 © Авторы статьи / Authors of the article

ТЕХНОЛОГИЯ СИЛИКАТНЫХ И ТУГОПЛАВКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ/TECHNOLOGY OF SILICATE AND REFRACTORY NON-METALLIC MATERIALS

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26 EDN: MRQSHQ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЛИНЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЯМЕТИН (РЕСПУБЛИКА СОЮЗ МЬЯНМА) ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

Научная статья

Зо Т.М.[1], Попова Н.А.[2], Вартанян М.А.[3,] *

[3] ORCID : 0000-0002-3811-0649;

[1, 2, 3] Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mariavartanyan[at]mail.ru)

Предложена: 29.05.2026; Принята: 31.07.2026; Опубликована: 17.08.2026

Аннотация

В данной работе проведено комплексное исследование физико-химических и технологических свойств глинистого сырья месторождения Яметин (Республика Союз Мьянма) с целью оценки его пригодности для производства высокопористой керамики. Методами рентгенофазового анализа, химического состава, пластичности, прессуемости, термического анализа изучены основные характеристики материала. Установлено, что глинистое сырье содержит порядка 70% SiO_2 и 19% Al_2O_3 с преобладанием каолинита. Определены оптимальные параметры формования (давление прессования 100–150 МПа) и обжига (1100–1150 °С), обеспечивающие открытую пористость 23–28% и прочность при изгибе до 10,8 МПа. Особое внимание уделено анализу влияния температуры обжига на изменение пористой структуры. Результаты демонстрируют перспективность использования данного сырья для изготовления теплоизоляционной и фильтрационной керамики после соответствующей модификации состава.

Ключевые слова: глина Яметин, высокопористая керамика, минеральный состав, термические свойства, пористость, прочность.

A STUDY OF THE PHYSICOCHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CLAY FROM THE YAMETHIN DEPOSIT (REPUBLIC OF THE UNION OF MYANMAR) FOR THE PRODUCTION OF HIGHLY POROUS CERAMICS

Research article

Zaw T.M.[1], Popova N.A.[2], Vartanyan M.A.[3,] *

[3] ORCID : 0000-0002-3811-0649;

[1, 2, 3] D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (mariavartanyan[at]mail.ru)

Suggested: 29.05.2026; Accepted: 31.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

This work presents a complex study of the physico-chemical and technological properties of clay raw materials from the Yamethin deposit (Republic of the Union of Myanmar) with the aim of assessing their suitability for the production of highly porous ceramics. The main characteristics of the material were examined using X-ray phase analysis, chemical composition analysis, and tests for plasticity, pressability and thermal analysis. It was established that the clay raw material contains approximately 70% SiO_2 and 19% Al_2O_3, with a predominance of kaolinite. Optimal forming parameters (pressing pressure of 100–150 MPa) and firing parameters (1100–1150 °C) were determined, yielding an open porosity of 23–28% and a flexural strength of up to 10.8 MPa. Particular attention was paid to analysing the effect of firing temperature on changes in the porous structure. The results demonstrate the potential for using this raw material to manufacture thermal insulation and filtration ceramics following appropriate modification of the composition.

Keywords: Yamethin clay, highly porous ceramics, mineral composition, thermal properties, porosity, strength.

Введение

Глинистое сырье имеет большое значение в связи с его обширным применением в различных отраслях государства. Поэтому важным является изучение свойств глинистых пород. Глинистое сырье широко используется в производстве строительных материалов — кирпича, керамзита, плитки, керамических труб; хозяйственно-бытовой посуды; огнеупоров; в водоподготовке — для очистки сточных вод от твёрдых веществ; в косметологии: для изготовления различных косметических продуктов; в сельском хозяйстве и пр.

Открытие нового месторождения требует проведения исследований и изучения свойств глинистых материалов, что в дальнейшем может привести к открытию производства в зоне залежи глинистого сырья. Открытие и изучение новых источников сырья позволяет расширить ресурсную базу и снизить зависимость от ограниченных источников, что важно для обеспечения устойчивого развития и улучшения экономической ситуации в стране. Не менее важным является оценка влияния нового источника сырья на окружающую среду, благодаря исследованию мы сможем оценить и разработать методы экологически безопасного его использования.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таким образом, открытие нового месторождения глин Яметин в Республике Союз Мьянма может благоприятно воздействовать на развитие экономики центрального региона страны, способствуя увеличению объёма производства, поможет снизить зависимость от уже имеющихся источников, поспособствует укреплению экономических связей между Мьянмой и другими странами. Современные тенденции в материаловедении характеризуются повышенным интересом к разработке пористых керамических материалов, которые находят применение в качестве теплоизоляторов, фильтрующих элементов и биокерамики [1]. Особую ценность представляют месторождения глин с уникальными свойствами, требующие детального изучения. Глины Республики Союз Мьянма, в частности месторождения Яметин, остаются недостаточно исследованными, несмотря на их значительный промышленный потенциал [2], [3], [4], [5].

Актуальность настоящего исследования обусловлена совокупностью факторов. Во-первых, существует необходимость расширения сырьевой базы для производства пористой керамики, что особенно важно в условиях ограниченности традиционных источников качественного глинистого сырья. Во-вторых, наблюдается устойчивый рост спроса на экологически безопасные материалы с низкой теплопроводностью, востребованные в строительной и теплоизоляционной отраслях. В-третьих, в настоящее время отсутствуют систематические данные о свойствах глин рассматриваемого региона, что затрудняет их целенаправленное промышленное использование.

В связи с этим целью настоящей работы является комплексное исследование минералогического, химического и физико-механического состава глины данного месторождения, а также разработка рекомендаций по их применению для получения пористых керамических материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Методы и принципы исследования

2.1. Характеристика образцов

Исследуемые образцы глины были отобраны в районе месторождения Яметин (центральная часть Мьянмы). Визуально материал представляет собой однородную массу светло-коричневого цвета с включениями песчаных частиц. Предварительная подготовка проб включала сушку при температуре 105 °C до постоянной массы, последующее измельчение материала в шаровой мельнице и просеивание полученного порошка через сито 0074.

2.2. Методы исследования

Для всесторонней характеристики материала применён комплекс современных аналитических методов. Химический состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре ARLAdvant'X; потери при прокаливании (ППП) фиксировали при 1000 °C. Минералогический состав изучали с использованием рентгенофазового анализа (РФА) [6] на дифрактометре ДРОН-3М в Cu-Kα излучении, интерпретация дифрактограмм проводилась с применением базы данных PDF-2. Физико-механические свойства глинистого сырья исследовали по следующим параметрам: пластичность определяли на приборе Васильева; прессуемость — по результатам формования образцов при давлениях 50, 100 и 150 МПа [7]; спекаемость — печным способом по данным обжига в диапазоне температур 900–1400 °C (скорость нагревания 3 °C/мин., продолжительность выдержки при конечной температуре 2 ч) [8]. Пористость обожженного материала определяли по методике ГОСТ 21216-2014 с последующим расчётом открытой пористости и кажущейся плотности; жидкость насыщения — вода [9]. Определение механической прочности при трехточечном изгибе проводили на образцах в виде балочек размером 40*6*6 мм при комнатной температуре по методике ГОСТ 24409-80 [10].

Результаты и обсуждение

3.1. Химический и минеральный состав

Результаты химического анализа (табл. 1) свидетельствуют о том, что глина месторождения Яметин относится к высококремнеземистым разновидностям с содержанием SiO_2 70,61 мас. %. Сравнительно высокая доля Al_2O_3 (19,06 мас. %) указывает на потенциально хорошие огнеупорные свойства. Присутствие оксидов железа (3,15 мас. %) ограничивает применение в производстве белой керамики, но не является критичным для теплоизоляционных материалов.

Таблица 1 - Химический состав глинистого сырья

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.1

Глина	SiO_2, мас.%	Al_2O_{32}, мас.%	Fe_2O_{32}, мас.%	TiO_{22}, мас.%	CaO_2, мас.%	MgO_2, мас.%	Na_2O_2, мас.%	K_2O_2, мас.%	$ППП_2$, мас.%
Яметин	70,61	19,06	3,15	1,35	0,58	1,85	0,57	0,92	9,81

 © Авторы статьи / Authors of the article

Рентгенофазовый анализ (рис. 1) выявил наличие следующих основных минеральных фаз. Основу образца составляет каолинит ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), доля которого варьируется в пределах 65–70%. Вторым по содержанию компонентом является кварц (SiO_2) — 20–25%. Также в меньших количествах присутствует иллит [$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2\cdot(H_2O)]$], содержание которого составляет 5–10%.

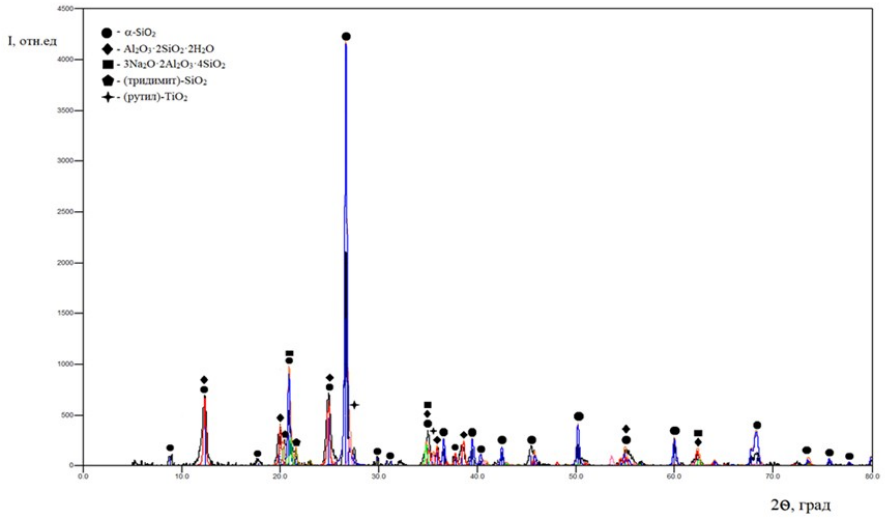

Рисунок 1 - Фазовый состав глины месторождения Яметин
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.2

3.2. Пластические и реологические свойства

Исследование пластических характеристик показало низкую пластичность материала. Число пластичности составило 1,1, что указывает на ограниченные деформационные способности. Граница текучести равнялась 10,8, а граница раскатывания — 9,7. Такие значения указывают на необходимость введения пластифицирующих добавок (например, бентонита) для улучшения формовочных свойств. Реологические исследования шликера выявили его склонность к тиксотропному загустеванию, что важно учитывать при литьевом формовании.

3.3. Влияние давления прессования

Данные табл. 2 демонстрируют прямую зависимость между давлением прессования и плотностью образцов. Увеличение давления с 50 до 150 МПа приводит к росту общей плотности с 2,28 до 2,39 г/см³. При этом плотность в пересчёте на минеральное вещество возрастает с 2,05 до 2,16 г/см³, что свидетельствует о более эффективном удалении пор при высоких давлениях.

Таблица 2 - Прессуемость глинистого сырья

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.3

Давление прессования, МПа	Плотность общая, г/см^3	Плотность в пересчете на минеральное вещество, г/см^3
50	2,28 ± 0,02	2,05 ± 0,02
100	2,36 ± 0,02	2,13 ± 0,02
150	2,39 ± 0,02	2,16 ± 0,02

3.4. Поведение глины в обжиге

Анализ полученных зависимостей величин кажущейся плотности, открытой пористости, водопоглощения и линейной усадки (рис. 2-5) позволяет выделить три характерных температурных диапазона. В интервале температур 900–1200 °C наблюдается этап постепенного удаления физически связанной воды и начальных стадий спекания материала. При температурах 1250–1300 °C начинается интенсивное спекание, сопровождающееся залечиванием пор, формированием плотной структуры черепка и, как следствие, значительным ростом прочностных характеристик материала, что особенно наглядно проявляется для образцов, обожженных при температуре 1300 °C. В диапазоне температур 1350–1400 °C фиксируется перегрев образцов, который может приводить к деструкции структуры (т.н. «пережогу») и снижению эксплуатационных свойств.

 © Авторы статьи / Authors of the article

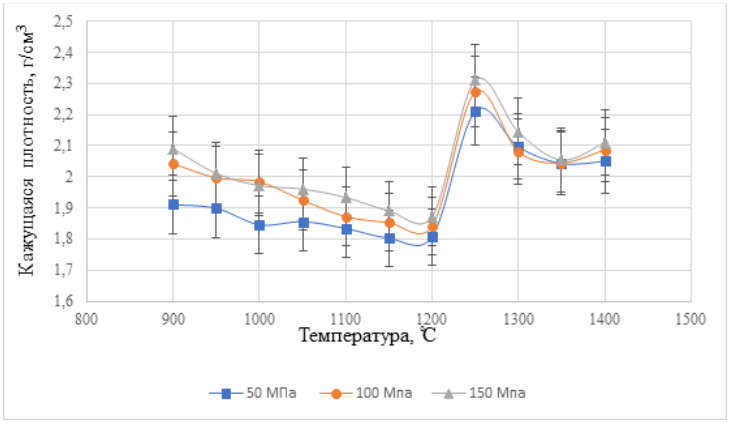

Рисунок 2 - Температурная зависимость кажущейся плотности образцов, отпрессованных при различном давлении
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.4

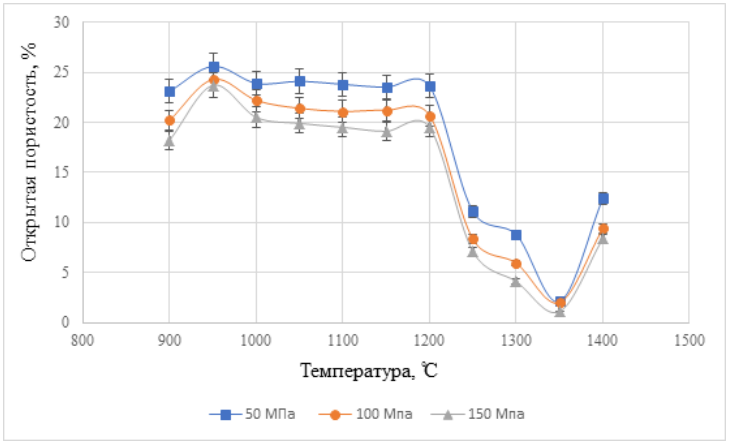

Рисунок 3 - Зависимость открытой пористости образцов от температуры обжига и давления прессования
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.5

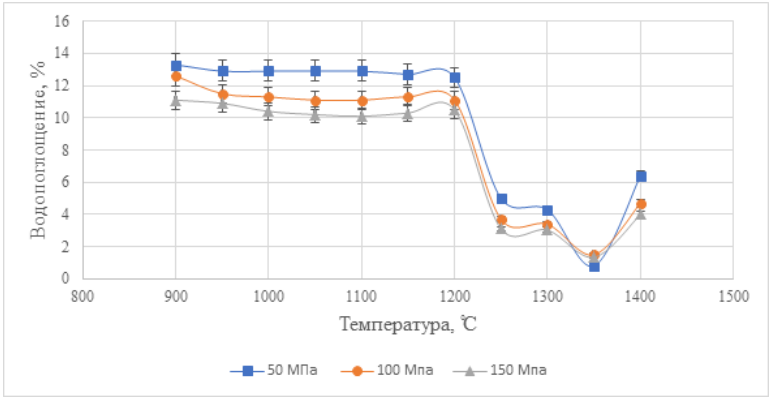

Рисунок 4 - Влияние давления прессования и температуры обжига на величину водопоглощения обожженной глины
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.6

 © Авторы статьи / Authors of the article

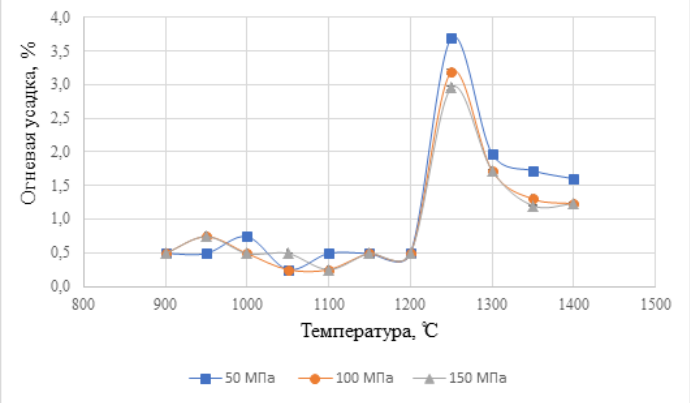

Рисунок 5 - Температурная зависимость изменения линейных размеров образцов, полученных при различном давлении прессования

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.7

3.5. Физико-механические свойства

Физико-механические свойства исследуемой глины в зависимости от приложенного давления прессования оценивали по величине прочности при изгибе. Исследование проводили на образцах, обожженных при температурах от 900 до 1400 °C. Результаты исследований представлены в табл. 3. В результате показано, что с повышением температуры обжига предел прочности при изгибе увеличивается, резкое уменьшение происходит при температуре 1350 °C. Максимальное значение предела прочности при изгибе достигается при давлении прессования и температуре обжига 150 МПа и 1300 °C соответственно.

Таблица 3 - Прочностные характеристики обожженной глины

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.26.8

Температура обжига, ℃	Предел прочности при изгибе, МПа, при давлении прессования, МПа		
	50	100	150
900	1,7 ± 0,1	4,1 ± 0,3	4,3 ± 0,3
950	1,9 ± 0,2	3,6 ± 0,3	4,2 ± 0,3
1000	2,1 ± 0,2	3,8 ± 0,3	4,3 ± 0,3
1050	4,3 ± 0,3	8,8 ± 0,7	7,0 ± 0,6
1100	5,2 ± 0,4	9,6 ± 0,8	10,8 ± 0,9
1150	5,7 ± 0,5	9,6 ± 0,8	10,1 ± 0,8
1200	6,8 ± 0,5	8,4 ± 0,7	9,4 ± 0,8
1250	12,9 ± 1,0	16,4 ± 1,3	18,1 ± 1,5
1300	13,8 ± 1,1	18,5 ± 0,9	19,4 ± 1,6
1350	15,4 ± 1,2	16,0 ± 1,3	13,9 ± 1,1
1400	13,6 ± 1,1	16,6 ± 1,3	16,4 ± 1,3

3.6. Оптимизация технологических параметров для получения высокопористой керамики

На основании полученных данных были предложены следующие направления модификации состава и технологии обработки материала на основе исследуемой глины. Для регулирования пористости и снижения плотности при производстве высокопористой керамики рекомендуется вводить 20–30% выгорающих добавок, таких как древесные опилки или полистирольные микросферы; это даст возможность получать материал с повышенной проницаемостью, а также формировать мультимодальную поровую структуру. Исходя из химического и минерального состава глины Яметин, эффективным представляется использование комбинированного режима термообработки: предварительный нагрев до температуры 600 °C обеспечивает полное выгорание органических добавок, после чего проводится основной обжиг в интервале температур 1100–1150 °C. Кроме того, введение 5–7% флюсующих добавок способствует снижению температуры спекания и интенсификации процессов уплотнения структуры.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что глина месторождения Яметин (Республика Союз Мьянма) характеризуется высоким содержанием SiO_2 (70,61 мас. %) и сравнительно высоким — Al_2O_3 (19,06 мас. %), с преобладанием каолинитовой фазы. Определены технологические параметры, которые обеспечивают достижение наилучших структурных характеристик при получении высокопористого керамического материала — давление прессования 150 МПа, температура обжига 1100–1150 °C. Показано, что образцы, обожженные при 1150 °C, обладают

 © Авторы статьи / Authors of the article

открытой пористостью 23–28% и прочностью на изгиб до 10,8 МПа. Предложены возможные направления модификации состава для получения высокопористой керамики с заданными свойствами.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bergaya F. Handbook of Clay Science / F. Bergaya, G. Lagaly. — Amsterdam: Elsevier, 2013. — 1758 p.
2. Tin M.L. Investigation on the Variations of Soil Properties of Different Agricultural Soils in Central Myanmar / M.L. Tin, P.K. Ei, S.Y. San et al. // Journal of Scientific and Innovative Research. — 2022. — № 11 (1). — P. 1–7. — DOI: 10.31254/jsir.2022.11101
3. Hai N.Q. Clay mineralogical composition of some soils in Myanmar / N.Q. Hai, K. Egashira, A.T. Aye et al. // Clay Science. — 2006. — № 13 (3). — P. 93–100. — DOI: 10.11362/jcssjclayscience1960.13.93
4. Kyaw K.K. Clay resources of Myanmar: a review / K.K. Kyaw, T.T. Tin, T. Hlaing // Myanmar Journal of Earth Sciences. — 2015. — № 2 (1). — P. 45–56.
5. Aung N.N. Mineral resources of Myanmar: classification and distribution / N.N. Aung, K. Win // Journal of the Myanmar Academy of Arts and Science. — 2018. — № 16 (3). — P. 123–138.
6. Горшков В.С. Вяжущие, керамические и композиционные материалы / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. — Москва: Стройиздат, 1995. — 576 с.
7. Гузман И.Я. Практикум по технологии керамики / И.Я. Гузман. — Москва: Стройматериалы, 2005. — 336 с.
8. Гузман И.Я. Химическая технология керамики / И.Я. Гузман. — Москва: СТРОЙМАТЕРИАЛЫ, 2012. — 493 с.
9. ГОСТ 21216-2014 Сырье глинистое. Методы испытаний. — Введ. 2015-07-01. — Москва: Стандартинформ, 2015. — 3 С.
10. ГОСТ 24409-80 Материалы керамические электротехнические. Методы испытаний. — Введ. 1982-01-01. — Москва: Стандартинформ, 1982. — 30 С.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bergaya F. Handbook of Clay Science / F. Bergaya, G. Lagaly. — Amsterdam: Elsevier, 2013. — 1758 p.
2. Tin M.L. Investigation on the Variations of Soil Properties of Different Agricultural Soils in Central Myanmar / M.L. Tin, P.K. Ei, S.Y. San et al. // Journal of Scientific and Innovative Research. — 2022. — № 11 (1). — P. 1–7. — DOI: 10.31254/jsir.2022.11101
3. Hai N.Q. Clay mineralogical composition of some soils in Myanmar / N.Q. Hai, K. Egashira, A.T. Aye et al. // Clay Science. — 2006. — № 13 (3). — P. 93–100. — DOI: 10.11362/jcssjclayscience1960.13.93
4. Kyaw K.K. Clay resources of Myanmar: a review / K.K. Kyaw, T.T. Tin, T. Hlaing // Myanmar Journal of Earth Sciences. — 2015. — № 2 (1). — P. 45–56.
5. Aung N.N. Mineral resources of Myanmar: classification and distribution / N.N. Aung, K. Win // Journal of the Myanmar Academy of Arts and Science. — 2018. — № 16 (3). — P. 123–138.
6. Gorshkov V.S. Vyazhushhie, keramicheskie i kompozicionny'e materialy' [Binders, ceramics and composite materials] / V.S. Gorshkov, V.G. Savel'ev, A.V. Abakumov. — Moscow: Strojizdat, 1995. — 576 p. [in Russian]
7. Guzman I.Ya. Praktikum po texnologii keramiki [Tutorial on technology of ceramics] / I.Ya. Guzman. — Moscow: Strojmaterialy', 2005. — 336 p. [in Russian]
8. Guzman I.Ya. Ximicheskaya texnologiya keramiki [Chemical Technology of Ceramics] / I.Ya. Guzman. — Moscow: STROJMATERIALY', 2012. — 493 p. [in Russian]
9. GOST 21216-2014 Sy'r'e glinistoe. Metody' ispy'tanij [GOST 21216-2014 Clay raw materials. Methods of testing]. — Introduced 2015-07-01. — Moscow: Standartinform, 2015. — 3 P. [in Russian]
10. GOST 24409-80 Materialy' keramicheskie e'lektrotexnicheskie. Metody' ispy'tanij [GOST 24409-80 Ceramic electrotechnical materials. Methods of testing]. — Introduced 1982-01-01. — Moscow: Standartinform, 1982. — 30 P. [in Russian]