

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМЗИТОВОГО ПЕСКА В ПЕЧАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОЦЕССОВ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЫЛЕВИДНЫХ ФРАКЦИЙ**

Назаров В.И., Макаренков Д.А., Кузнецова Н.А., Попов А.П., Мавлюдова Я.А.

Назаров Вячеслав Иванович, Кузнецова Наталья Анатольевна

МИРЭА - Российский технологический университет

г. Москва, Россия, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

E-mail: nazarov_vi41@mail.ru, nkuznetsova@list.ru

Назаров Вячеслав Иванович, Макаренков Дмитрий Анатольевич, Попов Александр Павлович

НИЦ «Курчатовский институт»

г. Москва, Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

E-mail: makarenkovd@mail.ru, schrei6@yandex.ru

Мавлюдова Яна Александровна

Московский политехнический университет

г. Москва, Россия, 115280, г. Москва, Автозаводская ул., д. 16.

E-mail: zлата_yana88@mail.ru

В статье проанализированы стадии получения керамзитового песка в печах кипящего слоя. Рассмотрены вопросы гранулирования пылевидных фракций после циклонов. Предложено использовать для их уплотнения процесс компактирования. Приведены результаты исследования структурно-деформационных характеристик прессовок в зависимости от различных технологических факторов. С использованием метода статического планирования экспериментов получены зависимости для определения плотности прессовок и их прочности на раскалывание. Определено влияние удельного давления прессования, влажности исходной глины, отношения компонентов связующего на характеристики прессовок. Построены номограммы для определения структурно-деформационных характеристик прессовок в зависимости от режимных параметров процесса прессования.

Ключевые слова: керамзитовый песок, кипящий слой, структурно-деформационные характеристики, компактирование, прессовки, номограммы.

**IMPROVING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE TECHNOLOGICAL LINE FOR
THE PRODUCTION OF EXPANDED CLAY SAND IN FLUIDIZED BED FURNACES USING
GRANULATION PROCESSES OF PULVERIZED FRACTIONS**

Nazarov V.I., Makarenkov D.A., Kuznetsova N.A., Popov A.P., Mavlyudova Ya.A.

Nazarov Vyacheslav Ivanovich, Kuznetsova Natalia Anatolyevna

MIREA - Russian Technological University Moscow, Russia, 119454, Moscow, Prospekt Vernadskogo, 78.

E-mail: nazarov_vi41@mail.ru, nkuznetsova@list.ru

Nazarov Vyacheslav Ivanovich, Makarenkov Dmitry Anatolyevich, Popov Aleksander Pavlovich

NRC "Kurchatov Institute" Moscow, Russia, 123182, Moscow, Akademika Kurchatov Square, 1.

E-mail: makarenkovd@mail.ru, schrei6@yandex.ru

Mavlyudova Yana Aleksandrovna

Moscow Polytechnic University Moscow, Russia, 115280, Moscow, Avtozavodskaya Str., 16.

The article analyzes the stages of obtaining expanded clay sand in fluidized bed furnaces. The issues of granulation of pulverized fractions after cyclones are considered. It is proposed to use the compaction process for their compaction. The results of the study of the structural and deformation characteristics of presses depending on various technological factors are presented. Using the method of static planning of experiments, dependences were obtained to determine the density of compresses and their splitting strength. The influence of the specific pressing pressure, the humidity of the

initial clay, the ratio of the binder components on the characteristics of the presses is determined. Nomograms are constructed to determine the structural and deformation characteristics of compressions depending on the operating parameters of the pressing process.

Keywords: expanded clay sand, fluidized bed, structural and deformation characteristics, compaction, compaction, nomograms

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время при получении керамзитового песка часто используют технологию обжига в кипящем слое [1, 2]. Для этого используют вертикальную двухзонную печь (см. рис. 1).

В I зону вертикальной печи загружается глиняная крошка крупностью до 5 мм, получаемая дроблением подсушенной глины или пластифицированных высушенных гранул. Через решетчатый (пористый) под печи снизу под давлением подают воздух и газообразное топливо. При заданной скорости подачи образующихся газов слой глиняной крошки переходит в псевдооживленное состояние. Газообразное топливо сгорает непосредственно в кипящем слое. Благодаря интенсивному теплообмену в кипящем слое происходит быстрый и равномерный нагрев материала. Частицы глины обжигаются и вспучиваются примерно за 1,5 мин. Перед подачей в печь обжига глиняная крошка подогревается в кипящем слое реактора в зоне термоподготовки (I) примерно до 300°C, а затем подаётся в зону обжига (II), где проводится термообработка при температуре $T = (1000-1100)$ оС. Готовый керамзитовый песок после обжига подаётся для охлаждения в холодильник кипящего слоя.

Насыпная плотность получаемого керамзитового песка (500-700) кг/м³. К гранулометрическому составу керамзитового песка предъявляются требования, аналогичные к природному песку, но с увеличенным количеством фракций и заданной пористостью [3, 4].

Производство пористого керамзитового песка сопровождается значительным выделением пыли на всех стадиях ее технологического процесса [5]. Однако основное количество пылевых отходов образуется после термообработки в печи кипящего слоя. Глиняная пыль, которая образуется в зоне термообработки, и крупные частицы имеют разный химический состав. К тому же в пылевидных фракциях содержится большое количество оксидов и солей щелочных металлов, имеющих низкую температуру плавления [6,11,12]. При использовании такой пыли в зоне обжига увеличивается количество спекшихся агломератов, что снижает эффективность работы установки. Кроме того, большое количество пыли,

которое образуется на стадии подготовки глиняной крошки и в зоне обжига, приводит к запыленности цехов, ухудшению экологической обстановки в зоне предприятия и ухудшению условий труда. При этом образующаяся пыль не перерабатывается, а идет в отвал. Для переработки порошков и пыли обычно используют различные методы их перевода в гранулированное или уплотненное состояние. Для этого применяют методы окатывания, прессования или компактирования порошковых или зернистых материалов. Эти методы гранулирования эффективно используются в производстве удобрений, стекол и эмалей [7, 8]. При утилизации пылевидных фракций перспективно прессование методом таблетирования или компактирования на валковых прессах.

В работе приведены результаты исследования процесса таблетирования порошковых отходов после печи обжига «КС» при прессовании в закрытой матрице. На основе проведенных исследований построены номограммы для определения структурно-деформационных характеристик полученных гранул.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения прессовок методом таблетирования использовали пылевидные фракции и различные типы связующих (сульфидно-спиртовая барда, масло). Для получения компрессионных кривых использовали закрытую матрицу. При прессовании порошков в закрытой матрице получение достоверных и надежных результатов определяется точностью дозировки прессуемой пыли в её объём, а также формой и высотой таблетки, и легкостью удаления готовых таблеток из матрицы. Форма таблеток определялась геометрией рабочих поверхностей канала матрицы и торцов пуансона. В установке для прессования была реализована цилиндрическая форма канала матрицы с небольшой конусностью на выходе. Прессинструмент с такими рабочими поверхностями позволяет получить таблетки в виде цилиндров с плоскими торцами и острыми кромками. Выбор высоты таблетки осуществляли на основе рекомендуемого в литературе соотношения высоты таблетки к ее диаметру [7]:

$$\frac{h_T}{D_T} = 0,3 \div 0,8$$

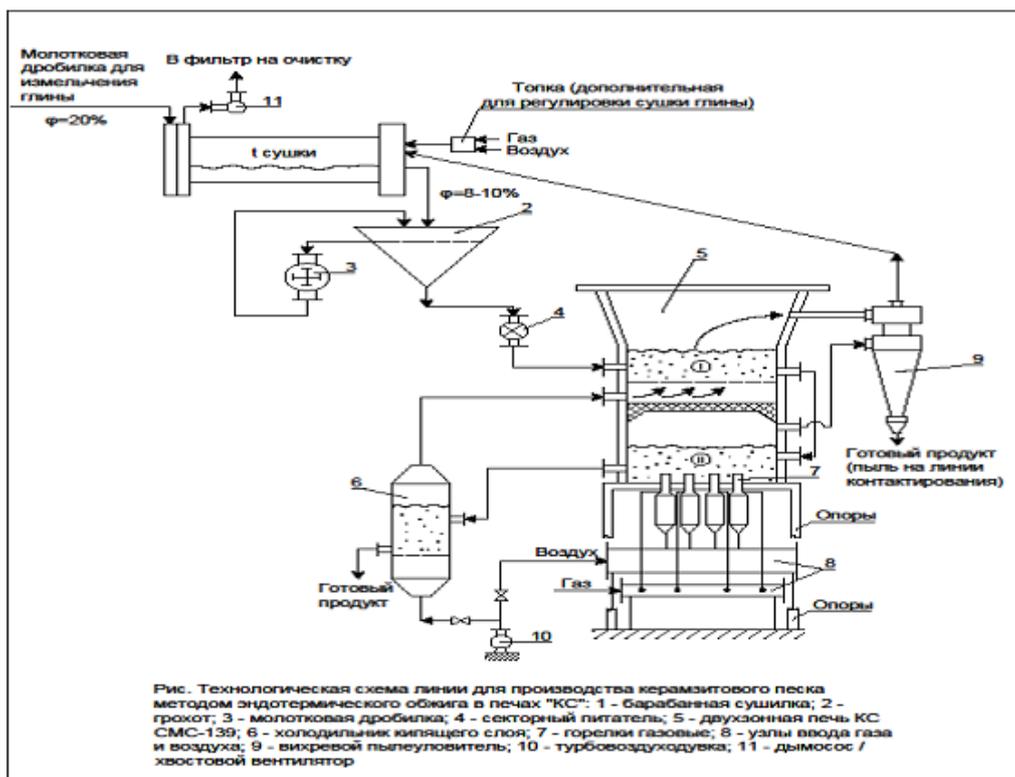


Рис. 1. Технологическая схема линии для производства керамзитового песка методом эндотермического обжига в печах "КС":
 1 – барабанная сушилка; 2 – грохот; 3 – молотковая дробилка; 4 – секторный питатель;
 5 – двухзонная печь КС СМС-139; 6 – холодильник кипящего слоя; 7 – горелки газовые;
 8 – узлы ввода газа и воздуха; 9 – вихревой пылеуловитель; 10 – турбовоздуходувка; 11 – дымосос / хвостовой вентилятор

Fig. 1. Technological scheme of the line for the production of expanded clay sand by endothermic firing in «KS» furnaces: 1 – drum dryer; 2 – screen; 3 – hammer crusher; 4 – sector feeder; 5 – two-zone furnace KS SMS-139; 6 – fluidized bed refrigerator; 7 – gas burners; 8 – gas and air inlet nodes; 9 – vortex dust collector; 10 – turbo blower; 11 – smoke exhaust / tail fan

Прессование пыли осуществляли следующим образом. Сначала отмеряли исходное количество пыли и засыпали в матрицу с поддоном. Затем пресс-инструмент помещали между двумя опорно-упорными плитами гидравлического пресса. Прессование осуществляли на универсальном гидравлическом прессе при малой постоянной скорости перемещения пуансона ($V=0,65$ мм/с) и температуре 200С. Таблетирование проводили в диапазоне давлений прессования до 300 МПа (3000 кг/см²). При этом был использован ручной гидравлический пресс типа ПГПр. Погрешность определения усилий в оптимальной зоне прессования не превышала 0,025 МПа. Полученную таблетку удаляли из матрицы, а затем измеряли ее высоту и диаметр по средней части, взвешивали таблетку и определяли ее плотность и прочность. Плотность прессовок позволяет определить возможный диапазон уплотнения порошков, а прочность – оценивать способность уплотненного продукта выдерживать статические и динамические нагрузки при транспортировке и хранении.

При определении прочности компактированных глиняных и термообработанных пылей использовали метод статистических нагрузок. За основную характеристику компактированного продукта взяты пределы прочности прессовок при растяжении σ_r , сжатии $\sigma_{сж}$.

Прочность прессовок определяли методом диаметрального разрушения образца, полученного в виде таблетки. Таблетки разрушали, прикладывая осевую нагрузку перпендикулярно боковой поверхности, определяя при этом σ_r по формуле:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{\pi r_T h_T}, \quad (1)$$

где F_p – разрушающее усилие, определяемое по прибору пресса, r_T, h_T – радиус и высота таблетки.

Предел прочности при сжатии определяли по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_p}{S}, \quad (2)$$

где S – площадь поперечного сечения образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены исследования процесса компактирования методом таблетирования для глин Никольского и Чекаловского месторождения и пылей, образующихся в результате обжига в печи кипящего слоя. В табл.1 приведены составы указанных глин (в % масс).

Процесс компактирования глиняных пылей в закрытой матрице проводили с использованием разных связующих, при этом исследовали их влияние на свойства и на структурно-деформационные характеристики прессовок.

Исследования процесса компактирования глины Никитского месторождения проводились как при исходной влажности глины 4,8%, так и при введении связующих в виде 10%-ной сульфидно-спиртовой барды (25%-ый водный раствор) и масла в виде водной эмульсии. Кроме того, глина подвергалась предварительной термообработке. Результаты этих экспериментов приведены на рис. 2 и 3. На этих рисунках сырая глина содержала воду в количестве 10% и концентрация сульфидно-спиртовой 25% масс. Термообработанная глина содержала масло в количестве 10% масс.

Таблица 1

Состав глиняных пылей Никольского и Чекаловского месторождения и примесей после прокаливании
Table 1. The composition of clay dusts from the Nikolsky and Chekalovsky deposits and impurities after calcination

Месторождение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	S	Na ₂ O	K ₂ O
Никитское (г. Саранск)	58,28	17,69	7,48	0,52	1,95	1,87	0,21	0,53	1,06	3,4
Чекаловское (г. Санкт-Петербург)	59,56	18,14	6,86	0,85	1,72	2,12	0,10	0,2	0,23	5,56
Примеси после прокаливании	Сумма, %		SO ₃ (общ)	CO ₂	Гигроскопическая вода		Органические вещества		Содержание Al ₂ O ₃ в пересчете на прокаленное вещество	
7,14 (Никитское)	100		1,54	1,54	3,13		2,51		19,05	
4,87 (Чекаловское)	100,3		-	-	1,05		-		-	

Компрессионные кривые для глины с исходной влажностью без термообработки и с термообработкой приведены на рис. 2. Термообработка глины проводилась при температуре 3000С и времени выдержки 2 ч. Удельное давление прессования изменялось до 160 МПа. Характер зависимости плотности прессовок от изменения удельного давления прессования для кривых 1 и 2 одинаков. При этом рост давления прессования приводит к резкому увеличению плотности прессовок. Так плотность нетермообработанной глины возрастает от насыпной плотности $\rho_n=1019 \text{ кг/м}^3$ до $\rho_p = (2150 - 2160) \text{ кг/м}^3$ при $R_{уд} = (140-160) \text{ МПа}$, а плотность термообработанной глины до $\rho_p = (2030-2070) \text{ кг/м}^3$ при том же давлении.

Компрессионная кривая 3 показывает, что введение в исходную глину сульфидно-спиртовой барды приводит к скачкообразному увеличению плотности прессовок. Уже при небольшом удельном давлении $R_{уд} = 20 \text{ МПа}$ плотность увеличивается до $\rho_p = 2217 \text{ кг/м}^3$. Характер кривой 4 не отличается от аналогичной кривой 1 при отсутствии связующего в виде масла. При этом плотность растёт от $\rho_p = 1780 \text{ кг/м}^3$ до $\rho_p = 2250 \text{ кг/м}^3$ в том же диапазоне удельных давлений.

Результаты измерения прочности прессовок глины σ_p приведены на рис. 3. Из характера кривой 1 видно резкое увеличение предела прочности на растяжение с 0,08 МПа до 1,02 МПа в диапазоне $R_{уд} = (20-140) \text{ МПа}$. Для кривой 2 и 3 из термообработанной глины видно наличие участка с постоянным пределом прочности $\sigma_p = (0,04 - 0,05) \text{ МПа}$ при $R_{уд} = (40-60) \text{ МПа}$.

Затем наблюдается в участок резкого увеличения прочности до $\sigma_p = 0,84 \text{ МПа}$ в диапазоне давлений с 60 до 160 МПа. Приведенные на рис. 3 данные по прочностным характеристикам для глины со связующим в виде водного раствора сульфидно-спиртовой барды (кривая 3) существенно отличаются от аналогичных данных для исходной глины. Отличие при вводе связующего заключается в наличии двух уровней значений предела прочности. Первый равен $\sigma_p = (0,78-0,76) \text{ МПа}$ при $R_{уд} = (40-80) \text{ МПа}$, а второй - $\sigma_p = (1,07-1,09) \text{ МПа}$ при $R_{уд} = (120-140) \text{ МПа}$.

Этот эффект объясняется установлением равновесия между выделением отжимаемой влаги и ее химическим связыванием за счет обменных и твердофазных реакций.

На рис. 3 также видно, что введение масла в термообработанную глину (кривая 4) приводит к экстремальному характеру изменения прочности прессовок по сравнению с аналогичной кривой без ввода масла в глину.

Наличие экстремума можно объяснить тем, что масло не вступает в химические реакции с компонентами глины и является источником концентраторов напряжения при увеличении удельного давления прессования.

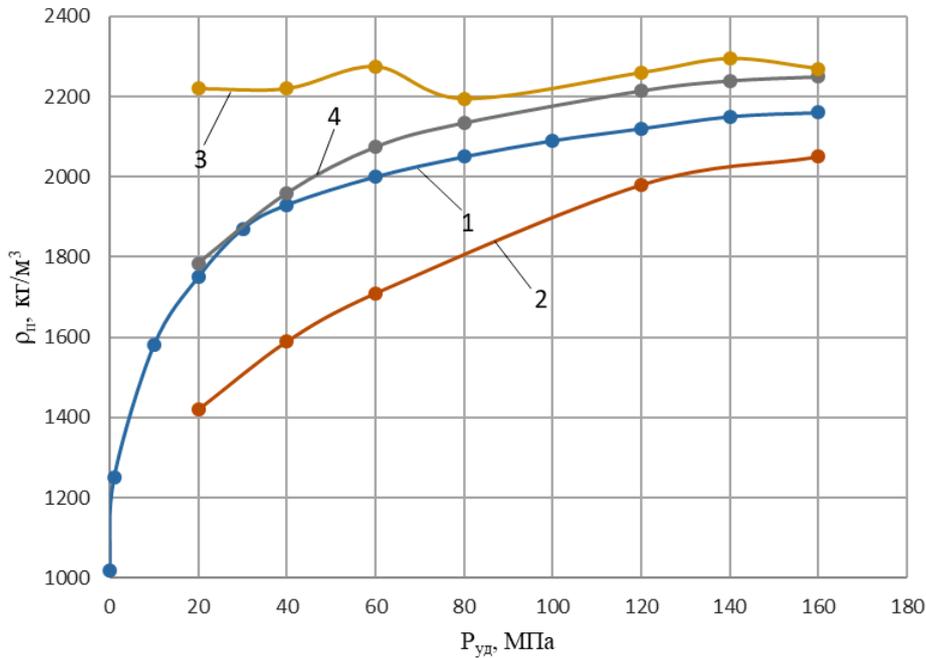


Рис. 2. Зависимость плотности прессовок ρ_p глины Никитского месторождения от удельного давления прессования $P_{уд}$ при исходной влажности глины $w_{исх}=4,8\%$ и после термообработки:

- 1 – исходная глина, 2 – термообработанная глина, 3 – глина с сульфидно-спиртовой бардой, 4 – термообработанная глина с маслом

Fig. 2. Dependence of the density ρ_p of clay presses from the Nikitsky deposit on the specific pressing pressure $P_{уд}$ at the initial clay moisture $w_{исх}=4,8\%$, and after heat treatment:

- 1 – initial clay, 2 – heat-treated clay, 3 – clay with sulfide-alcohol bard, 4 – heat-treated clay with oil

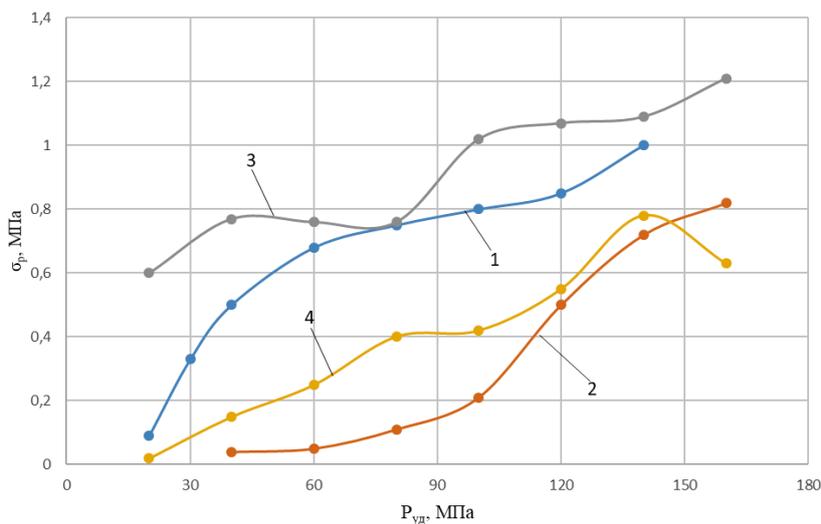


Рис. 3. Зависимость предела прочности прессовок σ_p глины Никитского месторождения от удельного давления прессования $P_{уд}$ при исходной влажности глины $w_{исх}=4,8\%$, после термообработки: 1 – исходная глина, 2 – термообработанная глина,

- 3 – глина с сульфидно-спиртовой бардой, 4 – термообработанная глина с маслом

Fig. 3. Dependence of the tensile strength σ_p of clay presses from the Nikitsky deposit on the specific pressing pressure $P_{уд}$ at the initial clay moisture $w_{исх}=4,8\%$, after heat treatment:

- 1 – initial clay, 2 – heat-treated clay, 3 – clay with sulfide-alcohol bard, 4 – heat-treated clay with oil

Проведенные эксперименты показали, что исследованные характеристики прессовок из пылей, уловленных после первой ступени обжига, и исходной глины в области удельных давлений прессования свыше 140 МПа близки и их свойства зависят от природы и количества вводимого связующего. Исходя из этого дальнейшие опыты проводились с исходной глиной.

$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$, (3)
 где \hat{y} – исследуемый выходной параметр, соответствующий плотности ρ_p и пределу прочности на растяжение σ_p глины; $x_i = \frac{x_i - 0,5(\max x_i + \min x_i)}{0,5(\max x_i - \min x_i)}$ – кодированные значения факторов.

С целью определения влияния удельного давления прессования Руд, влажности исходной глины $w_{исх}$, и соотношения компонентов связующего А на плотность и прочность для прессовок из глины Никитского месторождения был реализован полный факторный эксперимент 23 (ПФЭ 23) [9, 10]. Результаты эксперимента для нашего случая описывается уравнением регрессии

Оптимизирующие факторы, интервалы варьирования и уровни факторов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов для глиняных пылей
 Table 2. Levels and intervals of variation of factors for clay dusts

Факторы	Уровни			Код	Интервал варьирования Δx_i
	Верхний (+)	Нулевой (0)	Нижний (-)		
Удельное давление прессования Руд, МПа	220	120	20	x1	100
Влажность исходной глины $w_{исх}$, %	10,0	7,4	4,8	x2	2,6
Отношение компонентов связующего А	1,0	0,5	0	x3	0,5

Здесь $A = \frac{A_1}{A_2}$,

A1 масса сульфидно-спиртовой барды или масла,
 A2 общая масса воды в глине.

При обработке экспериментальных данных получены уравнения регрессии для исследуемой глины:
 а) со связующим сульфидно-спиртовая барда
 б) со связующим масло

$$\rho_p = 2180 + 193x_1 + 64x_2 - 76x_1x_2 - 58x_1x_3 - 23x_2x_3 \quad (4)$$

$$\sigma_p = 0,92 + 0,48x_1 + 0,07x_2 - 0,16x_3 - 0,15x_1x_2 - 0,19x_1x_3 - 0,02x_2x_3 \quad (5)$$

$$\rho_p = 2162 + 181x_1 + 47x_2 - 16x_3 - 72x_1x_2 - 69x_1x_3 - 39x_2x_3 \quad (6)$$

$$\sigma_p = 0,74 + 0,45x_1 - 0,34x_3 - 0,14x_1x_2 - 0,22x_1x_3 - 0,09x_2x_3 \quad (7)$$

Были построены номограммы, где приведены линии изоуровней $\hat{y} = const$ (рис. 4). Анализ изменения плотности прессовок показал следующее. В исследованном диапазоне удельных давлений прессования и влажности исходной глины установлено, что без ввода связующих или какого-либо компонента заданная прочность прессовки обеспечивается соотношением давлений и влажности глины. Вид изолиний (зависимостей) представлен на рис. 4 в диапазоне изменения плотности от 1770 кг/м³ до 2440 кг/м³. При увлажнении глины сульфатно-спиртовой бардой или маслом характер зависимости меняется, что приводит к появлению изолиний двух дополнительных типов. Первый тип характеризуется прямо пропорциональной зависимостью между давлением и влажностью, а второй - постоянством

давления при изменении влажности (рис. 5). Установлено, что характер изолиний зависит от увеличения концентрации вводимых компонентов связующего и изменения природы этого компонента от реакционно способного до нейтрального.

Установлено, что увеличение реакционной способности компонента приводит к менее интенсивному увеличению и снижению нижнего и верхнего уровней плотностей, соответственно (рис. 4-6).

При анализе поведения прочности прессовок установлено также наличие трех типов изолиний, что и для плотности.

При этом предел прочности прессовок на растяжение в присутствии влаги и без ввода в нее дополнительных компонентов меняется от 0,2 МПа до 1,8 МПа (рис. 7).

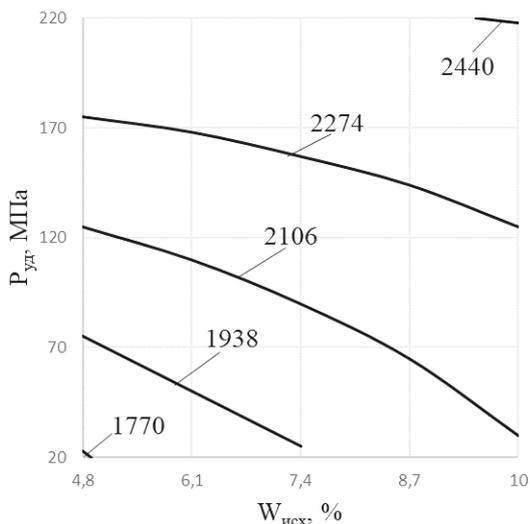


Рис.4 Зависимость плотности прессовок ρ_n от удельного давления прессования $P_{уд}$ и исходной влажности $w_{исх}$ глины Никитского месторождения без ввода дополнительных связующих при $A=0$

Fig.4 Dependence of the compaction density ρ_n on the specific pressing pressure $P_{уд}$ and the initial moisture content $w_{исх}$ of the clay of the Nikitsky deposit without the introduction of additional binders at $A=0$

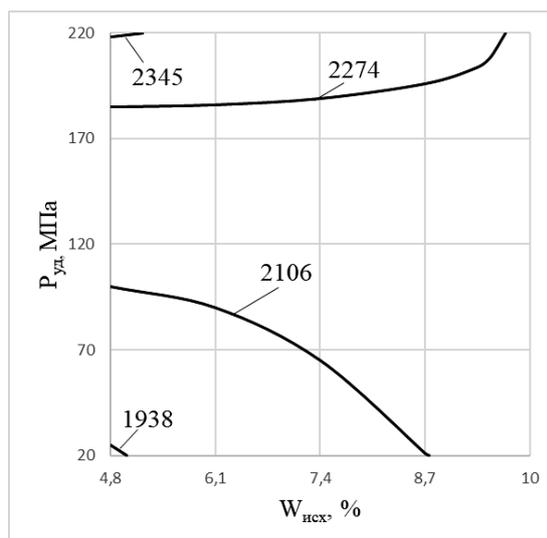


Рис.5. Зависимость плотности прессовок ρ_n от удельного давления прессования $P_{уд}$ и исходной влажности глины $w_{исх}$ Никитского месторождения при вводе во влажную глину сульфидно-спиртовой барды в отношении 1:1 при $A=1,0$

Fig.5. Dependence of the compaction density ρ_n on the specific pressing pressure $P_{уд}$ and the initial moisture content $w_{исх}$ of the clay of the Nikitsky deposit when sulfide-alcohol bard is injected into wet clay in a ratio of 1:1 at $A=1.0$

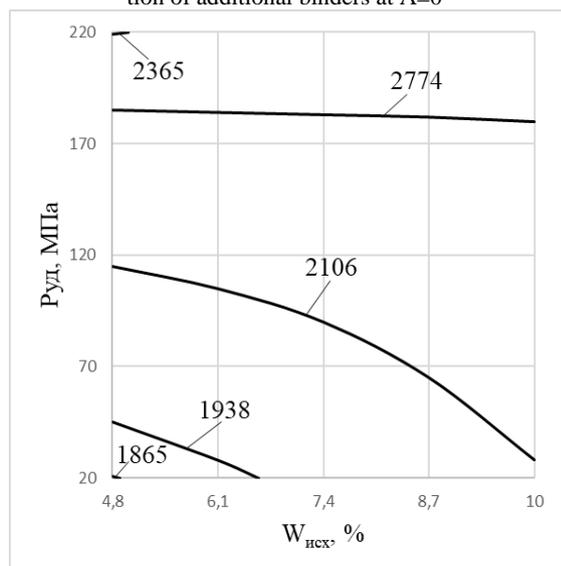


Рис. 6. Зависимость плотности прессовок ρ_n от удельного давления прессования $P_{уд}$ и исходной влажности глины $w_{исх}$ Никитского месторождения при вводе во влажную глину масла при $A = 0,5$

Fig. 6. Dependence of the compaction density ρ_n on the specific pressing pressure $P_{уд}$ and the initial moisture content of the clay $w_{исх}$ of the Nikitsky deposit when oil is injected into wet clay at $A = 0.5$

Выявлено, что при введении во влагу глины сульфидно-спиртовой барды возрастает нижний уровень определенного диапазона предела прочности с 0,2 до 0,3 МПа (рис. 8). В то же время, введение масла не изменяет его величины (рис. 9). При сравнении свойств глин Никитского и Чекаловского месторождений в процессах гра-

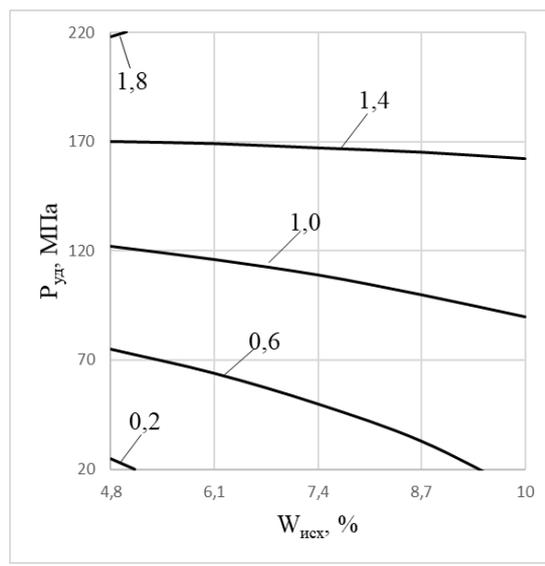


Рис. 7. Зависимость предела прочности прессовок σ_p от удельного давления прессования $P_{уд}$ и исходной влажности глины $w_{исх}$ Никитского месторождения без ввода дополнительных связующих при $A = 0$

Fig. 7. Dependence of the compaction strength limit σ_p on the specific pressing pressure $P_{уд}$ and the initial moisture content of the clay $w_{исх}$ of the Nikitsky deposit without the introduction of additional binders at $A = 0$

нулирования установлено следующее. Полученные уравнения регрессии для плотности прессовок глины Никитского месторождения аналогичны характеру изменения плотности прессовок глины Чекаловского месторождения.

Ошибка расчётных значений по сравнению с экспериментальными данными не превышает 4,3%.

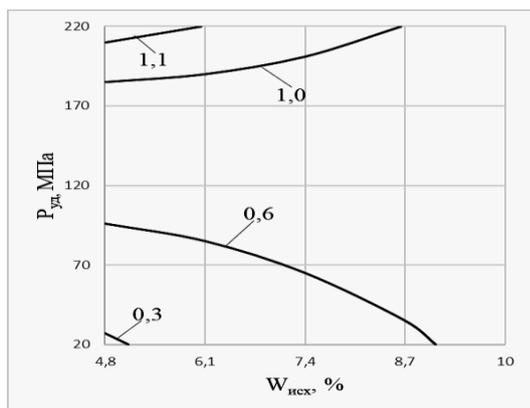


Рис. 8. Зависимость предела прочности прессовок σ_p от удельного давления прессования $P_{уд}$ и исходной влажности глины $W_{исх}$ Никитского месторождения при вводе во влажную глину сульфидно-спиртовой барды в отношении 1:1 при $A = 1,0$

Fig. 8. Dependence of the compaction strength limit σ_p on the specific pressing pressure $P_{уд}$ and the initial moisture content of the clay $W_{исх}$ of the Nikitsky deposit when sulfide-alcohol bard is injected into wet clay in a ratio of 1:1 at $A = 1.0$

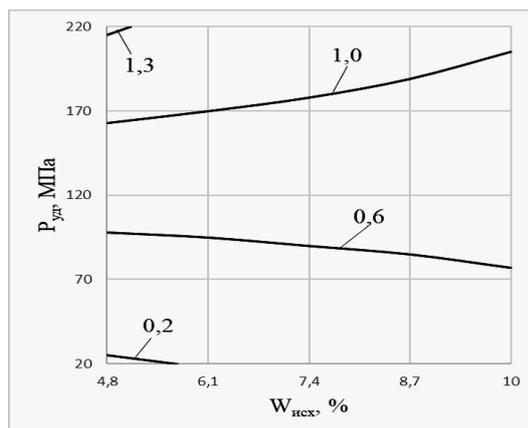


Рис. 9. Зависимость предела прочности прессовок σ_p от удельного давления прессования $P_{уд}$ и исходной влажности глины $W_{исх}$ Никитского месторождения при вводе во влажную глину масла при $A = 0,5$

Fig. 9. Dependence of the compaction strength limit σ_p on the specific pressing pressure $P_{уд}$ and the initial moisture content of the clay $W_{исх}$ of the Nikitsky deposit when oil is injected into wet clay at $A = 0.5$

Также были проведены исследования по влиянию связующего на прочность гранул из глины Чекаловского месторождения. Из полученных номограмм (в статье не показаны) видно, что при влажности глины 4,8% и изменении удельного давления прессования с 28 МПа до 219 МПа предел прочности возрастает с 0,12 МПа до 1,37 МПа. Введение в глину влаги до 10,0% при $P_{уд} = 34$ МПа снижает предел прочности прессовок. При этом можно выделить два уровня изменения предела прочности для диапазонов: $P_{уд} = 28 \div 124$ МПа и $P_{уд} = 171 \div 219$ МПа.

Например, при $P_{уд} = 76$ МПа прочность прессовок сначала возрастает с 0,37 МПа до 0,49 МПа, а затем падает до 0,45 МПа. На втором уровне изменения предела прочности не происходит и $\sigma_p = 1,06$ МПа.

Были проведены исследования по определению влияния времени хранения на плотность и прочность прессовок из глины Никитского месторождения. Установлено, что во время хранения плотность получаемых прессовок практически не меняется. Характер изменения прочности за время хранения представлен на рис. 10.

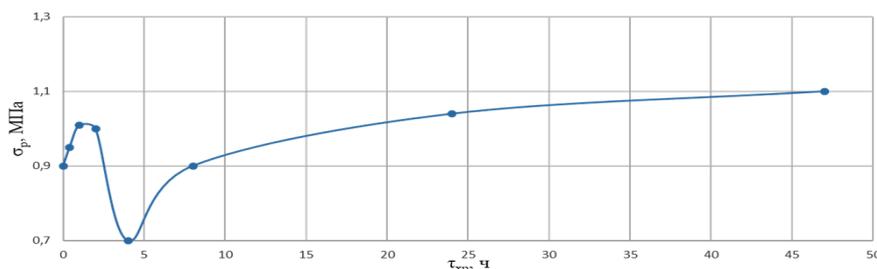


Рис. 10. Зависимость предела прочности σ_p прессовок глины Никитского месторождения от времени хранения $\tau_{хр}$ при удельном давлении прессования $P_{уд} = 185$ МПа, исходной влажности глины $w_{исх} = 6,1\%$ и вводе в нее масла $A = 0,5$

Fig. 10. Dependence of the tensile strength σ_p of clay presses from the Nikitsky deposit on the storage time $\tau_{хр}$ at a specific pressing pressure $P_{уд} = 185$ Мpa, the initial moisture content of the clay $w_{исх} = 6.1\%$ and the introduction of oil into it $A = 0.5$

Из рис. 10 видно, что кривая имеет экстремальный характер. При этом первый максимум $\sigma_p = 1,01$ МПа и достигается через 1 час хранения, а минимум $\sigma_p = 0,71$ МПа – через 4 часа. Затем происходит рост предела прочности прессовок на растяжение. Такой характер кривой можно объяснить с одной сто-

роны соотношением во времени между протекающими обменными и твердофазными реакциями, а с другой – образованием концентратов напряжения под влиянием масла. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы о процессе компактирования глин и пылей в закрытой матрице: Разработана методика исследования процесса компактирования

глиняной пыли и крошки в закрытой матрице. Проведены комплексные исследования структурно-деформационных характеристик пылей и крошки Никитского и Чекаловского месторождения. Установлено, что процесс уплотнения сырых и термообработанных глин в диапазоне изменения влажности 4,8 – 10% обеспечивает получение прочных прессовок с плотностью 1500 – 2300 кг/м³ с пределом прочности 0,5 – 1,0 МПа при давлении 25 – 150 МПа. Установлено, что сырая глина с высокой плотностью и прочностью компактируется при малом давлении 30 – 60 МПа, а термообработанные глины – при давлении 80 – 120 МПа. Используя методы математического планирования эксперимента результаты компактирования глиняной пыли в матрице были обработаны в виде номограмм.

Полученные графики позволяют определить плотность прессовок, их прочность и удельные давления прессования в зависимости от влажности глины и вида связующего. Полученные номограммы позволяют прогнозировать режимы компактирования пылей при их увлажнении водой, сульфидно-спиртовой бардой и водной эмульсией отработанного машинного масла в диапазоне изменения давлений 20 – 220 МПа и изменении влажности глины от 4,8 до 10%.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». The work was carried out within the state assignment of NRC «Kurchatov Institute».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare that there is no conflict of interest requiring disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENECES

1. **Овчинников Н.Л., Овчинников Л.Н., Натареев С.В.** Сушка и обжиг в кипящем слое: учеб. пособие. Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2009. 106 с.
2. **Генералов М.Б., Классен П.В., Степанова А.Р., Шомин И.П.** Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений. М: Машиностроение, 1984. 192 с.
3. ГОСТ 32026-2012. Межгосударственный стандарт. Сырье глинистое для производства керамзитовых гравия, щебня и песка. Технические условия. <https://docs.cntd.ru>
4. ГОСТ 32496-2013. Межгосударственный стандарт. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. <https://docs.cntd.ru/document>.
5. **Кисленко Т.А., Кошкарёв С.А.** О применении аппаратов пылеулавливания с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока в производстве керамзита. *Альтерн. энергетика и экология*. 2013. № 11(133). С. 61-63.
6. **Станевич В.Т.** Строительная керамика: учебное пособие. Павлодар: Кереку, 2008. 96 с.
7. **Макаренков Д.А., Назаров В.И.** Техника и технология гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с использованием совмещенных процессов их подготовки: монография. Москва: ИНФРА-М, 2023. 297 с.
8. **Назаров В.И., Санду Р.А., Макаренков Д.А., Николайкина Н.Е.** Техника и технология совмещенных процессов переработки твердых отходов: учебное пособие. Москва: ИНФРА-М, 2020. 456 с. DOI 10.12737/996365
9. **Спирин Н.А., Лавров В.В., Зайнуллин Л.А., Бондин А.Р., Бурькин А.А.** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие. Екатеринбург: ООО «УИИЦ», 2015. 290 с.
10. **Pavlenko A., Cheilytko A., Lymarenko O., Taranenko O.** Development of a new method for obtaining claydite with a minimal thermal conductivity coefficient. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*. 2017. №3/1 (87). P. 11-16
11. **Натареев С.В., Захаров Д.Е., Снигирев М.Ю.** Исследование структуры катионита на основе древесных опилок и хитозана. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 3 (71). С. 67-71.
12. **Блиничев В.Н., Постникова И.В., Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Зуева Г.А.** Интенсификация процесса разрушения поликомпонентных материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 109-115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.
1. **Ovchinnikov N.L., Ovchinnikov L.N., Natareev S.V.** Drying and firing in a fluidized bed: textbook. stipend. GOVPO Ivan. state chemical.-technol. un-t. Ivanovo, 2009. 106 p.
2. **Generalov M.B., Klassen P.V., Stepanova A.R., Shomin I.P.** Calculation of equipment for granulating mineral fertilizers. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 192 p.
3. GOST 32026-2012. The interstate standard. Clay raw materials for the production of expanded clay gravel, crushed stone and sand. Technical conditions. <https://docs.cntd.ru/document>
4. GOST 32496-2013. The interstate standard. The fillers are porous for lightweight concretes. Technical conditions. <https://docs.cntd.ru/document/1200109122?>
5. **Kislenko T.A., Koshkarev S.A.** On the use of dust collection devices with a combined dust separation scheme from a dust and gas stream in the production of expanded clay. *Alternative energy and ecology*. 2013. N 11(133). P. 61-63.
6. **Stanevich V.T.** Building ceramics: Study guide. Pavlodar: Kereku, 2008. 96 p.
7. **Makarenkov D.A., Nazarov V.I.** Technique and technology of granulation of multicomponent polydisperse materials using combined processes of their preparation: monograph. Moscow: INFRA-M, 2023. 297 p. (Scientific thought).
8. **Nazarov V.I., Sandu R.A., Makarenkov D.A., Nikolaikina N.E.** Technique and technology of combined solid waste recycling processes: Study guide. Moscow: INFRA-M, 2020. 456 p.
9. **Spirin N.A., Lavrov V.V., Zainullin L.A., Bondin A.R., Burykin A.A.** Methods of planning and processing the results of an engineering experiment: A textbook. Yekaterinburg: LLC «UINITS», 2015. 290 p.
10. **Pavlenko A., Cheilytko A., Lymarenko O., Taranenko O.** Development of a new method for obtaining claydite with a minimal thermal conductivity coefficient. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №3/1 (87). P. 11-16
11. **Natareev S.V., Zakharov D.E., Snigirev M.Yu.** Study of the structure of the cation exchange resin based on sawdust and chitosan. *Modern high technologies. Regional application*. Ivanovo. 2022. N 3 (71). P. 67-71.
12. **Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobyev S.V., Kolobov M.Yu., Zueva G.A.** Intensification of the process of destruction of polycomponent materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 1. P. 109-115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.

Поступила в редакцию (Received): 10.05.2024
Принята к опубликованию (Accepted): 10.07.2024