

УДК. 691.42 : 681.3.06

Смирнов Денис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Гараев Тимур Раисович

старший преподаватель

E-mail: svist_@list.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Гарипова Диляра Руслановна

инженер 3 категории

E-mail: garipovadiluyara@mail.ru

ООО «ИК «Спектр»

Адрес организации: 420061, Россия, г. Казань, ул. Космонавтов, д. 44

Моделирование свойств стеновой керамики методами регрессионного анализа

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – получение математических моделей прочности на сжатие и водопоглощения стеновых керамических изделий в зависимости от суммарного содержания оксидов алюминия и титана, фракции <0,001 мм, пластичности и температуры обжига для умеренно-пластичного низкодисперсного глинистого сырья РТ.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в получении статистических регрессионных моделей, позволяющих для умеренно-пластичного низкодисперсного глинистого сырья прогнозировать прочность и водопоглощение, и на основании этого оперативно без проведения объёмных лабораторных испытаний корректировать по мере возможности маркшейдерские разработки в карьере или технологический процесс производства.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в подготовке прикладной математической основы, обеспечивающей возможность оптимизации эксплуатационных характеристик стеновой керамики. Заложена основа для дальнейшей статистической обработки данных для глин месторождений РТ.

Ключевые слова: стеновая керамика, прочность на сжатие, температура обжига, водопоглощение, регрессионный анализ.

Введение

В области производства керамических материалов анализ сырья с использованием компьютерного моделирования является актуальной задачей. Так, в работах Березовского В.В. и соавторов [1], Сорокина О.Ю. и соавторов [2], а также в ряде аналогичных работ [3-10], рассмотрены, в том числе, возможности применения различных математических способов моделирования эксплуатационных показателей авиационной керамики. Аналогичная работа ведется и в смежных областях – при производстве композиционных портландцементов, в работах Ермиловой Е.Ю., Рахимова Р.З. [11] рассчитывается количественный состав продуктов температурного синтеза термоактивированных смесей основе минерального сырья Республики Татарстан. Предполагается работоспособность описанных в литературе подходов для сферы строительной стеновой керамики. Цель работы – построение математической модели прочности и водопоглощения стеновых керамических материалов на основе умеренно-пластичного низкосортного глинистого сырья Республики Татарстан.

Для достижения данной цели решены следующие задачи: формализация задачи, сбор статистической информации по свойствам глин основных месторождений РТ, разработка структуры и формирование базы данных, применение методов регрессионного анализа. Полученные математические модели позволяют прогнозировать свойства изделий, и на основании этого оперативно без проведения объёмных лабораторных испытаний корректировать по мере возможности маркшейдерские разработки в карьере или технологический процесс производства.

Глинистое сырьё Республики Татарстан характеризуется повышенным содержанием крупнозернистых включений карбонатных пород, соответственно – обладает повышенной чувствительностью к сушке. В данных условиях требования ГОСТ 530-2012 к глинистому сырью выполняются не в полном объеме. В обозначенных обстоятельствах анализ сырья для выявления всех его положительных качеств должен осуществляться особенно тщательно.

Рекомендации по технологическим параметрам (температуре сушки и обжига, их продолжительности и т.п.) и заключение по показателям свойств изделий даются по результатам длительных, сначала лабораторно-технологических, а затем ползаводских испытаний, включающих формование лабораторных образцов, их сушку и обжиг при различных температурах, физико-механические испытания. При этом, не полностью учитывается возможность различной технологической переработки и корректировки состава полиминеральной сырьевой смеси, что и не представляется возможным из-за необходимости учёта большого числа факторов, существенно влияющих на конечные свойства продукции. Таким образом, могут остаться неиспользованными потенциальные возможности рассматриваемого глинистого сырья. Эта многофакторная проблема может быть разрешена использованием возможностей компьютерного моделирования.

Целью данных исследований является получение математических моделей прочности на сжатие и водопоглощения стеновых керамических изделий в зависимости от суммарного содержания оксидов алюминия и титана, фракции $<0,001$ мм, пластичности и температуры обжига для умеренно-пластичного низкодисперсного глинистого сырья РТ.

Для достижения данной цели решены следующие задачи: формализация задачи, сбор статистической информации по свойствам глин основных месторождений РТ, разработка структуры и формирование базы данных, применение методов регрессионного анализа.

Подготовка и построение регрессионных моделей

База данных, необходимая для работы алгоритмов моделирования свойств керамических изделий, была сформирована на основании отчётов исследований кирпичного глинистого сырья месторождений Республики Татарстан, проведённых Государственным всесоюзным научно-исследовательским институтом строительных материалов и конструкций им. П.П. Будникова «ВНИИСТРОМ», объединением «ТАТАРСТРОЙМАТЕРИАЛЫ» (центральной производственной, проектно-конструкторской и технологической лабораториями), Уральским научно-исследовательским институтом строительных материалов «УралНИИСТРОМПРОЕКТ». Всего изучена 421 проба восемнадцати месторождений кирпичных глин РТ.

Вся имеющаяся информация по характеристикам глин была выписана из отчётов и сведена в таблицы, на основании которых была создана база данных принципиально нового для стеновых керамических изделий типа, допускающая своё развитие как по количеству вводимых проб, так и по количеству рассматриваемых параметров. Она представлена в табличной форме, где первый столбец составляют поля, а первую строку – записи (табл.). В качестве полей базы были заданы свойства изделий (от Y_1 до Y_6) и параметры технологии и добавки с учётом резерва (авторами обозначены от X_1 до X_{100}).

Систематизированная информация в базе данных, позволяет осуществлять выборки для ввода в ПЭВМ по различным критериям: взаимной коррелированности параметров, степени заполненности и т.д. Это позволяет её использовать в различных программах моделирования свойств керамических изделий, в частности, в программе построения регрессионных моделей, что и было нами осуществлено и показано далее.

В процессе анализа сформированной базы данных, выявлена значительная коррелированность ряда параметров между собой, что накладывает существенные ограничения на количество учитываемых факторов. Неучитываемые параметры не на 100 % коррелированы с рассматриваемыми параметрами и, соответственно, несут в себе необходимую информацию, передаваемую через другие параметры. Таким образом, существенный объём информации закладывается как фактор случайного воздействия.

Таблица

Структура базы универсальной данных

| Группа полей | Поля базы данных | Обозначение полей базы данных |
|-------------------------|--|-------------------------------|
| Моделируемые функции | Предел прочности на сжатие | Y_1 |
| | Предел прочности на изгиб | Y_2 |
| | Плотность | Y_3 |
| | Водопоглощение | Y_4 |
| | Резервные эксплуатационные характеристики | Y_5-Y_8 |
| Параметры моделирования | Оксид кремния SiO_2 | X_1 |
| | Оксиды алюминия и титана $Al_2O_3+TiO_2$ | X_2 |
| | Оксид железа (II) FeO , | X_3 |
| | Оксид натрия Na_2O | X_4 |
| | Оксид калия K_2O | X_5 |
| | Оксид железа (III) Fe_2O_3 | X_6 |
| | Оксид кальция CaO | X_7 |
| | Потери при прокаливании (п.п.п.) | X_8-X_{11} |
| | Огнеупорность | X_{12} |
| | Пластичность | X_{13} |
| | фр. 0,01-0,005 мм, | X_{14} |
| | фр. 0,005-0,001 мм | X_{15} |
| | фр. <0,001 мм | X_{16} |
| | Общая усадка | X_{17} |
| | Воздушная усадка | X_{18} |
| | Огневая усадка | X_{19} |
| | Чувствительность к сушке по Чижскому (сек.) | X_{20} |
| | Формовочная влажность | X_{21} |
| | Температура оплавления | X_{22} |
| | Чувствительность к сушке, определяемая коэффициентом | X_{23} |
| | Деформации образцов | X_{24} |
| | Температура вспучивания | X_{25} |
| | Температура сушки | X_{26} |
| | Продолжительность сушки | X_{27} |
| | Резервные технологические параметры сушки (влажность входящего воздушного потока, скорость обдува и т.д.) | X_{28} |
| | Температура обжига | X_{29} |
| | Продолжительность обжига | X_{30} |
| | Резервные технологические параметры обжига (скорость изменения температуры, градиент теплового потока по высоте кладки и т.п.) | X_{31} |
| | ОГП (Отходы гальванических производств), | X_{32} |
| | ПЩ (Подмыльный щелок) | X_{33} |
| | СН (Сульфат натрия) | X_{34} |
| | Шелуха гречихи | X_{35} |
| | Древесная пыль | X_{36} |
| | Опилки | X_{37} |
| | Уголь | X_{38} |
| | Шамот | X_{39} |
| | Зола | X_{40} |
| | Песок | X_{41} |
| | Дегидратированная глина | X_{42} |
| | Картонная крошка | X_{43} |
| | Жидкое стекло | X_{44} |
| | Резервные параметры по вводу добавок | $X_{45}-X_{100}$ |

Если выясняется, что разброс значений неучитываемых (по причине коррелированности с рассматриваемыми) параметров, несущих в себе информацию, непередаваемую

другими факторами, недопустимо велик, т.е. в фактор случайного воздействия внесён существенный объём информации, то сформированные модели свойств не представляют практическую ценность. С учетом обозначенного требования по коррелированности варьируемых параметров – для моделирования эксплуатационных показателей был выбран ряд параметров, удовлетворяющих требованиям регрессионного анализа.

Для осуществления количественного подхода к оценке глинистого сырья, на данный момент получены математические модели прочности на сжатие и водопоглощения изделий на основе умеренно пластичного низкодисперсного глинистого сырья, характерного для ряда месторождений РТ, в зависимости от суммарного содержания оксидов алюминия и титана, фракции <0,001 мм, пластичности и температуры обжига. Все модели построены для условий: способ производства – пластическое формование с вакуумированием при разряжении до 700 мм рт.ст.; предварительный помол глины на бегунах, вальцах и в глиномешалке различных типов. Не учитываемые моделями технологические параметры лежат в следующих пределах: продолжительность сушки в камерах – 48-77 часов; характеристики теплоносителя на входе: температура – 29-54 °С, влажность – 19-27 %, влагосодержание – 10-15 г/кг; характеристики теплоносителя на выходе: температура – 21-31 °С, влажность – 92-96 %, влагосодержание – 15,5-27 г/кг; режим обжига: подъём до 100 °С – 4-5 часов, от 100 до 680 °С – 11-18 часов, от 680 до 950 °С – 6-7 часов, от 950 до 1000/1050/1100°С – 1-2 часа, выдержка – 1-4 часа, постепенное охлаждение до 50/60 °С – 12-24 часа.

Для умереннопластичного низкодисперсного сырья Кукморского, Елабужского, Лукошкинского, Южно-Чистопольского, Шармалинского, Старо-Гришкинского, Кукчинского, Ключищинского месторождений от выбранных параметров моделирования получены модели прочности:

$$Y_1 [\text{кг/см}^2] = -910,993 + 10,339X_{13} + 57,674X_{16} + 0,269X_{29} - 4,595X_{13}X_{16} \quad (1)$$

и водопоглощения:

$$Y_4 [\text{процент по массе}] = -26,292 + 3,333X_2 + 2,814X_{13} - 0,39X_{16} + 0,026X_{29} - 0,062X_{13}X_{16} + 0,089X_{13}X_{13} - 0,248X_2X_{13} + 0,067X_2X_{16} - 0,002X_2X_{29}, \quad (2)$$

где X_2 – процент содержания по массе ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$); X_{13} – пластичность; X_{16} – процент фракции <0,001; X_{29} – температура обжига. Нумерация параметров сквозная, соответствующая базе данных.

Из анализа значений коэффициентов при параметрах в построенных регрессионных моделях выявлена степень влияния на конечные свойства каждого из взаимозависимых (исключая t °С обжига) рассматриваемых параметров. На прочность наибольшее влияние по мере убывания оказывают – содержание глинистой фракции <0,001 мм, пластичность, а на водопоглощение – содержание ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$), пластичность. На рис. 1-2 представлены поверхности, описываемые построенными моделями.

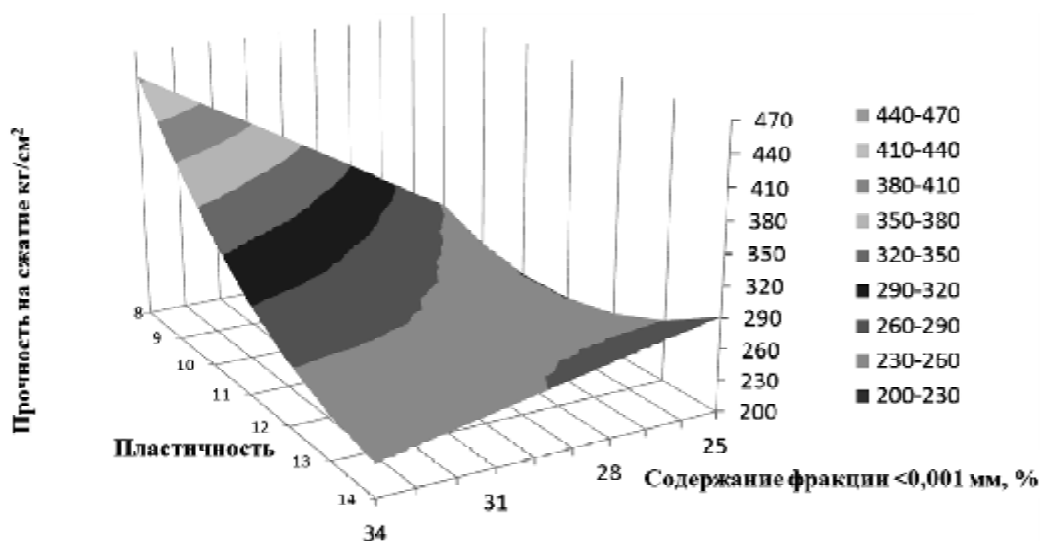


Рис. 1. Влияние содержания глинистой фракции и пластичности на прочность изделий на основе умеренно-пластичного низкодисперсного сырья (иллюстрация авторов)

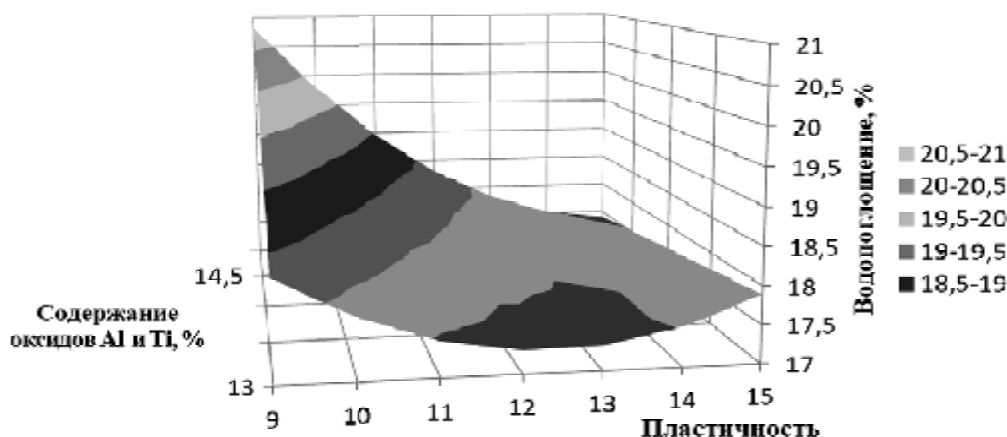


Рис. 2. Влияние содержания ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) и пластичности на водопоглощение изделий на основе умеренно-пластичного низкодисперсного сырья (иллюстрация авторов)

В качестве осей координат взяты параметры, оказывающие наибольшее влияние на моделируемое свойство. За константы приняты: на рис. 1 – содержание ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) – 14 %, на рис. 2 содержание фракции $<0,001$ мм – 29 %, температура обжига 900 °С для обеих диаграмм.

Измерения произведены с доверительной вероятностью или надежностью P -серии измерений. Вероятность попадания истинного значения измеряемой величины в данный интервал выражена в долях единицы. Интервал, в который попадает истинное значение контрольной величины с заданной доверительной вероятностью $P(\Delta x)$, называют доверительным интервалом или интервалом надежности – Δx .

Чем больше доверительный интервал, тем больше доверительная вероятность того, что результат измерения попадет в него. Величина доверительного интервала рассчитана методами теории вероятностей и математической статистики и определена выбором вида функции распределения случайных величин $f(\Delta x)$.

Перед измерениями, предварительно определены пределы точности данных приборов (инструментальные погрешности). Равноточные измерения исходных параметров и моделируемых функций произведены три раза и занесены в таблицу, с учетом инструментальной погрешности.

В рамках рассматриваемой задачи полученная погрешность измерения, как исходных параметров, так и эксплуатационных показателей (прочности на сжатие и водопоглощения), значительно меньше инструментальной. Соответственно, доверительная вероятность в результатах не указывается.

Найдено среднее значение, оценено среднеквадратичное отклонение. По заданному значению надежности и числу измерений, найдена случайная составляющую погрешности. Полная погрешность вычислена как корень квадратный из суммы квадратов случайной и инструментальной составляющих.

На основании произведенного контроля можно сделать вывод об адекватности построенных регрессионных моделей.

С точки зрения характера изменения прочностных характеристик от рассматриваемых параметров сырья, наиболее интересен факт «седловидного» падения прочности. Анализ диаграммы позволяет идентифицировать факт возврата к относительно высоким прочностным характеристикам с ростом содержания фракции $<0,001$ мм. Данное обстоятельство позволяет предположить, а впоследствии экспериментально подтвердить возможность использования методов механоактивации глинистого сырья с высокой пластичностью с целью возврата прочностных характеристик глинистых смесей в расчетные первоначально высокие значения.

Последующий анализ возможных физико-химических причин закономерности, выявленной в процессе моделирования, позволяет предположить, что наблюдаемое восстановление прочностных показателей при прочих равных условиях, является следствием увеличения удельной поверхности спекаемых минеральных частиц. Объем образования стеклофазы для выбранных глин при температуре обжига стеновой

керамики, обеспечивает связывание увеличенного количества частиц при сохранении скелета массива. Для подтверждения выдвинутого предположения необходимо проведение исследования микроструктуры керамического черепка выделенных составов.

Параллельно с рассматриваемой задачей рассматривалось влияние выгорающего отощителя глинистого сырья на прочностные характеристики и технологические параметры. На рис. 3 приведены отрицательные результаты введения избыточного количества отощителя.

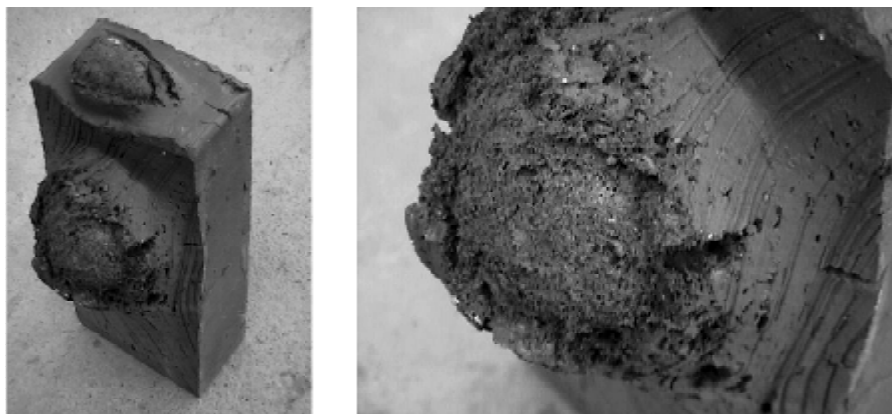


Рис. 3. Макросъемка характера разрушения кирпича в процессе обжига (иллюстрация авторов)

Изначально предполагаемая возможность внесения значимого объема отощающих добавок на основании эксперимента опровергнута. Таким образом, следующим шагом встает вопрос расширения регрессионной модели параметрами, отражающими процент введения выгорающего отощителя в состав шихты. Вместе с тем, поскольку технологические параметры одновременного внесения добавок в состав шихты являются в значительной степени коррелированными между собой (в силу замкнутости системы), необходим учет данного обстоятельства при поиске. Таким образом, помимо задачи расширения набора регрессионных моделей эксплуатационных параметров стеновой керамики, стоит вопрос разработки прикладного математического аппарата прогнозирования свойств материалов в зависимости от степени коррелированных между собой параметров сырьевых смесей.

Заключение

Полученные математические модели позволяют для умеренно-пластичного низкодисперсного глинистого сырья прогнозировать прочность и водопоглощение, и на основании этого оперативно без проведения объёмных лабораторных испытаний корректировать по мере возможности маркшейдерские разработки в карьере или технологический процесс производства.

Список библиографических ссылок

1. Березовский В. В., Шавнев А. А., Ломов С. Б., Курганова Ю. А. Получение и анализ структуры дисперсноупрочненных композиционных материалов системы Al-SiC с различным содержанием армирующей фазы // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S6. С. 17–23.
2. Сорокин О. Ю., Солнцев С. С., Евдокимов С. А., Осин И. В. Метод гибридного искрового плазменного спекания: принцип, возможности, перспективы применения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S6. С. 11–16.
3. Гришина О. И., Шавнев А. А., Серпова В. М. Особенности влияния структурных параметров на механические характеристики металлического композиционного материала на основе алюминиевых сплавов, упрочненных частицами карбида кремния (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S6. С. 24–27.

4. Курбаткина Е. И., Косолапов Д. В., Ходыкин Л. Г., Нигметов М. С. Исследование влияния добавки кремния на фазовый состав алюминиевых композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S6. С. 35–38.
5. Нариков К. А., Жанторе А. У. Исследование свойств стеновой керамики с использованием механоактивированной композиционной добавки // *Молодой ученый*. 2015. № 20. С. 49–51.
6. Бондарюк А. Г. Стеновые керамические изделия на основе опок Баканского месторождения (Краснодарский край) // *Строительные материалы*. 2009. № 4. С. 5–7.
7. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33.
8. Fides M., Kovalcikova A., Hvizdos P. Mechanical and tribological properties of electrically conductive SiC based cermets // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. № 65. P. 76–82.
9. Gupta S., Sharma S. K., Kumar B. V. M., Kim Y.-W. Tribological characteristics of SiC ceramics sintered with a small amount of yttria // *Ceramics International*. 2015. № 41. P. 14780–14789.
10. Kim Y.-W., Cho T. Y., Kim K. J. Effect of grain growth on electrical properties of silicon carbide ceramics sintered with gadolinia and yttria // *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. № 35. P. 4137–4142
11. Ермилова Е. Ю., Рахимов Р. З. Рентгенофазовый анализ образцов термоактивированных смесей на основе минерального сырья Республики Татарстан // *Вестник Казанского технологического университета*. 2018. № 10. С. 11–15.

Smirnov Denis Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Garaev Timur Raisovich

senior lecturer

E-mail: svist@list.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Garipova Dilyara Ruslanovna

3rd category engineer

E-mail: garipovadilyara@gmail.com

LLC «IK «Spektr»

The organization address: 420061, Russia, Kazan, Kosmonavt st., 44

Modelling the properties of wall ceramics by regression analysis**Abstract**

Problem statement. The research data is to obtain mathematical models with a high degree of compression and water absorption of wall ceramic products, depending on the total content of aluminium oxides, titanium, fractions <0,001 mm, ductility and firing temperature for moderately ductile low-disperse clay raw materials of RT.

Results. The main results of the study consist in obtaining statistical regression models that allow predicting strength and watering absorption for moderately ductile low-dispersing clay raw materials and based on this, quickly, without carrying out volumetric laboratory tests, adjusting mine surveying developments in the quarry or the production process as far as possible.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the preparation of an applied mathematical basis that provides the opportunity to optimize the

operational characteristics of wall ceramics. The foundation has been laid for further statistical processing of data for clay deposits of the Republic of Tatarstan.

Keywords: wall ceramics, compressive strength, firing temperature, water absorption, regression analysis.

References

1. Berezovsky V. V., Shavnev A. A., Lomov S. B., Kurganova Yu. A. Obtaining and analysis of the structure of dispersion-strengthened composite materials of the Al–SiC system with different contents of the reinforcing phase // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2014. № S6. P. 17–23.
2. Sorokin O. Yu., Solntsev S. S., Evdokimov S. A., Osin I. V. Hybrid spark plasma sintering method: principle, capabilities, application prospects // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2014. № S6. P. 11–16.
3. Grishina O. I., Shavnev A. A., Serpova V. M. Features of the influence of structural parameters on the mechanical characteristics of a metal composite material based on aluminum alloys hardened by silicon carbide particles (review) // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2014. № S6. P. 24–27.
4. Kurbatkina E. I., Kosolapov D. V., Khodykin L. G., Nigmatov M. S. Investigation of the effect of silicon additives on the phase composition of aluminum composite materials reinforced with silicon carbide particles // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2014. № S6. P. 35–38.
5. Narikov K. A., Zhantore A. U. The study of the properties of wall ceramics using mechanically activated composite additives // *Molodoy uchenyy*. 2015. № 20. P. 49–51.
6. Bondaryuk A. G. Wall ceramic products based on flasks of the Bakanskoye deposit (Krasnodar region) // *Stroitel'nyye materialy*. 2009. № 4. P. 5–7.
7. Kablov E. N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC RF on the implementation of «Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030» // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2015. № 1 (34). P. 3–33.
8. Fides M., Kovalcikova A., Hvizdos P. Mechanical and tribological properties of electrically conductive SiC based cermets // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. № 65. P. 76–82.
9. Gupta S., Sharma S. K., Kumar B. V. M., Kim Y.-W. Tribological characteristics of SiC ceramics sintered with a small amount of yttria // *Ceramics International*. 2015. № 41. P. 14780–14789.
10. Kim Y.-W., Cho T. Y., Kim K. J. Effect of grain growth on electrical properties of silicon carbide ceramics sintered with gadolinia and yttria // *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. № 35. P. 4137–4142.
11. Ermilova E. Yu., Rakhimov R. Z. X-ray phase analysis of samples of thermally activated mixtures based on mineral raw materials of the Republic of Tatarstan // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2018. № 10. P. 11–15.