированного техногенного и природного сырья для производства керамического кирпича // Строительные материалы. – 2013. – № 3. – С. 76–78.
9. Bates D., Watts D. Nonlinear regression analysis and its applications. – New York: Wiley, 1988. – 365 p. – (Wiley series in probability and mathematical statistics).
10. Park J., Phillips P.C.B. Nonlinear regression with integrated time series // Econometrica. – 2001. – Vol. 69 (1). – P. 117–161.
11. Рассел Дж. Обобщенный метод наименьших квадратов. – М.: VSD, 2013. – 971 с.
12. Bai J. Least squares estimation of a shift in linear processes // Journal of Time Series Analysis. – 1994. – Vol. 15 (5). – P. 453–472.

13. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2003. – Т. 7, № 1. – С. 79–103. – EDN YYSZVZ.

14. Черникова О.С., Марарескул Т.А. Двухэтапный подход к прогнозированию расхождения шкал времени на основе скорректированной линейной модели // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2023. – Т. 2. – С. 80–93.

15. Bawdekar A.A., Prusty B.R. Selection of stationarity tests for time series forecasting using reliability analysis // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – Art. 5687518. – P. 1–8. – DOI: 10.1155/2022/5687518.

Черникова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, идентификация динамических систем, планирование эксперимента. Имеет более 45 печатных работ. E-mail: chernikova@corp.nstu.ru

Черненко Наталья Александровна, старший преподаватель, заместитель декана факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – аварийность в электрических сетях, режимы нейтрали в сетях среднего класса напряжения, резисторы большой мощности. Имеет более 30 печатных работ. E-mail: N.Chernenko@corp.nstu.ru

Chernikova Oksana S., PhD, associate professor in Novosibirsk State Technical University. The main direction of her scientific research is mathematical modeling, identification of dynamic systems, and experiment design. She has more than 45 publications. E-mail: chernikova@corp.nstu.ru

Chernenko Natalia A., senior lecturer, vice-dean of the Faculty of Power Engineering of Novosibirsk State Technical University. The main direction of her scientific research is an accident rate in electrical networks, neutral modes in medium-voltage networks, and high-power resistors. She has more than 30 publications. E-mail: N.Chernenko@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-85-96

Determination of the dependence of the apparent density of ceramic samples on the molding moisture content of clay raw materials and compaction pressure based on regression models*

O.S. CHERNIKOVA^a, N.A. CHERNENKO^b

Novosibirsk State Technical University, 20 Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a *chernikova@corp.nstu.ru*

^b *N.Chernenko@corp.nstu.ru*

Abstract

The paper proposes to use white clay with the highest apparent density to improve the production of wire-ceramic resistors. Preliminary studies of white clay have shown that it is more sensitive to drying than red clay. The intensity of moisture output from the center of the product to its surface during the manufacturing process and the drying characteristics of white clay give greater shrinkage and strength of dry samples. Linear and nonlinear multiple regression models with and without multicollinearity are considered to find the dependence of the apparent density of clay raw materials on humidity and pressing pressure. To clarify the model structures, a two-stage approach is used, which involves building a model for residuals. It is found that the combination of a multiple regression model taking into account multicollinearity with an AR model constructed for residues makes it possible to calculate the apparent density of clay raw materials

* Received 25 August 2023.

with the smallest standard deviation from experimental data. The obtained model structures will be used to determine the optimal parameters of forming ceramic samples: the moisture content of clay raw materials and the compaction pressure, at which the greatest apparent density of samples is achieved. This will improve the production technology of wire-ceramic resistors. The use of wire-ceramic resistors based on white clay with the highest apparent density will speed up one of the stages of the technological process – drying and reduce their hygroscopicity. As a result of the use of wire-ceramic resistors with the highest apparent density, the mechanical strength of the products will increase, which will improve the operational characteristics and prolong the life of the products.

Keywords: apparent density of ceramic samples, porosity of raw materials, humidity of raw materials, compaction pressure, high-power resistor, wire-ceramic resistor, least squares method, regression, AR model

REFERENCES

1. Vrublevskii L.V., Zaitsev Yu.V., Tikhonov A.I. *Silovye rezistory* [Power resistors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p.
2. Martyushov K.I., Zaitsev Yu.V., Tikhonov A.I. *Metody rascheta rezistorov* [Methods of calculating resistors]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 207 p.
3. Tselebrovskij Yu.V., Verbitskaja T.V., Ledjaev G.N. *Sposob izgotovleniya vyso-kovol'nogo provolochnogo rezistora* [Method for manufacturing high-voltage wire-wound resistor]. Invention application RF, no. 94028412, 1996.
4. Tselebrovskii Yu.V. Raschet, konstruksiya i tekhnologiya izgotovleniya energoemkikh provolochno-keramicheskikh izdelii [Calculation, design and manufacturing technology of energy-intensive wire-ceramic products]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*, 2000, no. 11, pp. 60–64. (In Russian).
5. Krjukov D.O., Sel'meneva D.S. [Raw materials optimum moisture content determination and drying mode for wireceramic resistors manufacturing]. *Elektroenergetika glazami molodezhi* [Electric power industry through the eyes of youth]. Proceedings of the VI International youth scientific and technical conference, Ivanovo, 2015, vol. 1, pp. 508–511. (In Russian).
6. Ivanov A.I., Stolboushkin A.Yu., Storozhenko G.I. Printsipy sozdaniya optimal'noi struktury keramicheskogo kirpicha polusukhogo pressovaniya [Principles of creating an optimal structure of semi-dry pressed ceramic bricks]. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*, 2015, no. 4, pp. 65–69.
7. Salakhov A.M., Tagirov L.R., Salakhov R.A., Faseeva G.R., Khatsrinov A.I. Povyshenie prochnosti izdelii stroitel'noi keramiki: ot teorii k praktike [Increasing the strength of building ceramics products: from theory to practice]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of technological university*, 2011, no. 17, pp. 18–22.
8. Stolboushkin A.Yu., Stolboushkina O.A., Berdov G.I. Optimizatsiya parametrov pressovaniya granulirovannogo tekhnogennogo i prirodnogo syr'ya dlya proizvodstva keramicheskogo kirpicha [Optimization of pressing parameters of granular technogenic and natural raw materials for the production of ceramic bricks]. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*, 2013, no. 3, pp. 76–78.
9. Bates D., Watts D. *Nonlinear regression analysis and its applications*. New York, Wiley, 1988. 365 p.
10. Park J., Phillips P.C.B. Nonlinear regression with integrated time series. *Econometrica*, 2001, vol. 69 (1), pp. 117–161.
11. Russell J. *Obobshchennyi metod naimen'shikh kvadratov* [Generalized least squares method]. Moscow, VSD Publ., 2013. 971 p. (In Russian).
12. Bai J. Least squares estimation of a shift in linear Processes. *Journal of Time Series Analysis*, 1994, vol. 15 (5), pp. 453–472.
13. Kantorovich G.G. Analiz vremennykh ryadov [Time series analysis]. *Ekonomicheskii zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki = Higher School of Economics Economic Jour*, 2002, vol. 7, no. 1, pp. 87–110.
14. Chernikova O.S., Marareskul T.A. Dvukhetapnyi podkhod k prognozirovaniyu rashkhozheniya shkal vremeni na osnove skorrektirovannoi lineinoi modeli [A two-stage approach to forecasting the divergence of time scales based on an adjusted linear model]. *Zhurnal Belorusskogo*

gosu-darstvennogo universiteta. *Matematika. Informatika* = *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatic*, 2023, vol. 2, pp. 80–93.

15. Bawdekar A.A., Prusty B.R. Selection of stationarity tests for time series forecasting using reliability analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, art. 5687518, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2022/5687518.

Для цитирования:

Черникова О.С., Черненко Н.А. Определение зависимости кажущейся плотности керамических образцов от формовочной влажности глинистого сырья и давления прессования на основе регрессионных моделей // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 4 (92). – С. 85–96. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-85-96.

For citation:

Chernikova O.S., Chernenko N.A. Opredelenie zavisimosti kazhushcheisya plotnosti keramicheskikh obraztsov ot formovochnoi vlazhnosti glinistogo syr'ya i davleniya pressovaniya na osnove regressionnykh modelei [Determination of the dependence of the apparent density of ceramic samples on the molding moisture content of clay raw materials and compaction pressure based on regression models]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh* = *Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 4 (92), pp. 85–96. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-85-96.