

Макаренков Д. А., канд. техн. наук, доц.,
Назаров В. И., канд. техн. наук, доц.

Московского государственного университета инженерной экологии

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗОБЖИГОВОГО СИЛИКАТНОГО ГРАВИЯ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ И КРЕМНЕЗЕМИСТЫХ ОТХОДОВ МЕТОДАМИ КОМПАКТИРОВАНИЯ И ПРОКАТКИ НА РОТОРНЫХ ГРАНУЛЯТОРАХ*

makarenkovd@mail.ru

Рассмотрены вопросы получения гранулированного безобжигового силикатного гравия. Предложены методы определения оптимальной прочности прессовок и гранул. Определены структурно-деформационные характеристики получаемого гранулята. Приведен механизм образования плотно-прочных гранул при компактировании материала.

Для получения гранулята цилиндрической формы рекомендовано применять роторные грануляторы с плоской матрицей.

Ключевые слова: зола, шлак, прочность на раскалывание и сжатие, время хранения, сыпучесть, гранула, брикет, матрица, связующее, роторный пресс.

Экологическая ситуация в России определяется двумя факторами: уменьшением расхода на охрану окружающей среды и меньшими, чем ранее, масштабами хозяйственной деятельности. В 2011 году в целом по России образовалось более 130 млн т. отходов, из которых использованы и обезврежены только (35÷40) %.

В общем объеме промотходов доля макулатуры, древесных и золошлаковых отходов составляет около 1%. Мелкодисперсность, многокомпонентность и экологическая опасность этих отходов делает их переработку методами гранулирования важной народно-хозяйственной задачей.

Известно, что ввод связующих, добавок и механоактивация материала, позволяет перед гранулированием получить шихту с заданным набором характеристик, соответствующим параметрам определенной реологической модели среды [1, 2, 3, 4]. Качество компактированной и гранулированной шихты определяется прочностными характеристиками плитки, прессовок и гранул, что позволяет рассчитать силовые параметры основного и вспомогательного оборудования [1, 5].

Прочность гранулированных продуктов обычно определяют используя методы истирания и динамических нагрузок, а также методы статических испытаний [5].

Прочностные испытания позволяют сравнивать технологии гранулирования, эксплуатационные свойства гранул и выбирать оптимальные режимные параметры процесса их получения.

Из методов определения прочности часто выбирают вероятностно-статистический подход, используя способы разрыва прессовок или их раздавливания (раскалывания) по боковой образующей или по торцевой поверхностям. Значения прочности прессовок на разрыв и раскалывание отличаются большим разбросом. Более обоснованным и точным является метод испытаний на

диаметральное сжатие, основанный на использовании нагружающих плит кругового профиля (рис.1). Такие плиты позволяют подбирать ширину зоны контакта таким образом, чтобы избежать разрушения вблизи поверхности контакта, а также предотвратить сложное ветвление при распространении трещин. Знание прочностных характеристик даже при отсутствии строгой физико-химической теории прочности материалов позволяет обоснованно проводить силовой расчет прессового оборудования.

Дефицит природных сырьевых материалов используемых в производстве наполнителей тяжелых бетонов, а также искусственных пористых обжиговых заполнителей, (керамзит, аглопорит и другие) привел к выпуску безобжиговых гранулированных заполнителей. Например, на основе золошлаковых отходов металлургических комбинатов разработана технология гранулирования окатышем на тарели [6].

Ресурсом для наполнителей бетонов также являются золошлаковые отходы мусоросжигательных заводов, количество которых непрерывно растет. Особенностью золошлаковых отходов является их сложный минералогический, химический и гранулометрический состав [7]. Фракционный состав шлаков и золы с фильтров МСЗ составляет от 0,05 мм до 0,2 мм. с повышенным содержанием оксидов SiO₂, CaO, Al₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O, что повышает их гидрохимическую активность. Следует также отметить опасность отходов мусоросжигания из-за наличия соединений класса полихлорированных бифенилов (типа ПХДД и ПХДФ), а также подвижных форм тяжелых металлов (свинец, кадмий, цинк, медь, хром). Однако процессы гранулирования и капсулирования позволяют их изолировать от твердой и водной среды.

В Московском государственном университете инженерной экологии совместно с ОАО «Мос-

ковский институт материаловедения и эффективных технологий» («ИМЭТ») разработана комплексная технология их утилизации. В качестве грануляторов могут использоваться валковые пресса с получением гранулята в виде плитки, а также дырчатые вальцы и роторные грануляторы с кольцевой или плоской матрицей. Они позволяют получать цилиндрические гранулы.

Комплексные исследование процесса прессования проводили в закрытой матрице, определяя при этом «уплотняемость» и «формуемость» золошлаковых шихт различных составов (табл. 1).

Таблица 1

Составы смесей при приготовлении гранулированных заполнителей

№	Компонент смеси %, масс	Номер смеси			
		1	2	3	4
1	Цемент	15	25	15	25
2	Зола	10	7	10	7
3	Шлак	70	49	70	49
4	Песок	–	17	–	17
5	Известь	5	2	5	2
6	Удельная поверхность смеси \bar{S} (см ² /г) без помола	–	–	3631	2449
7	Удельная поверхность смеси \bar{S} (см ² /г) после помола с механоактивацией	6000	6000	–	–

Был реализован процесс одностороннего прессования в матрице с получением цилиндрических прессовок с плоскими торцами. Наряду с таблетками с гладкой поверхностью в закрытой матрице можно изготавливать брикеты. Для этого в верхних и нижних пуансонах выполняются углубления, моделирующие форму брикетов. В этих матрицах получали брикеты со сферической поверхностью диаметром 11 мм и 29 мм, при высоте брикета 4 мм и 20 мм, соответственно. Меняя профиль углублений в верхнем и нижнем пуансонах, можно отработать форму и размеры углублений и затем выполнять их на поверхности вальца (или его сменного элемента). Это позволяет отработать конструкцию вальца или сменного элемента с минимальными затратами на изготовление брикетного пресса.

При гранулировании насыпную плотность $\rho_{нас}$ [кг/м³], исходную влажность W [% масс.], плотность прессовки $\rho_{пр}$ или плитки $\rho_{пл}$ [кг/м³] определяли по стандартным методикам.

Предел прочности образца на растяжение (раскалывание) σ_p [МПа] определяли при его нагружении плоскими плитами или плитами с цилиндрической выемкой, прикладывая осевую нагрузку перпендикулярно боковой поверхности по формуле:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{\pi \times d_m \times h_m} \quad (1)$$

где F_p – разрушающее усилие, Н; d_m, h_m – диаметр и высота таблетки, м.

При нагружении плитами с цилиндрической выемкой (рис.1) пределы прочности на растяжение (раскалывание) и максимальное растягивающее напряжение определяются по зависимостям:

$$\sigma_H = \left[1 - 1,15 \times \left(\frac{b}{R}\right)^2 + 0,22 \left(\frac{b}{R}\right)^3 \right] \times \sigma_p \quad (2)$$

$$\sigma_p = \frac{P}{\pi \times R \times t} \quad (3)$$

где t – толщина дискового образца; b – полуширина зоны контакта; P – разрушающее усилие на оси нагружения диска.

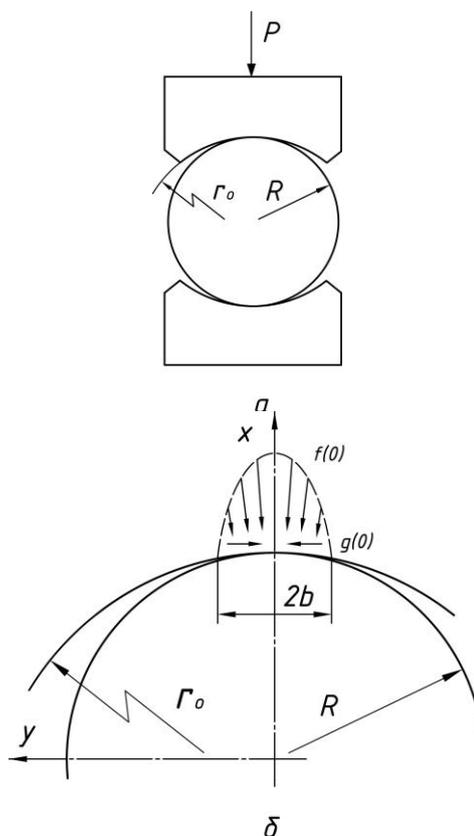


Рис. 1. Метод испытаний на диаметрально сжатие (а) и распределение контактных напряжений в диске, нагружаемом плитами кругового профиля (б)

Исследования процесса компактирования методом прокатки с получением плитки проводили на валковом прессе ПД320 160/160. Бункера загрузки шихты имели сечение 70×60 мм и 135×112 мм. Для различных типов шихты при непрерывном режиме работы в зависимости от режимных параметров компактирования определяли плотность и прочность плитки, производительность пресса и сыпучесть шихты.

При трехточечном нагружении (рис. 2) предел прочности прямоугольной плитки на поперечный изгиб (излом) определяли по формуле:

$$\sigma_{изг} = \frac{3 \times P_{изг} \times L_0}{2 \times b_{II} \times b_{II}^2} \quad (4)$$

где $P_{из}$ – разрушающее усилие, кг; $b_{п}$ – толщина и ширина плитки, см; r_0 – расстояние между опорами, см.

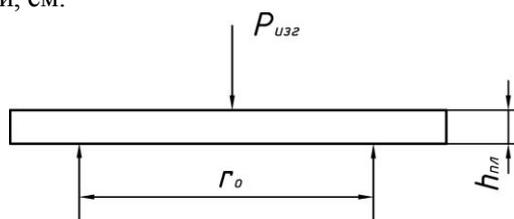


Рис. 3. Схема нагружения плитки при трехточечном изгибе

Сыпучесть золошлаковых шихт определяли на валковом прессе со сменными бункерами и рассчитывали по формуле:

$$c = \frac{G_m}{S_{ш} \times \tau_b} \quad (5)$$

где G_m – количество материала, просыпающегося за определенное время через установленный зазор, кг; τ_b – время высыпания шихты, с; $S_{ш} = h_b \cdot B$ – площадь сечения, образованного зазором между валками и границами бункера, м²; B – длина зазора, м.

На рис. 3 приведены зависимости изменения плотности прессовок от удельного давления прессования и характеристик компонентов шихты. Влажность шихты (связующее вода) при исследовании изменялась от 5 % до 15 %. При насыпной плотности исходных порошков 900–1000 кг/м³ максимальная плотность прессовок составляет 2000–2100 кг/м³. Плотно–прочные прессовки начинают получаться в диапазоне давлений (5–10) МПа. Из сопоставления компрессионных кривых можно выделить кривые 1, 4 и 5 (смеси без песка) с максимальной плотностью $P_{пл} = 1900$ кг/м³ при $P_{уд} = 25–40$ МПа. Для кривых 2 и 3 уже при $P_{уд} = 10,3$ МПа достигается плотность 1800–1900 кг/м³. Увеличение удельной поверхности шихты за счет помола с 2449 до 6000 см²/г не влияет на увеличение плотности прессовок.

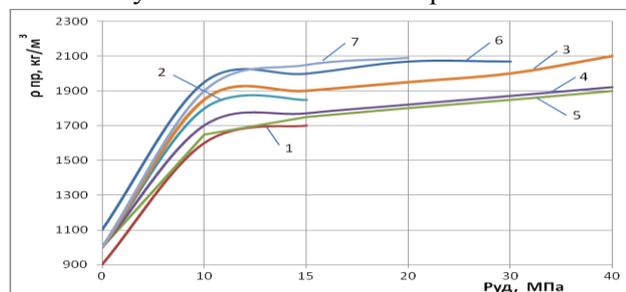


Рис. 3. Зависимость плотности прессовок от удельного давления прессования и исходной влажности:

- 1 – смесь № 1, $W_{и} = 5\%$; 2 – смесь №1, $W_{и} = 10\%$;
- 3 – смесь № 1, $W_{и} = 15\%$; 4 – смесь № 3, $W_{и} = 6\%$;
- 5 – смесь № 3, $W_{и} = 11\%$; 6 – смесь № 2, $W_{и} = 15\%$; 7 – смесь № 4, $W_{и} = 12,5\%$

Известно, что диапазон рабочих давлений прессования на прессующем или формующем оборудовании определяется прочностью получаемых прессовок [1]. В то же время наличие в шихте вяжущих или протекание твердофазных реакций во время хранения гранул приводит к росту прочности прессовок и при меньших давлениях прессования.

На рис.4 приведены зависимости прочности прессовок от различных параметров. При времени хранения прессовок (1–2) часа и влажности $W_{и} = 5\%$ прочность прессовок на раскалывание $\sigma_p = (0,1–0,4)$ МПа, (кривые 1, 2, 3 и 5). Увеличение влажности до (10–15)% для смесей без песка с повышенным содержанием шлака и золы приводит при увеличении давления от 5 МПа до 40 МПа к росту прочности прессовок в (1,7–5) раз (см. кривые 4 и 6).

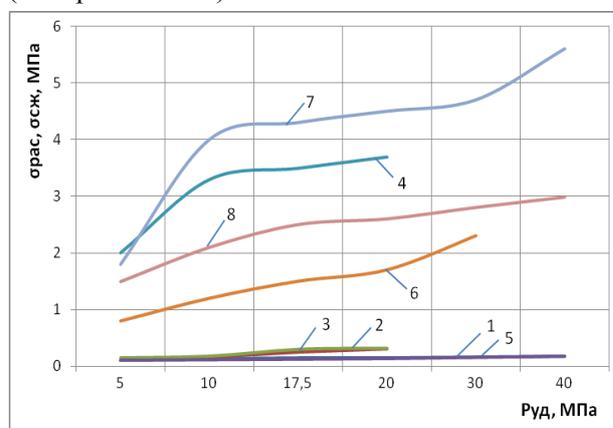


Рис. 4. Зависимость предела прочности прессовок на растяжение и сжатие от удельного давления и исходной влажности:

- 1 – σ_p смеси № 1, $W_{и} = 5\%$; 2 – $\sigma_{сж}$ смеси № 1, $W_{и} = 5\%$; 3 – σ_p смеси № 1, $W_{и} = 10\%$; 4 – $\sigma_{сж}$ смеси № 1, $W_{и} = 10\%$; 5 – σ_p смеси № 1, $W_{и} = 15\%$; 6 – $\sigma_{сж}$ смеси № 1, $W_{и} = 15\%$; 7 – $\sigma_{сж}$ смеси № 3, $W_{и} = 10\%$, $\tau_{хр} = 72$ ч; 8 – $\sigma_{сж}$ смеси № 4, $W_{и} = 15,5\%$, $\tau_{хр} = 48$ ч.

При большом времени хранения прессовок до 75 часов прочные гранулы получаются при давлении 10 МПа. При выдержки гранул в течении 1 часа прочность получается в 2 раза меньше, что объясняется недостатком влаги (смесь №1). Здесь влага расходуется на протекание твердофазных и обменных реакций между реакционно–способными частицами шихты.

Содержащиеся в золе и шлаке гидравлически активные фазы, обладающие вяжущими свойствами, (силикаты, алюминаты и ферриты кальция) оказывают минимальное воздействие на получаемую прессовку из–за недостатка влаги. Это приводит к образованию воздушных пор, сокращающих поверхность действия капиллярных сил. Необходимо отметить, что избыток связующей жидкости при прессовании многокомпонентных шихт также нежелателен, так как расклинивающий эффект водных прослоек возрастает и может превысить влияние капиллярных сил сжатия.

Графическая зависимость сил сцепления частиц от соотношения «вода–шихта» носит экстремальный характер. Для исследуемых шихт оптимальный диапазон количества вводимого связующего составил от 5 % до 15 %.

Из кривой 7 (рис.4) видно, что у смеси №3 (без песка и с малой удельной поверхностью $S_{уд}=3631 \text{ см}^2/\text{г}$) величина $\sigma_{сж}$ при времени хранения $\tau_{кр}=72 \text{ ч}$ величина возрастает 5,5 МПа. Установлено, что для данных структур увлажнение порошков обеспечивает увеличение прочности свободнодисперсной системы за счет ее перехода из бесструктурной системы в коагуляционную. При этом прочность слоя увлажненного порошка возрастает, несмотря на уменьшение числа межчастичных контактов. Возрастающие в слое шихты силы сцепления препятствуют перемещению и уплотнению частиц, что снижает плотность их упаковки.

Характер изменения $\sigma_{сж}$ от $P_{уд}$ (кривая 8) для смеси №4 с песком ($S_{уд} = 2449 \text{ см}^2/\text{г}$) аналогичен изменению прочности смеси №3 (кривая 7). Следует заметить, что при небольшом времени хранения прочность после $P_{уд} = 17,5 \text{ МПа}$ практически остается постоянной и $\sigma_{сж} = (2,5 \div 2,8) \text{ МПа}$. Если прессовки хранятся больше 2 часов, то при достаточном количестве влаги ($W_{исх} = 12,5 \div 15,5\%$) протекают процессы твердения вяжущих различной природы. За счет этого прочность прессовок полученных при более высоких давлениях ($P_{уд} = 25 \div 30 \text{ МПа}$) больше исходной примерно в 2 \div 3 раза.

В общем случае наличие в шихте золы и шлака, содержащих оксиды CaO , Al_2O_3 и SiO_2 , а также цементного клинкера приводит к образованию прочных одноосновных силикальцитов. При этом за счет гидролиза и гидратации происходит твердение цементных растворов с образованием коллоидов гидросиликатов и гидроферритов.

Прочность сцепления частиц в гранулированных новообразованиях зависит как от наличия пластичных компонентов, пористости зерен материала, так и от механоактивации шихты, и, следовательно, от удельной поверхности. Эта зависимость аналогична формуле В.И. Коротича [8]:

$$\sigma_{сж} \approx \left(K \times S_0 \times \rho_{уд} \times \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \right) \quad (6)$$

где $\rho_{уд}$ – плотность материала; S_0 – удельная поверхность прессовки; ε – пористость; K – коэффициент, учитывающий форму и характер укладки частиц в образце.

На рис. 5 и рис. 6 приведены зависимости изменения прочности от времени хранения.

На рис. 5 для смеси №2 можно выделить 3 семейства кривых: при удельном давлении $P_{уд} = 5,15 \text{ МПа}$ (кривая 1), при «среднем» $P_{уд} = 10,3; 12,3 \text{ и } 17,5 \text{ МПа}$ (кривые 2, 3, 4) и при «высоком» $P_{уд} = 61,7 \text{ МПа}$ (кривая 5). Установлено,

что для этой смеси с $W_{и} = 9\%$, а также диапазоне изменения влажности от 9 % до 15 % при тех же удельных давлениях $\sigma_{рас}$ практически не растет после 24 часов хранения. Упрочнение прессовок здесь обеспечивается протеканием твердофазных и обменных реакций между компонентами шихты при силовом воздействии на смесь порошков с высокой удельной поверхностью.

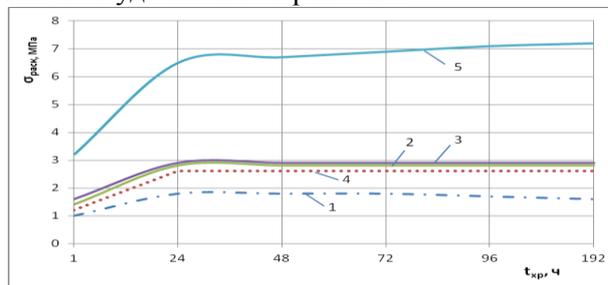


Рис. 5. Зависимость предела прочности прессовок на раскалывание от времени хранения и удельного давления прессования (смесь № 2, $W_{и} = 9\%$): 1 – $P_{уд} = 5,15 \text{ МПа}$; 2 – $P_{уд} = 10,3 \text{ МПа}$; 3 – $P_{уд} = 12,3 \text{ МПа}$; 4 – $P_{уд} = 17,5 \text{ МПа}$; 5 – $P_{уд} = 61,7 \text{ МПа}$

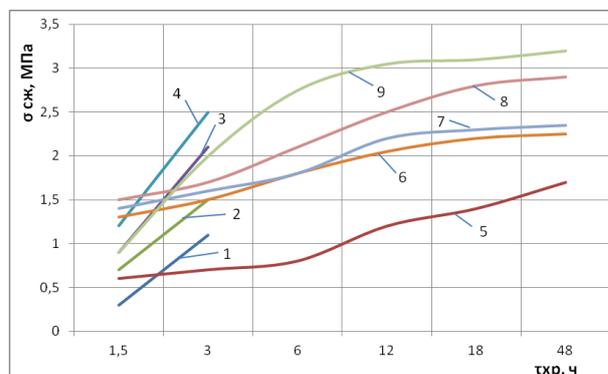


Рис. 6. Зависимость предела прочности на сжатие смеси № 4 от исходной влажности, удельного давления и времени хранения прессовок: 1 – ($W = 12,5\%$, $P_{уд} = 5,15 \text{ МПа}$); 2 – ($W = 12,5\%$, $P_{уд} = 10,3 \text{ МПа}$); 3 – ($W = 12,5\%$, $P_{уд} = 17,5 \text{ МПа}$); 4 – ($W = 12,5\%$, $P_{уд} = 41,5 \text{ МПа}$); 5 – ($W = 15,5\%$, $P_{уд} = 5,15 \text{ МПа}$); 6 – ($W = 15,5\%$, $P_{уд} = 10,3 \text{ МПа}$); 7 – ($W = 15,5\%$, $P_{уд} = 17,5 \text{ МПа}$); 8 – ($W = 15,5\%$, $P_{уд} = 41,2 \text{ МПа}$); 9 – смесь № 1 ($W_{и} = 15\%$; $P_{уд} = 17,5 \text{ МПа}$)

Для смеси №4 с малой удельной поверхностью (рис. 6) при влажности $W_{исх} = 12,5\%$ при давлениях от 5,15 МПа до 41,2 МПа наблюдается резкий рост $\sigma_{сж}$ в течение 3 часов хранения (кривые 1, 2, 3, 4). В зависимости от величины $P_{уд}$ $\sigma_{сж}$ растет с 2 до 30 кг/см². При влажности 15,5 % наблюдается плавный рост $\sigma_{сж}$ в течение 48 часов (кривые 5–8). Такое различие в динамике роста прочности объясняется тем, что при влажности от 10% до 12,5 % вся влага расходуется на твердение цементного клинкера золы и извести. Все давление здесь расходуется на создание прочной структуры. При влажности $W_{и} = 15,5\%$ появляется избыток влаги, и давление прессования частично расходуется не на уплотнение структуры, а на выдавливание влаги из прессовки. Влага перераспределяется в объеме смеси и твер-

дение прессовки растягивается во времени. Увеличение удельной поверхности для смеси №1 без песка и при $W_{и} = 15\%$ (кривая 9) позволяет использовать все вяжущие компоненты смеси, что обеспечивает рост прочности прессовок во времени за 48 часов. При определении прочности прессовок с использованием профилированных плит было установлено, что их прочность при $h_T = (0,3 - 0,8)D_T$ в 1,3 – 1,6 раза выше, чем при разрушении плоскими плитами.

При прокатке шихты на многотонажных валковых и брикетных прессах надежность работы определяется сыпучестью шихты подаваемой из загрузочного бункера через зазор между валками. При размере бункера 70×60 мм с диаметром гладкого вала $\Phi_B = 160$ мм и зазором 14,5 мм смесь №1 при влажности 15 % имела низкую сыпучесть ($100 \div 229$) кг/м²с. У эмалевых шихт (грунтовых), содержащие около (40÷59) % ваграночного шлака при влажности от 6 % до 8 %, имеют сыпучесть (600÷900) кг/м²с. Для подачи золошлаковых порошковых смесей с низкой сыпучестью, чтобы исключить ее зависание в загрузочном бункере обычно используют вибратор.

Компактирование золошлаковых отходов проводили из смеси №1 с $W_{и} = 16\%$; при размере бункера 132×112 мм. Толщина плитки в опытах составляла 3,4 и 6 мм при производительности 1270, 1350 и 1800 кг/ч, соответственно. Количество просыпи составляло от 5 % до 10 %. При этом была получена плотно-прочная плитка ($\sigma_{из} = 3 \div 5$ МПа; $\rho_{пл} \approx 1700$ кг/м³). Для моделирования работы брикетного пресса на специальной матрице при $P_{уд} = 18,8$ и $P_{уд} = 31,4$ МПа и влажности 14 – 18% были получены эллипсоидные прессовки с $\Phi_{п} = 28,7$ мм и высотой прессовки $h_{пр} = (18 \div 20)$ мм. Часть прессовок хранилась при нормальной температуре, а другая сразу подсушивалась при $T_{суш} 120$ °С в течение 80 мин. Подсушенные прессовки обладали высокой прочностью ($\sigma_{сж} = 3 \div 4$ МПа) и не осыпались при динамических нагрузках. Нарботка партий безобжигового гранулята показала возможность его получения в виде плитки и брикетов с криволинейной поверхностью. Это позволило рекомендовать в качестве гранулирующего оборудования валковые пресса с $\Phi_B = 500$ мм и брикетные пресса со сменными элементами.

Для получения гранулята цилиндрической формы можно рекомендовать роторные грануляторы с плоской матрицей. При диаметре матрицы 900 мм, диаметре отверстий от 6 мм до 12 мм и живом сечении каналов $\phi = (30 \div 42)\%$, производительность составляет от 1,5 т/ч до 3 т/ч.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Процесс уплотнения золошлаковых смесей происходит с получением плотнопрочных

прессовок при $W_{и} = (10 \div 15)\%$ и удельном давлении прессования от 10 МПа до 40 МПа; 2. При времени хранения прессовок от 3 до 18 часов достигается максимальная прочность $\sigma_{рас} = (0,5 \div 2,5)$ МПа и $\sigma_{сж} = (1,5 \div 4,5)$ МПа; 3. Рост прочности прессовок происходит в течение первых 24 часов хранения, а увеличение времени не приводит к повышению прочности; 4. Более прочные прессовки получаются из механоактивированных смесей с большой удельной поверхностью $S_{уд} = 6000$ кг/см²; 5. Показана возможность получения гранулированного безобжигового силикатного гравия в виде плитки, брикетов и цилиндрических гранул на валковых, брикетных и роторных грануляторах.

**Работа выполнена в рамках государственного контракта №16.515.12.5014 от 11.10.2011 года заключенном между Министерством образования и науки РФ и Московским государственным университетом инженерной экологии (МГУИЭ), разработана комплексная технология их утилизации.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаров В.И., Мелконян Р.Г., Калыгин В.Г. «Техника уплотнения стекольных шихт». Под общей редакцией О.С. Чехова. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 128 с.
2. Назаров В.И., Макаренков Д.А. «Управление процессами грануляции полидисперсных шихт и порошков методами компактирования и окатывания на основе реологических моделей». Химическое и нефтегазовое машиностроение 2005. – № 6. – с. 6–9.
3. Назаров В.И., Булатов И.А., Макаренков Д.А. «Особенности разработки процесса прессового гранулирования биотоплива на основе древесных и растительных отходов». Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2009. – 229 с.
4. Ильина Т.Н. «Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов»: монография Т.Н. Ильина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 229 с.
5. Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюмануэра. Пер с нем. 1979 г, 448 с.
6. Рыжков Ф.Н. Технологические параметры получения безобжиговых гранулированных заполнителей на основе тонкомолотых металлургических шлаков/ Ф.Н. Рыжков// Изв. Вузов. Строительство.–2005.–№8, с.39–42
7. Гонопольский А.М., Дыган М.М., Тимофеева А.Г. Некоторые физико-химические свойства золошлаковых отходов мусоросжигательных заводов. – Экология и промышленность России, 2008. – № 7. – С. 36–39.
8. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов.– М.: Металлургия, 1966.–152 с.