

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ В ИСХОДНОМ СЫРЬЕ ОСАДКОВ ХИМИЧЕСКОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ

## INVESTIGATION OF INFLUENCE OF CHEMICAL WATER TREATMENT SEDIMENTS CONTENT IN INITIAL RAW MATERIAL ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PAVING TILES

УДК 691.4

**А.В. Гречаников<sup>1\*</sup>, А.С. Ковчур<sup>1</sup>, В.Н. Потоцкий<sup>1</sup>, И.А. Тимонов<sup>1</sup>, А.И. Лятос<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Витебский государственный технологический университет

<sup>2</sup> Витебский государственный университет им. П.И. Машерова

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-1-115-123>

**A. Hrachanikau<sup>1\*</sup>, A. Kovchur<sup>1</sup>, V. Patotski<sup>1</sup>, I. Tsimanav<sup>1</sup>, A. Liatas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Vitebsk State Technological University

<sup>2</sup> Vitebsk State University named after P.M. Masherov

### РЕФЕРАТ

*КЛИНКЕР, КЛИНКЕРНАЯ ТРОТУАРНАЯ ПЛИТКА, ТЕХНОГЕННЫЕ ПРОДУКТЫ, ОСАДКИ ХИМИЧЕСКОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ, ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ, КЕРАМИЧЕСКИЙ КЛИНКЕРНЫЙ КИРПИЧ*

*Целью представленной работы является исследование влияния содержания в исходном сырье осадков химической водоподготовки на физико-механические свойства тротуарной плитки и технологические параметры ее производства. Проведенные предварительные исследования по использованию техногенных продуктов энергетического комплекса (осадков химической водоподготовки теплоэлектроцентралей) в качестве добавок при производстве клинкерных керамических материалов показали, что их применение не ухудшает качества конечного изделия. На ОАО «Обольский керамический завод» изготовлены опытные образцы керамической клинкерной тротуарной плитки (керамический клинкерный кирпич) с добавками техногенных продуктов энергетического комплекса (осадков химической водоподготовки). Добавка осадков химической водоподготовки в количестве 2 мас. % позволяет уменьшить температуру обжига изделий на 40–60 °С без ухудшения физико-механических показателей изделия, что важно в плане энергосбережения и приведет к снижению*

### ABSTRACT

*CLINKER, BRICK PAVING SLABS, TECHNOGENIC PRODUCTS, RAINFALL OF CHEMICAL WATER TREATMENT, COMBINED HEAT AND POWER PLANT, CERAMIC CLINKER BRICK*

*The purpose of the presented work is to study the influence of chemical water treatment deposits in the raw material on physical and mechanical properties of paving tiles and technological parameters of their production. Preliminary studies conducted on the use of technogenic products of the energy complex (precipitation of chemical water treatment of thermal power plants) as additives in the production of clinker ceramic materials showed that their use does not impair the quality of the final product. On Obolsky Ceramic Plant prototypes of ceramic clinker paving tiles (ceramic clinker bricks) were produced with additives of technogenic products of the energy complex (precipitation of chemical water treatment). Addition of precipitation of chemical water treatment in the amount of 2 % of weight allows to reduce the burning temperature of articles by 40–60 °C without deterioration of physical and mechanical properties of the article, which is important in terms of energy saving and will lead to reduction of cost of ceramic products. Studies of the physical and mechanical properties of the prototypes showed that ceramic clinker tiles (ceramic clinker bricks) with the addi-*

\* E-mail: [grec\\_alex@rambler.ru](mailto:grec_alex@rambler.ru) (A. Hrachanikau)

*себестоимости керамической продукции. Исследования физико-механических свойств опытных образцов показали, что плитка керамическая клинкерная (кирпич керамический клинкерный) с добавкой техногенных продуктов энергетического комплекса (осадков химической водоподготовки теплоэлектроцентралей) соответствует СТБ 1787-2007. По результатам выполненных исследований на ОАО «Обольский керамический завод» разрабатываются технические условия на керамическую клинкерную плитку и технологический регламент ее изготовления.*

*tion of technogenic products of the energy complex (precipitation of chemical water treatment of thermal power plants) comply with STB 1787-2007. Based on the results of the studies performed at Obolsky Ceramic Plant, specifications for ceramic clinker tiles and technological regulations for their manufacture are developed.*

Современные тенденции развития Республики Беларусь в области строительства предъявляют всё более высокие требования к характеристикам строительных материалов и изделий, что в свою очередь, в большинстве случаев, ведет к их удорожанию.

При высоких требованиях к качеству и разнообразию ассортимента в условиях острой конкурентной борьбы за покупателя решающее значение имеет цена. Поэтому расширение ассортимента продукции является одним из залогов успешной деятельности предприятия. В результате мониторинга рынка керамических материалов и изделий отдела по коммерческой работе (маркетинга) ОАО «Обольский керамический завод» значимый интерес для запуска производства на предприятии представляют клинкерные керамические материалы – кирпич и тротуарная плитка.

При производстве кирпича и плитки в составе керамической смеси используются добавки различного назначения. Наиболее энергетически затратным этапом изготовления керамических изделий является обжиг. В последнее время всё более востребованными являются технологии, позволяющие снизить энергетические затраты на этапе обжига за счет использования различных добавок, таких как выгорающие, пластифицирующие и т. д.

В тоже время решение актуальной народно-хозяйственной проблемы по рациональному использованию природных ресурсов предполагает разработку эффективных безотходных техноло-

гий за счёт комплексного использования сырья, что приводит к минимизации экологического ущерба. Одним из направлений переработки отходов является их использование в качестве техногенного сырья при получении керамических материалов и изделий строительного назначения. По результатам выполнения проекта «Разработка научных основ ресурсосберегающей, импортозамещающей технологии изготовления кирпича керамического с использованием промышленных отходов» в рамках ГПНИ «Строительные материалы и технологии 54» на ОАО «Обольский керамический завод» с 2017 года осуществляется выпуск кирпича керамического методом пластического формования с добавками неорганических отходов химической водоподготовки теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). В ближайшее время на ОАО «Обольский керамический завод» планируется расширение ассортимента продукции за счет выпуска керамических клинкерных изделий с использованием техногенных продуктов химической водоподготовки теплоэлектроцентралей (осадки химической водоподготовки ТЭЦ) [1].

Цель работы – исследование влияния содержания в исходном сырье осадков химической водоподготовки на физико-механические свойства тротуарной плитки и технологические параметры ее производства.

#### **Материалы и методы исследования**

К основным материалам, являющимися сырьём для производства клинкерных керамических материалов, относятся глины, каолины,

а также различные добавки и модификаторы (плавни, отошающие, порообразующие, пластифицирующие добавки). Так, например, отошающие добавки вводятся в состав керамической массы для снижения пластичности и уменьшения воздушной и огневой усадки глин в процессе обжига. В качестве таких добавок используются шамот, дегидратированная глина, песок, гранулированный доменный шлак, техногенные продукты энергетического комплекса (осадки химической водоподготовки теплоэлектростанций и станций обезжелезивания) [2].

В рамках проекта «Инновационная, ресурсосберегающая технология изготовления тротуарной плитки с использованием промышленных отходов», выполняемого по заданию ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», сотрудниками кафедры экологии и химических технологий совместно с ОАО «Обольский керамический завод» проведены исследования возможности использования осадков химической водоподготовки ТЭЦ в качестве добавки при изготовлении керамических клинкерных материалов [2].

В соответствии с требованиями СТБ 1450-2010 «Технологическая документация. Рецептура. Общие требования к разработке» разработана рецептура и составы сырья для изготовления опытных образцов керамической клинкерной тротуарной плитки с использованием осадков химической водоподготовки ТЭЦ [3]. Для проведения исследований влияния на физико-механические свойства тротуарной плитки содержания в исходном сырье осадков химической водоподготовки на ОАО «Обольский керамический завод» в соответствии с разработанной рецептурой изготовлены опытные образцы керамической клинкерной тротуарной плитки (керамический клинкерный кирпич). Смешивание всех сырьевых компонентов и формование керамической клинкерной плитки осуществлялось вручную. После смешивания компонентов получена однородная пластичная масса с влажностью 18 %. В ходе эксперимента изготовлены образцы керамической клинкерной плитки. Полученная керамическая масса (сырец) высушивалась в сушильной камере в течение 48 часов (температура равномерно увеличивалась от 20 °С до 80 °С) до влажности 5 %. В соответ-

ствии с технологической картой, разработанной на ОАО «Обольский керамический завод», проводилась термообработка со следующими температурными режимами (рисунок 1): участок I – равномерный подъем температуры от 0 °С до 150 °С с градиентом 50 °С / 20 мин; участок II – выдержка при температуре 150 °С в течение 2 часов; участок III – равномерный подъем температуры от 150 °С до 950 °С с градиентом 50 °С / 20 мин; участок IV – равномерный подъем температуры от 950 °С до 1150 °С с градиентом 20 °С / 60 мин; участок V – обжиг при температуре 1150 °С в течение 4 часов; участок VI – остывание изделия. Общая длительность процессов термообработки и обжига составила 36 часов [4].

Керамическая тротуарная плитка должна отвечать следующим основным требованиям по СТБ 1787-2007 «Кирпич керамический клинкерный. Технические условия» (класс А) для кладки фундаментов, стен, для кладки и облицовки стен в гидротехнических сооружениях, для тротуаров и отмосток. Класс кирпича устанавливают по показателям водопоглощения, морозостойкости, плотности черепка и марки по прочности, приведенным в таблице 1 [5].

По прочности при сжатии и изгибе кирпич подразделяют на марки (таблица 2) [5]:

- для класса А: 300, 350, 400, 500, 600, 700;
- для класса Б: 200, 250, 300, 350.

Наличие известковых включений – нет [5].

При подготовке исследований по оптимизации соотношения между отходами и температурным режимом окончательного обжига (участок V на графике температурного режима, имеющий постоянное время действия и постоянную температуру) поставлена следующая задача: определить рациональные значения содержания осадков химической водоподготовки ТЭЦ, обеспечивающие требуемые физико-механические свойства плитки и температурный режим окончательного обжига с наиболее низким расходом энергоресурсов. В качестве входных факторов были приняты:

- $X_1$  – температура окончательного обжига плитки, °С (рисунок 1, участок V);
- $X_2$  – содержание осадков химической водоподготовки ТЭЦ, %.

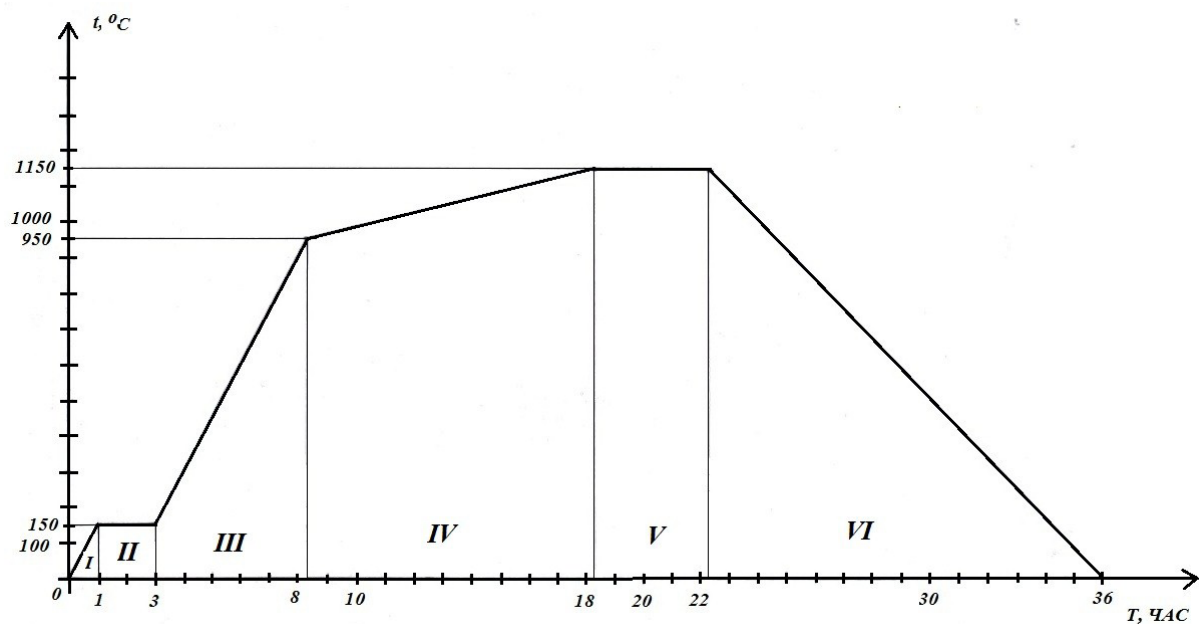


Рисунок 1 – График термообработки образцов керамической клинкерной тротуарной плитки (керамический клинкерный кирпич)

Таблица 1 – Класс кирпича керамического клинкерного

Класс	Водопоглощение, %, не более	Плотность черепка, кг/м <sup>3</sup> , не менее	Морозостойкость, циклов, не менее	Марка по прочности, не менее
А	4	2000	150	300
Б	6	1950	100	200

Таблица 2 – Пределы прочности при сжатии и изгибе кирпича

Марка кирпича	Предел прочности, МПа			
	при сжатии		при изгибе	
	средний для пяти образцов	наименьший для отдельного образца	средний для пяти образцов	наименьший для отдельного образца
700	70,0	60,0	7,0	3,5
600	60,0	50,0	6,1	3,1
500	50,0	40,0	5,2	2,6
400	40,0	35,0	4,3	2,2
350	35,0	30,0	3,9	2,0
300	30,0	25,0	3,4	1,7
250	25,0	20,0	2,9	1,5
200	20,0	17,5	2,5	1,3

Уровни и интервалы варьирования входных факторов представлены в таблице 3.

В качестве выходных параметров были использованы следующие показатели:  $Y_1$  – предел прочности при сжатии, **МПа**;  $Y_2$  – предел прочности при изгибе, **МПа**;  $Y_3$  – плотность, **кг/м<sup>3</sup>**;  $Y_4$  – водопоглощение, %.

Эксперимент проводился по D-оптимальной матрице Коно 3<sup>2</sup>, реализующей все возможные комбинации варьирования входных параметров. В результате проведения эксперимента в соответствии с матрицей были разработаны 9 вариантов составов керамической смеси. Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента, обрабатывались с использованием программы «Statistica for Windows». В результате удаления незначимых коэффициентов регрессии получены математические модели зависимости выходных параметров от входных факторов, а также поверхности отклика, представленные на рисунках 2, 3, 4 и 5.

#### Анализ полученных результатов

Проведя анализ полученных моделей, можно сделать следующие выводы:

- на предел прочности при сжатии оказывают влияние температура окончательного обжига плитки и содержание осадков химической водоподготовки ТЭЦ в составе смеси. Повышение температуры окончательного обжига плитки от 1100 °С до 1300 °С приводит к увеличению предела прочности при сжатии, но в тоже время увеличение содержания осадков химической водоподготовки ТЭЦ с 1 до 3 % приводит к постепенному снижению предела прочности при сжатии;

- на предел прочности при изгибе характерно влияние температуры окончательного обжига плитки. Повышение температуры окончатель-

го обжига плитки от 1100 °С до 1300 °С приводит к увеличению предела прочности при изгибе. При содержании осадков химической водоподготовки ТЭЦ 1 % наблюдается минимальное значение предела прочности при изгибе;

- на плотность существенное влияние оказывает температура окончательного обжига плитки. Содержание осадков химической водоподготовки ТЭЦ в составе керамической массы является маловлияющим фактором на данный показатель. Увеличение температуры окончательного обжига плитки приводит к образованию более плотной структуры клинкера [6, 7];

- на водопоглощение оказывают влияние оба фактора в равной степени. С увеличением температуры обжига при малом содержании осадков химводоподготовки наблюдается наименьшее водопоглощение – 2,5 %. Максимальное водопоглощение (4,5 %) соответствует минимальной температуре окончательного обжига плитки и наибольшему содержанию осадков химической водоподготовки ТЭЦ.

Для выявления области компромиссных решений при установленных ограничениях: плотность – не менее 2000 **кг/м<sup>3</sup>**; предел прочности при сжатии – не менее 25 **МПа**; предел прочности при изгибе – не менее 1,7 **МПа**; водопоглощение – не более 4 %; проведем совмещение линий равного уровня выходных параметров. В результате выявлена область рациональных значений (рисунок 6).

Анализируя область рациональных решений, можно рекомендовать следующие значения параметров процесса изготовления плитки:

1. Температура окончательного обжига плитки устанавливается в диапазоне от 1150 °С до 1300 °С.

Таблица 3 – Уровни и интервалы варьирования входных факторов

Наименование входного фактора	Обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Температура окончательного обжига плитки, °С	$X_1$	1100	1200	1300	100
Содержание осадков химической водоподготовки ТЭЦ, %	$X_2$	1	2	3	1



Модель:  $Y1 = 29,6 + 0,98X1 - 0,78X2$

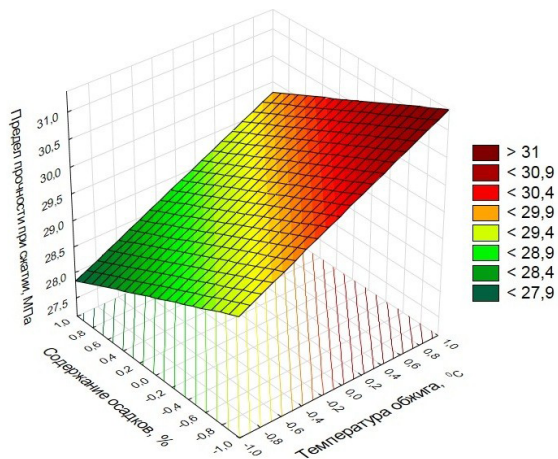


Рисунок 2 – Математическая модель и поверхность отклика зависимости предела прочности при сжатии от температуры обжига и содержания техногенных продуктов ХВО в составе керамической массы

Модель:  $Y2 = 3,03 + 0,62X1 + 0,27X2 + 0,35X1^2 - 0,30X2^2$

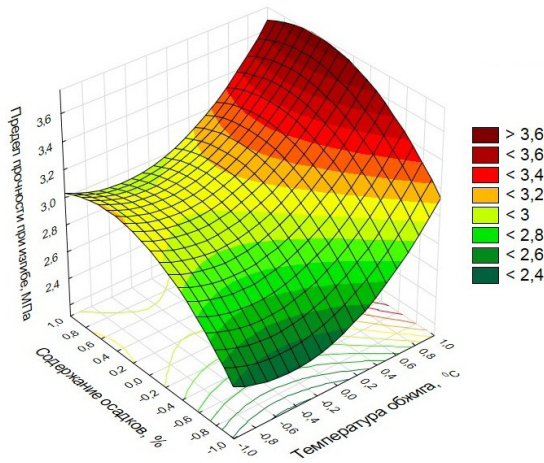


Рисунок 3 – Математическая модель и поверхность отклика зависимости предела прочности при изгибе от температуры обжига и содержания техногенных продуктов ХВО в составе керамической массы

Модель:  $Y3 = 2080 + 61,667X1 - 28,3X2 - 40X1X2 - 85X2^2 - 35X1^2$

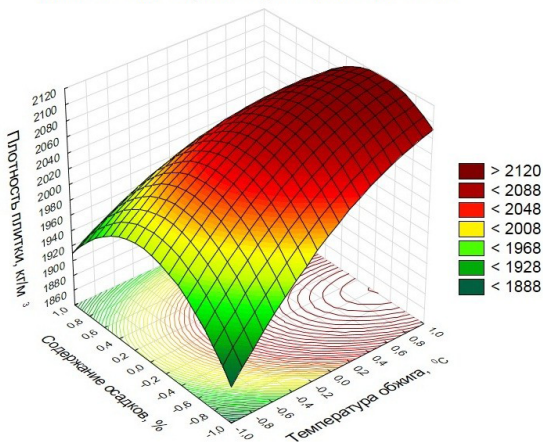


Рисунок 4 – Математическая модель и поверхность отклика зависимости плотности плитки от температуры обжига и содержания техногенных продуктов ХВО в составе керамической массы

Модель:  $Y4 = 3,71 - 0,73X1 + 0,55X2$

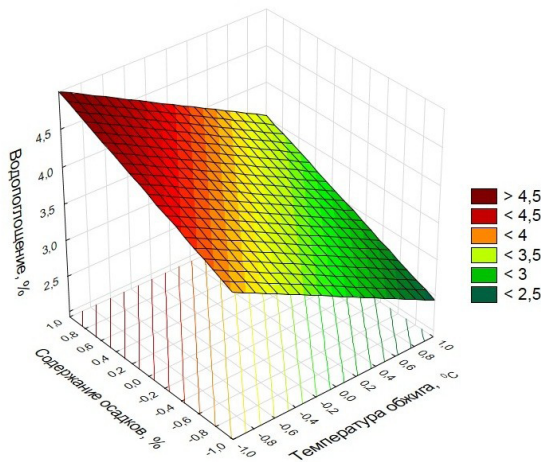


Рисунок 5 – Математическая модель и поверхность отклика зависимости водопоглощения от температуры обжига и содержания техногенных продуктов ХВО в составе керамической массы

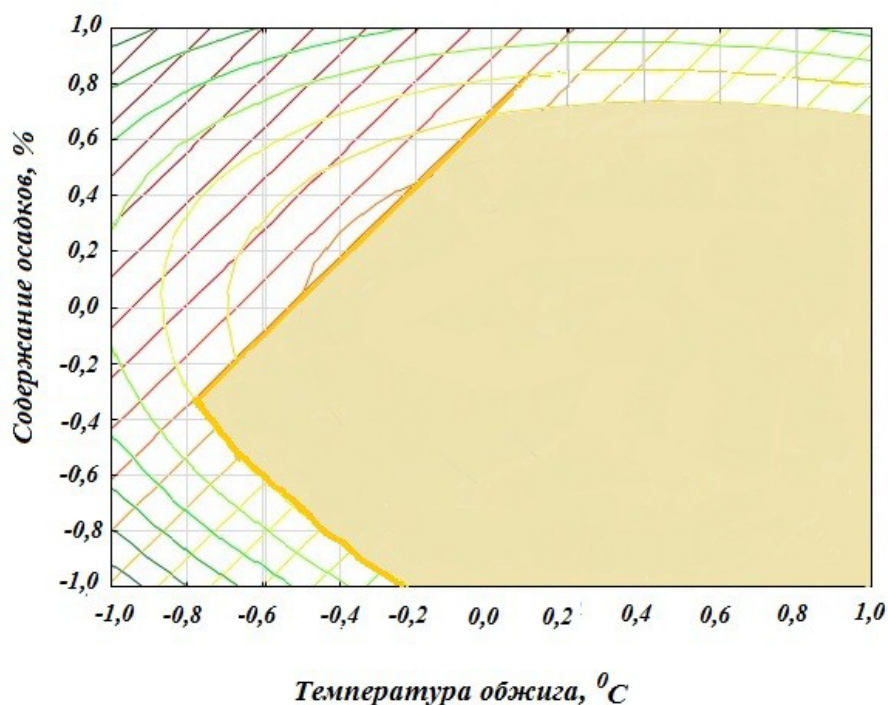


Рисунок 6 – Совмещенный график линий равного уровня

2. Содержание осадков химической водоподготовки ТЭЦ не более 2,6 %.

По параметрам из области оптимума: температура окончательного обжига плитки – 1150 °С и содержание осадков химической водоподготовки ТЭЦ в составе керамической массы – 2 % изготовлена опытная партия плитки. В производственной лаборатории ОАО «Обольский керамический завод» проведены исследования физико-механических свойств керами-

ческой плитки. Условия проведения испытаний: температура +15 °С, относительная влажность – 85 %. Результаты исследований представлены в таблице 4 [4].

В ходе лабораторных испытаний, проведенных отделом технического контроля ОАО «Обольский керамический завод», установлено, что опытные образцы плитки согласно СТБ 1787-2007 «Кирпич керамический клинкерный. Технические условия» соответствуют классу А.

Таблица 4 – Результаты испытаний плитки

Наименование показателя. Единицы измерения	Нормированное значение показателей, установленных СТБ 1787–2007	Среднее значение показателей для образца
1. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Не менее 2000	2200
2. Предел прочности при сжатии, МПа	25	30,6
3. Предел прочности при изгибе, МПа	1,7	3,4
4. Водопоглощение, %	не более 4	3,8
5. Наличие известковых включений	–	нет

Результаты проведённых исследований показывают, что добавка осадков химической водоподготовки ТЭЦ в составе керамической массы не ухудшает физико-механических показателей плитки [4].

#### ВЫВОД

Проведенные на ОАО «Обольский керамический завод» исследования физико-механических свойств опытных образцов керамической клинкерной плитки показали эффективность использования техногенных продуктов энергетического комплекса (осадков химической водоподготовки теплоэлектроцентралей) в качестве добавки при изготовлении клинкерных керамических строительных материалов. Определены значения температуры окончательного обжига плитки и оптимальное содержание техногенных продуктов химводоподготовки ТЭЦ. Добавка осадков химической водоподготовки в количестве 2 мас. % позволяет уменьшить температуру обжига изделий на 40–60 °С без ухудшения физико-механических показателей изделия, что важно в плане энергосбережения и приведет к снижению себестоимости керамической продукции.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковчур, А. С., Гречаников, А. В., Манак, П. И., Ковчур, С. Г. (2018), *Комплексное использование неорганических отходов водонасосных станций и теплоэлектроцентралей: монография*, Витебск, ВГТУ, 2018, 165 с.
2. Манак, П. И., Ковчур, А. С., Гречаников, А. В., Тимонов, И. А. (2020), Техногенные продукты химической водоподготовки теплоэлектроцентралей как добавка к клинкерным керамическим материалам, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2020, № 1 (38), С. 150.
3. СТБ 1450-2010. *Технологическая документация. Рецептура. Общие требования к разработке*. Введ. 2010–08–30, Минск, Госстандарт

#### REFERENCES

1. Kauchur, A., Hrachanikau, A., Manak, P., Kauchur, S. (2018), *Kompleksnoe ispol'zovanie neorganicheskikh otkhodov vodonasosnykh stantsiy i teploelektrotsentralej: monografiya* [Integrated use of inorganic wastes of water pump stations and thermal power centers: monograph], Vitebsk, VSTU, 2018, 165 p.
2. Manak, P., Kauchur, A., Hrachanikau, A., Timonov, I. (2020), Technogenic products of chemical water treatment of thermal power plants as an additive to clinker ceramic materials [Tekhnogennye produkty himicheskoy vodopodgotovki teploelektrocentralej kak dobavka k klinkernym keramicheskim materialam], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological*



Республики Беларусь, 2010, 12 с.

4. Kauchur A., Hrachanikau A., Manak P., Liatas A. (2020), Investigation of content of technogenic products of chemical water treatment of heat and electric power plants in clinker ceramic materials, *V International Scientific and Practical Conference «Education and science in the 21st century»*, October 29, 2020, VSTU, Vitebsk, 2020.
5. СТБ 1787-2007. *Кирпич керамический клинкерный. Технические условия* – Введ. 2007–09–28, Минск, Госстандарт Республики Беларусь, 2007, 7 с.
6. Левицкий, И. А., Климош, Ю. А. (2005), Структурообразование плотносспекшейся керамики бытового назначения, *Стекло и керамика*, 2005, № 6, С. 32–36.
7. Ковчур, А. С., Шелег, В. К., Жорник, В. И., Ковалева, С. А. (2020), Модифицирование керамического кирпича добавками неорганических техногенных продуктов водоподготовки ТЭЦ, *Наука и техника*, 2020, Т. 19, № 3, С. 204–214.
3. STB 1787-2007. *Technological documentation. Recipe. General requirements for development*. Entered 2010–08–30, Minsk, Gosstandart of Republic of Belarus publ., 2010, 12 p.
4. Kauchur, A., Hrachanikau, A., Manak, P., Liatas, A. (2020), Investigation of content of technogenic products of chemical water treatment of heat and electric power plants in clinker ceramic materials, *V International Scientific and Practical Conference «Education and science in the 21st century»*, October 29, 2020, VSTU, Vitebsk, 2020.
5. STB 1787-2007. *The brick is ceramic brick. Specifications*. Entered 2007–09–28, Minsk, Gosstandart of Republic of Belarus publ., 2007, 7 p.
6. Levitskiy, I. A., Klimosh, Yu. A. (2005), Structurization is dense caked ceramics of household purpose [Strukturoobrazovanie plotnospekshejsya keramiki bytovogo naznacheniya], *Steklo i keramika – Glass and ceramics*, 2005, № 6, pp. 32–36.
7. Kauchur, A. S., Sheleh, V. K., Zhornik, V. I., Kovaliova, S. A. (2020), Modification of a Ceramic Brick Additives of Inorganic Technogenic Products of Water Treatment of Combined Heat and Power Plant [Modificirovanie keramicheskogo kirpicha dobavkami neorganicheskikh tekhnogennykh produktov vodopodgotovki TEC], *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, vol. 19, № 3, pp. 204–214.

University, 2020, № 1 (38), P. 150.

Статья поступила в редакцию 27.04.2021 г.