

УДК 66.04:628.545

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ФОСФОГИПСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ СЖИГАЕМЫХ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

КРОТ О. П.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

ВИННИЧЕНКО В. И.^{2*}, д-р техн. наук, проф.

РОВЕНСКИЙ А. И.^{3*}, канд. техн. наук.

^{1*}Кафедра безопасной жизнедеятельности и инженерной экологии, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина, тел. +38(095)414-84-58, e-mail: uch.opk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2376-4981

^{2*}Кафедра механизации строительных процессов, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина, тел. +38(050)167-97-05, e-mail: vvinnichenko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3700-5414

^{3*}Отдел региональной экологии, Северо-Восточный научный центр НАН и МОН Украины, ул. Багалия, 8, Харьков, 61000, Украина, тел. 38(050)402-08-10, e-mail: uch.opk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3803-2051

Аннотация. *Постановка проблемы.* Использование ресурсов, не нашедших прямого применения по назначению, является одной из важных задач устойчивого развития городов. Во всем мире осознается необходимость принятия комплексного подхода к проблеме утилизации отходов. В последние десятилетия в Украине наблюдается тенденция существенного увеличения их количества. Европейский опыт обращения с твердыми бытовыми отходами использует различные методы переработки: рециклинг на основе раздельного сбора, сортировку, компостирование и термическую переработку с выработкой тепловой и электрической энергии. В Украине наиболее распространенным способом обращения с отходами остается захоронение на полигонах, которые не отвечают европейским стандартам, не оборудованы должным образом, на них не соблюдаются нормы и правила складирования. Это приводит к загрязнению грунтовых вод, а также к выделению в атмосферу различных соединений. Не меньшей проблемой является накопление в отвалах промышленных предприятий фосфогипса. Необходимо разработать инновационную технологию комплекса по утилизации фосфогипса с использованием тепловой энергии твердых бытовых отходов. **Цель статьи** – выполнить сопоставление технологических характеристик агрегатов для сжигания ТБО и производства полуводного гипса для выявления возможности их сопряжения, а также сформулировать задачи для устранения несоответствия в сопрягаемых технологиях. Предложено оборудование тепловых агрегатов сопрягаемых технологий.

Ключевые слова: муниципальные отходы; сжигание; отходы в энергию, фосфогипс; обжиг; энергоемкость; вращающаяся печь

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ФОСФОГІПСУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

КРОТ О. П.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

ВИННИЧЕНКО В. І.^{2*}, д-р техн. наук, проф.

РОВЕНСЬКИЙ О. І.^{3*}, канд. техн. наук.

^{1*}Кафедра безпеки життєдіяльності та інженерної екології, Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, тел. +38(095)414-84-58, e-mail: uch.opk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2376-4981

^{2*}Кафедра механізації будівельних процесів, Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, тел. +38(050)167-97-05, e-mail: vvinnichenko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3700-5414

^{3*}Відділ регіональної екології, Північно-Східний науковий центр Національної академії наук України, вул. Багалия, 8, Харків, 61000, Україна, тел. 38(050)402-08-10, e-mail: uch.opk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3803-2051

Анотація. *Постановка проблеми.* Використання ресурсів, що не знайшли прямого застосування за призначенням, – одне з важливих завдань сталого розвитку міст. У всьому світі усвідомлюється необхідність прийняття комплексного підходу до проблеми утилізації відходів. В останні десятиліття в Україні спостерігається тенденція істотного збільшення їх кількості. Європейський досвід поводження з твердими побутовими відходами застосовує різні методи переробки: рециклинг на основі роздільного збирання, сортування, компостування і термічну переробку з виробленням теплової та електричної енергії. В Україні найбільш поширеним способом поводження з відходами залишається поховання на полігонах, які не відповідають європейським стандартам, не обладнані належним чином, на них не дотримуються норми і правила складування. Це спричинює забруднення грунтових вод, а також виділення в атмосферу різних сполук. Не меншою проблемою бачиться накопичення у відвалах промислових підприємств фосфогіпсу. Необхідно розробити інноваційну технологію комплексу з утилізації фосфогіпсу з використанням теплової енергії твердих побутових відходів. **Мета статті** – виконати співставлення технологічних характеристик агрегатів для

спалювання ТПВ та виробництва напівводного гіпсу для виявлення можливості їх сполучення, а також сформулювати завдання для усунення невідповідності в сполучених технологіях. Запропоновано обладнання теплових агрегатів сполучених технологій.

Ключові слова: муніципальні відходи; спалювання; відходи в енергію, фосфогіпс; випал; енергоємність; обертова піч

THERMAL PROCESSING OF PHOSPHOGYPSUM WITH USING ENERGY OF INCINERATED SOLID HOUSEHOLD WASTE

KROT O. P.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
VINNICHENKO V. I.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
ROVENSKYI O. I.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*}Department of safety life and environmental engineering, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Sumskaya str., 40, Kharkov, 61002, Ukraine, tel. +38(095)414-84-58, e-mail: uch.opk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2376-4981

^{2*}Department of mechanization of construction processes, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Sumskaya str., 40, Kharkov, 61002, Ukraine, tel. +38(050)167-97-05, e-mail: vvinnichenko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3700-5414

^{3*}Department of the regional ecology, North-East Scientific Center of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Bahalii, 8, Kharkov, 61000 Ukraine, tel.38(050)402-08-10, e-mail: uch.opk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3803-2051

Summary. The use of resources that have not been directly used for their intended purpose is one of the important tasks of sustainable urban development. The need for an integrated approach to the problem of waste management is realized all over the world. In recent decades, there has been a trend in Ukraine for a significant increase in waste. European experience in handling solid domestic waste uses various processing methods: recycling on the basis of separate collection, sorting, composting and thermal processing with generation of thermal and electric energy. In Ukraine, the most common method of handling waste remains burial in landfills that do not meet European standards, are not properly equipped, they do not comply with the norms and rules of storage. This leads to contamination of groundwater, as well as to the release into the atmosphere of various compounds. No less problem is the accumulation of phosphogypsum in industrial waste dumps. It is necessary to develop innovative technology of a complex for utilization of phosphogypsum using thermal energy of solid domestic waste. The article compares the technological characteristics of aggregates for incineration of solid waste and the production of semi-aqua gypsum to identify the possibility of their interfacing, and also formulated tasks for eliminating inconsistencies in interfaced technologies. The equipment of thermal units of interfaced technologies is offered.

Keywords: municipal waste; incineration; waste-to-energy, phosphogypsum; burning; energy intensity; rotary kiln

Постановка проблеми. Активное взаимодействие человека со средой обитания, направленное на разработку и изготовление материальных благ, включая добычу и переработку полезных ископаемых и природных ресурсов, производство строительных деталей и материалов, производство энергии и энергоносителей, приводит к образованию и высвобождению большого количества отходов в окружающую среду.

Большинство как промышленных, так и бытовых отходов утилизируются на полигонах в подходящих местах, но их захоронение не всегда является предпочтительным вариантом. В настоящее время накоплено значительное количество отходов химической промышленности. В частности, фосфогипс не утилизируется, а складывается в отвалах, ухудшая санитарное состояние всего промышленного комплекса и экологическую обстановку прилегающей к

нему территории. Для создания отвалов фосфогипса необходимо постоянно отчуждать большие участки земель, зачастую плодородных, эти площадки нередко превышают размеры промышленных площадок самих предприятий [9].

Фосфогипс является побочным продуктом производства фосфорных удобрений и фосфорной кислоты из природных фосфатных пород. На тонну производства фосфорной кислоты вырабатывается около 5 тонн фосфогипса. Фосфогипс как объект утилизации в своем составе содержит более 90 % кристаллов $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, и может быть отнесен к гипсовому сырью. Примеси, которые содержатся в фосфогипсе, – это в основном продукты недоразложения фосфатного сырья и фториды, причем суммарно содержание F и P_2O_5 не более (1,5 – 2) %.

Авторами [5] установлено, что в Украине имеются четыре разновидности фосфогипса: отвалный фосфогипс из апатитового концентрата со сроком хранения 10–30 лет, отвалный фосфогипс из фосфоритов со сроком хранения менее 10 лет, свежесформируемый фосфогипс из фосфоритов и отвалный фосфогипс полученный из урансодержащих фосфоритов. Фосфогипс в основном состоит из двухводного гипса, но также содержит примеси, такие как фосфаты, фториды и сульфаты, встречающиеся в природе радионуклиды, тяжелые металлы и другие микроэлементы. Все это приводит к негативному воздействию на окружающую среду [10]. Вопрос переработки гипсосодержащих отходов является особенно актуальным.

Анализ публикаций. На протяжении многих лет проблеме утилизации фосфогипса не уделялось должного внимания, что привело к образованию большого количества его отвалов. Его транспортирование на полигоны и хранение связаны с большими капитальными вложениями и эксплуатационными затратами, а для создания отвалов необходимо отчуждать большие площади земель, ресурсы которых к настоящему времени исчерпаны.

Среди перспективных методов утилизации фосфогипса можно выделить такие направления: безотходная термохимическая утилизация фосфогипса с получением вяжущих; использование фосфогипса для производства строительных материалов и изделий [11].

В работах [7; 9] проведен обзор и сделаны выводы о повышенной энергоёмкости существующего оборудования для производства строительного гипса из фосфогипса. Обоснована целесообразность применения обжига материала в тонкодисперсном состоянии. Представлены результаты проведенного обжига фосфогипса во взвешенном состоянии в помольно-обжиговой установке. Установлено, что качество полученного из фосфогипса

строительного гипса соответствует требованиям существующих стандартов, а время обжига существенно сокращается по сравнению с применяемыми в настоящее время машинами.

При тепловой обработке гипса различают следующие стадии процесса: подвод теплоты к поверхности частиц или кусков исходного материала, испарение физической влаги, нагрев материала до температуры дегидратации и химическая реакция дегидратации гипса. Анализ научных исследований по утилизации фосфогипса для получения из него строительного гипса и других строительных материалов и изделий раскрыл проблему энергоёмкости этих технологий.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что отвалный фосфогипс состоит в основном из двухгидрата сульфата кальция, свежий фосфогипс представлен полугидратом сульфата кальция.

Технологический процесс дегидратации двухводного гипса состоит из совокупности технологических операций, направленных на изменение исходного материала с целью придания ему свойств вяжущего. В технологии гипсовых вяжущих, предназначенных для строительства, применяют в основном следующие основные стадии технологического процесса: дробление, сушка, помол или совмещение сушки и помола и дегидратация. Последовательность операций зависит от физических свойств сырья, вида применяемого для дегидратации оборудования и требований к качеству конечного продукта.

Технологические линии по выпуску гипсовых вяжущих условно разделяют на несколько видов по способу термической обработки природного двухгидрата.

Первую группу составляют сообщающиеся с наружной атмосферой установки – вращающиеся барабаны и установки для совместного помола и обжига, в которых господствующей средой, непосредственно соприкасающейся с обжигаемым материалом, является воздух или газообразные продукты сжигания

топлива. Ко второй группе относятся герметически закрытые демпферы и автоклавы, в которых материал подвергается термической обработке насыщенным водяным паром, при избыточном давлении 0,3–0,8 МПа. Третью группу тепловых установок для дегидратации гипса составляют гипсоварочные котлы, в которых обжигаемый материал не приходит в непосредственное соприкосновение с газами и передача тепла от газов к материалу происходит через стенки. К этой же группе относятся вращающиеся печи с косвенным обогревом материала.

Основная проблема переработки фосфогипса в полуводный гипс, по мнению авторов, заключается не столько в экологической опасности примесей, входящих в отвальный фосфогипс, сколько в его тонкодисперсности, наличии в нем физической влаги, а также в различии кристаллической структуры в сравнении с ископаемым двуводным гипсом [2]. Это связано с тем, что фосфогипс имеет обычно игольчатую кристаллическую форму, которая обуславливает высокое водопотребление и низкую прочность частиц фосфогипса. Этим объясняется меньшая энергоемкость и большая стабильность процесса производства строительного гипса именно из ископаемого природного двугидрата. Разработка комплекса, позволяющего перерабатывать влажный и высокоадгезивный фосфогипс, используя тепло сгорания бытовых отходов, соответствует синергетической концепции экологически эффективной утилизации.

Цель статьи. Сопоставить технологические характеристики агрегатов для сжигания ТБО и производства полуводного гипса для выявления возможности их сопряжения, а также сформулировать задачи для устранения несоответствия в сопрягаемых технологиях. Предложить оборудование тепловых агрегатов сопрягаемых технологий.

Изложение материала. Сжигание твердых бытовых отходов (ТБО), включая

восстановление тепла, применяется в более чем 450 энергетических объектах по всей Европе и многих других странах мира. Наблюдается изменение морфологического состава бытовых отходов, а именно рост полимерной составляющей в отходах, за счет увеличения доли упаковочных материалов и уменьшения доли пищевых отходов. Как следствие – рост теплотворной способности ТБО в 2,5 раза, что приравнивает их к традиционным видам топлива.

Значение теплотворной способности ТБО зависит от нескольких факторов. Прежде всего, от процентного содержания отдельных компонентов, особенно высококалорийных, например, высшая теплотворная способность пластмассы 33 МДж/кг. Высшая теплотворная способность — количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании вещества, включая теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания. В исследованиях [3] значения теплоты сгорания ТБО находились в пределах от 9,24 до 12,1 МДж/кг.

Принцип действия технологии сжигания муниципальных отходов заключается в следующем. Установки для сжигания во вращающихся печах являются более универсальными в том смысле, что они могут быть использованы для уничтожения твердых отходов, шламов и отходов в контейнерах, а также жидкостей. Эти устройства чаще всего включаются в коммерческие проекты по сжиганию отходов [8].

Для завершения газофазовых реакций горения необходимо дожигание. Это один из этапов обезвреживания газовых выбросов, повышающий при этом тепловой к. п. д. установки. Камера дожигания (рис. 1) соединена непосредственно с выпускным концом печи. Фактором, определяющим эффективность обезвреживания, является температура процесса и соотношение компонентов горения.

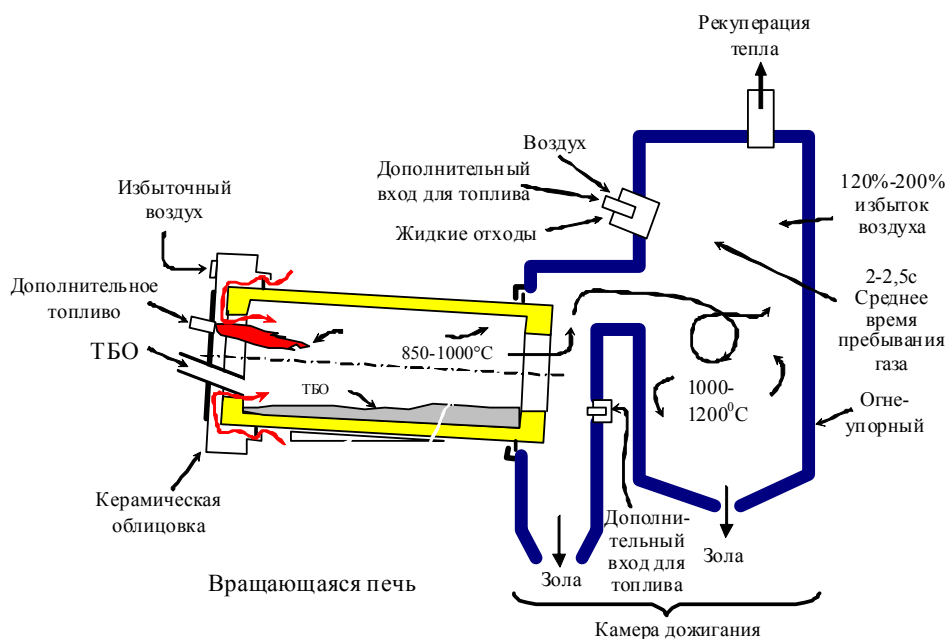


Рис.1. Установка для сжигания отходов

Для разложения органических соединений, таких как спирты, кислоты, альдегиды, достаточный интервал температур 850–900 °С, а для термического обезвреживания отходящих газов от полициклических ароматических и хлорорганических соединений необходима температура 1 000–1 300 °С. Необходимо соблюдать время выдержки газообразных продуктов сжигания не менее 2 секунд, при коэффициенте избытка воздуха 1,4–1,5 для полного разложения токсичных веществ. После камеры дожигания отходящие газы проходят через цикл очистных сооружений и через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

Реализация полученного от сжигания тепла затруднена, поскольку мусоросжигающие заводы удалены от потребителей тепла, а получение электроэнергии требует капитальных вложений. Предлагается вариант реализации тепла от мусоросжигающих установок для технологии получения строительных материалов. Обе технологии традиционно удалены от жилой застройки, что облегчает задачу.

Авторы предлагают использовать тепло отходящих газов мусоросжигания для термической обработки фосфогипса. При этом горячие газы предполагается отбирать

после каталитического аппарата, минуя рукавные фильтры. Тепло будет реализовано в двух ветвях: сушильной и обжиговой. Для корректировки температуры продуктов сгорания, поступающих в соответствующие ветви, возможно подмешивание внешнего воздуха. Эту долю воздуха определяют при решении уравнения смешения газов. Большую эффективность реализации тепловой энергии обеспечивает использование газов сначала в обжиговой ветви, а затем – в сушильной.

При тепловой обработке гипса различают следующие стадии процесса: подвод теплоты к поверхности частиц или кусков исходного материала, испарение физической влаги, нагрев материала до температуры дегидратации и химическая реакция дегидратации гипса. Для того чтобы начался процесс дегидратации гипса, лежащий в основе технологии получения всех гипсовых вяжущих веществ, необходимо к исходному гипсу подвести теплоту и передать ее. Испарение физической влаги начинается уже при незначительном нагревании, одновременно, начиная с 60–70°С, от молекул отщепляется кристаллизационная вода. При этих температурах процесс протекает очень медленно.

Интенсивная дегидратация начинается при температурах материала 97–105 °С. В стандартной заводской технологии для получения полугидрата поддерживается температура 120–170 °С. Дальнейшее повышение температуры до 210 °С приводит к появлению обезвоженных полугидратов. На рисунке 2 представлена все температурная диаграмма термической обработки фосфогипса [6].

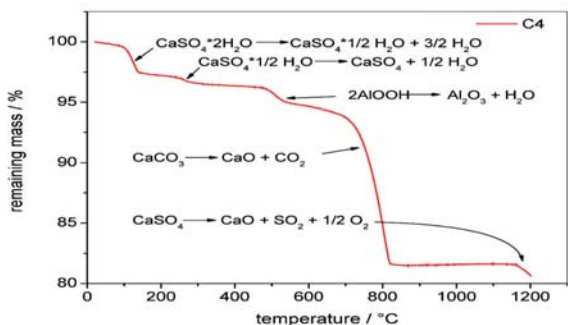


Рис. 2. Диаграмма термической обработки фосфогипса

В технологических линиях с использованием гипсоварочных котлов исходный материал подвергается помолу и сушке в шахтной мельнице-сушилке, затем загружается в гипсоварочный котел периодического или непрерывного действия. В котле гипс нагревается до температуры дегидратации. Процесс сопровождается выделением водяных паров из толстого слоя материала, что затрудняет теплопередачу. Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности гипса низкий, и передача тепла в слое затруднена.

В качестве альтернативной технологии получения полуводного гипса в Харьковском национальном университете строительства и архитектуры (ХНУСА) создана установка, в которой обжиг гипса осуществляется во взвешенном состоянии.

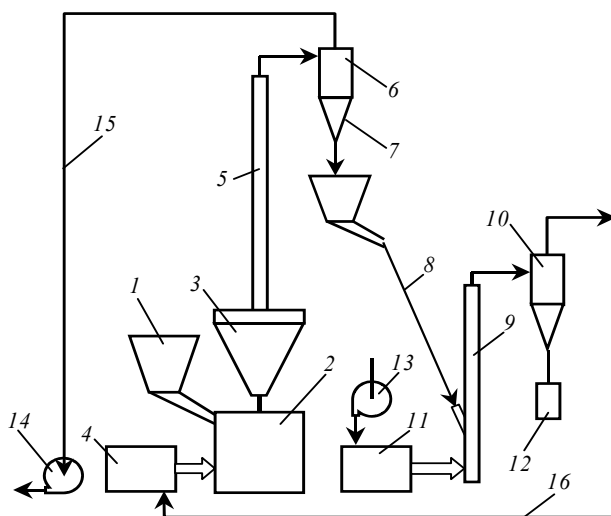


Рис. 3. Принципиальная схема комплекса для помола, сушки и обжига строительного гипса:

1 – дозатор влажного фосфогипса; 2 – мельница; 3 – сепаратор; 4, 11 – теплогенератор; 5 – шахта сушки; 6 – циклон сушки; 7 – бункер-дозатор; 8 – трубопровод материала; 9 – шахта обжига; 10 – циклон обжига; 12 – бункер готового продукта; 13 – вентилятор; 14 – дымосос; 15 – трубопровод отходящих газов от сушильной установки; 16 – трубопровод отходящих газов от обжиговой установки

Установка представлена на рисунке 3. Принцип ее работы заключается в следующем. Измельченный двухводный гипс / фосфогипс через бункер 1 подается в мельницу 2. Мельница в предлагаемом варианте используется тарельчато-валковая, разработанная на кафедре механизации строительных процессов ХНУСА.

Над мельницей установлен проходной сепаратор 3, а в зону помола мельницы 2 от теплогенератора подается теплоноситель. Мелкие частицы материала, пройдя сепаратор 3, потоком теплоносителя поднимаются вверх в шахту сушилки 5, где осуществляется эффективный теплообмен во взвешенном состоянии. Шахта 5 используется также и для дальнейшего

фракционирования частиц. Из шахты 5 поток теплоносителя с мелкими частицами попадает в центробежный циклон 6, в котором частицы отделяются от теплоносителя, принявшего физическую влагу от материала. Влажный теплоноситель через трубопровод отходящих газов 15, систему пылеочистки (на схеме не показана) и дымосос 14 выбрасывается в атмосферу. Высушенный материал, осажденный в циклоне 6, собирается в бункере 7 с затвором внизу (на схеме не показан). Далее с помощью вибрационного лоткового питателя по трубопроводу 8 подается в нижнюю часть обжиговой трубы 9, по которой двигается теплоноситель из теплогенератора 11 (в предлагаемом варианте – газообразные обезвреженные продукты сжигания ТБО).

Движение материала в трубе 9 (как и в трубе 5) возможно только при такой скорости движения теплоносителя, которая превышает скорость витания частиц материала. Теплоноситель подхватывает частицы двухводного гипса, пронесит их по обжиговой трубе 9, эффективно нагревая. Частицы с потоком выносятся в циклон 10, после чего собираются в бункере готового продукта 12. Очищенный газовый поток через трубу 16 подается в теплогенератор 4.

По всей траектории своего движения материал подвергается тепловой обработке во взвешенном состоянии, перемещение материала происходит за счет энергии движения теплоносителя. Движение теплоносителя осуществляется работой вентилятора 13 и дымососа 14.

В лабораторной установке (рис. 4) дегидратор, в котором проходит термическая обработка материала, представляет собой металлическую трубу толщиной 4 мм, внутренним диаметром 60 мм и длиной 2 м. Внешне он покрыт теплоизоляцией.

За счет конвекции и молекулярной теплопроводности через пограничную пленку, которая окружает частицу материала, осуществляется перенос тепла от газа к частице, а затем путем

теплопроводности осуществляется перенос тепла внутри самих частиц.

Далее последовательно реализуются следующие стадии процесса термической обработки: испарение свободной и гигроскопической влаги; химические реакции дегидратации гипса; адсорбция, то есть поглощение реакционной поверхностью гипса молекул кристаллизационной воды, выделяющейся при дегидратации; десорбция, то есть отрыв от поверхности частиц в виде водяного пара; диффузия, то есть перемещение водяного пара через пористую структуру материала и, удаление водяных паров из внешней поверхности материала [4].

Экспериментальная часть исследований сводилась к определению основных параметров теплоносителя и материала на входе в обжиговую ветвь установки и на выходе из циклона-осадителя.

В процессе экспериментальных исследований определялись: начальная и конечная температуры газового потока, начальная и конечная температуры материала, сроки схватывания, водопотребность, прочность образцов при изгибе и при сжатии. Количество исходного материала контролировалось путем взвешивания.

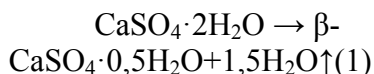


Рис. 4. Лабораторная установка

При реакции дегидратации происходит разрыв связей молекул воды с ионами Ca^{2+} и SO_4^{2-} и удаление воды из кристаллической

решетки в виде перегретого пара. В результате образуется β-модификация полугидрат сульфата кальция.

Химическая реакция этого процесса (дегидратации) имеет вид [1]:



Приведен пример утилизирующего комплекса производительностью 1 000 кг/ч (по ТБО) (рис. 5). Подлежащие сжиганию твердые ТБО поступают в приемный бункер объемом 60 м³, что менее суточной производительности комплекса.

Из приемного бункера 3 ТБО с помощью крана с грейфером передаются на ленточный конвейер, оборудованный рабочими местами, на которых отбираются ТБО, которые подлежат вторичному использованию, такие как стекло, металл, пластмасса, макулатура, текстиль и крупногабаритные не горючие составляющие отходов. ТБО, оставшиеся после сортировки, с помощью загрузочного

устройства 2 подаются во вращающуюся печь 1. Перед сжиганием ТБО печь разогревается с помощью дополнительного топлива (газ или жидкое топливо) топливной горелкой печи 3 до температуры 400 °С, после чего в нее загружаются горючие отходы и начинается процесс сжигания. При этом подача дополнительного топлива может уменьшаться или прекращаться вовсе (в зависимости от теплотворной способности ТБО). Зола и шлак 6, которые остались после сжигания, выгружаются в специальные емкости для вывоза на полигон ТБО. Они могут быть использованы для изготовления строительных изделий. Дымовые газы из печи поступают в камеру дожигания 4 (рис. 5), где при температуре 1 000–1 200 °С в условиях избытка кислорода происходит разложение и дожигание основной доли органических составляющих.

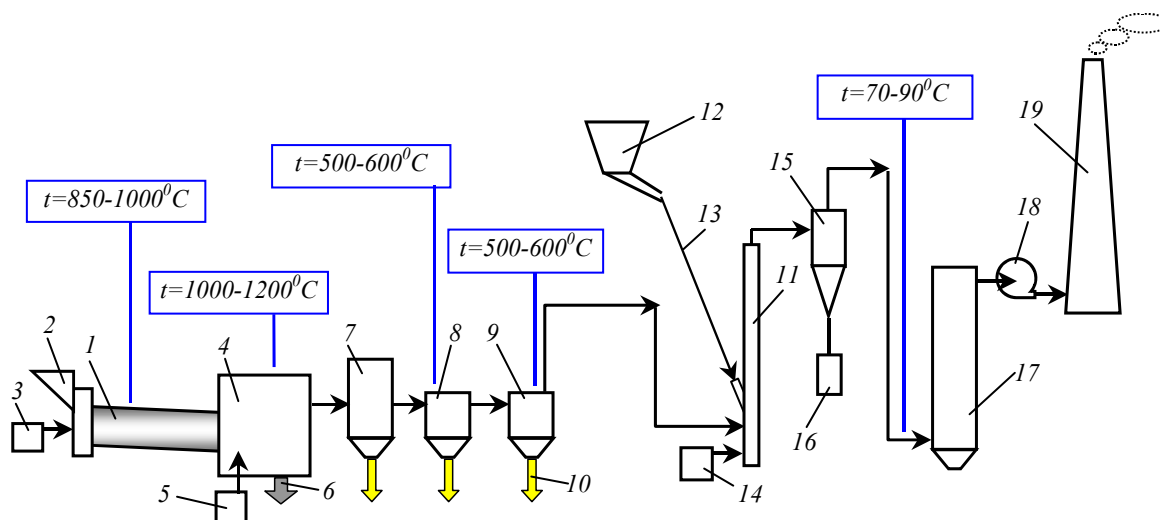


Рис. 5. Комплексная технология переработки ТБО и фосфогипса: 1 – вращающаяся печь; 2 – загрузочное устройство; 3 – горелка печи топливная; 4 – камера дожигания; 5 – горелка топливная камеры дожигания; 6 – шлак; 7 – теплоутилизатор; 8 – инерционно-вихревой коаксиальный пылеуловитель; 9 – каталитический реактор; 10 – зола уноса; 11 – шахта обжига; 12 – бункер фосфогипса; 13 – трубопровод материала; 14 – догреватель газа (при необходимости); 15 – циклон сушки; 16 – бункер готового продукта; 17 – рукавный фильтр; 18 – дымосос; 19 – дымовая труба

В камеру дожигания вводится дополнительное топливо, топливная горелка 5. Дымовые газы после камеры дожигания проходят через теплоутилизатор 7, где отбирается тепло для бытовых нужд и газы охлаждаются до 500–600 °С.

Далее дымовые газы по газоходу поступают в противоточный пылеуловитель 8, в котором очищаются от пыли высокой плотности. После пылеуловителя, частично очищенные газы поступают в каталитический реактор 9. В реакторе при температуре 500–600 °С окисляются остатки

органических составляющих и восстанавливаются оксиды азота до молекулярного азота. Газовый поток с такой температурой наилучшим образом подходит для термообработки фосфогипса во взвешенном состоянии. Газы направляются в шахту обжига 11. Здесь тепло газов передается тонкомолотым частицам фосфогипса. При этом газы понижают свою температуру до 120–140 °С, а температура материала повышается до температуры разложения двугидрата сульфата кальция 105–120 °С.

Далее за счет тепловой энергии газов происходит разложение двугидрата фосфогипса по реакции 1. При таком использовании газов отпадает необходимость в теплоутилизационном блоке, поскольку тепло потребляется для тепловой обработки фосфогипса. Установка по обжигу фосфогипса будет теплоутилизационным блоком. При этом тепло будет утилизироваться в данном случае более качественно, и поэтому температура газов на выходе из установки снижается до 70–90 °С. Более качественная утилизация тепла объясняется передачей тепла при непосредственном контакте тонкомолотых частиц материала с газовым потоком. Известно, что теплопередача от газов к материалу через стенку менее эффективна по сравнению с теплопередачей мелким частицам при непосредственном

контакте в процессе движения газового потока [1].

Перед шахтой обжига может быть установлен теплогенератор 14. Используется он только в случае, когда печь для сжигания ТБО не работает. Из шахты обжига частицы материала с потоком выносятся в циклон 15, после чего собираются в бункере готового продукта 16. Охлажденная до 70–90 °С дымовоздушная смесь поступает для дальнейшей очистки на тканевой фильтр 17. Очищенные до санитарных норм дымовые газы выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу.

Выводы. Предлагаемая технология является важной и актуальной как с энергетической, так и с экологической точек зрения. Разработка более эффективного способа утилизации тепла отходящих газов мусоросжигающих печей позволит более рационально использовать тепловую энергию, выделяемую при сжигании отходов. Такая установка имеет несколько важных преимуществ, а именно: значительно интенсифицируются процессы тепло- и массообмена, что связано с увеличением поверхности контакта фаз и коэффициентов тепло- и массообмена; непрерывный ввод и вывод твердой фазы; простота и компактность конструкции, возможность автоматизации процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Параметры установки для термообработки твердой взвеси фосфогипса в потоке теплоносителя / В. И. Винниченко, Д. В. Лисин, Н. Н. Мокренко, В. В. Куземский, Ю. А. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Хімія, хімічна технологія та екологія : зб. наук. праць. – Харків, 2011. – № 65. – С. 162–169.
2. Винниченко В. И. Переработка фосфогипса в полугидрат сульфата кальция / В. И. Винниченко, Н. Н. Супряга // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Хімія, хімічна технологія та екологія : зб. наук. праць. – Харків, 2016. – № 35 (1207). – С. 37–41.
3. Ильиных Г. В. Оценка теплотехнических свойств твердых бытовых отходов исходя их морфологического состава // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 3. – С. 125–137.
4. Расчет аппаратов кипящего слоя : справочник / А. П. Баскаков, Б. П. Лукачевский, И. П. Мухленов, А. А. Ойгенблик, А. Н. Прокопенко, Н. Б. Рашковская, Б. С. Сажин, О. М. Тодес, Н. Ф. Филипповский, В. Ф. Фролов, О. Б. Цитович ; под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Ленинград : Химия, 1986. – 352 с.
5. Анализ основных направлений утилизации фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты / Трунова И. А., Сидоренко Р. В., Вакал С. В., Карпович Э. А. // Екологічна безпека. – 2010. – № 2. – С. 31–35.
6. Waste Phosphogypsum – Toward Sustainable Reuse in Calcium Sulfoaluminate Cement Based Building Materials / N. Frankovic Mihelja, N. Ukrainczyk, S. Leakovic, J. Sipusic // Chemical and biochemical engineering quarterly. – Croatia, 2013. – Vol. 27, № 2. – P. 219–226.

7. Gorakh S. Bandgar. A Review of Effective Utilization of Waste Phosphogypsum as a Building Material / Gorakh S. Bandgar, Madhav B. Kumthekar, Amarsinh B. Landage // International Journal of Engineering Research. – 2016. – Vol. 5, iss. 1. – P. 277–280. DOI: 10.17950/ijer/v5is1/065.
8. Kong W. M. Implementation of Incineration for Efficient Waste Reduction / Wing Man Kong // International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering. – 2015. – Vol. 87. – P. 77–80. DOI: 10.7763/IPCBE.
9. Spatial distribution and leaching behavior of pollutants from phosphogypsum stocked in a gypstack: Geochemical characterization and modeling / Sara Bisone, Mathieu Gautier, Vincent Chatain, Denise Blanc // Journal of environmental management. – 2017. – Vol. 193, 15 May. – P. 567–575. DOI:org/10.1016/j.jenvman.2017.02.055.
10. Environmental impact and management of phosphogypsum / Tayibi H., Choura M., Lopez F. A., Alguacil F. J., Lopez-Delgado A. // Journal of Environmental Management. – 2009. – Vol. 90, iss. 8. – P. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007.
11. Vinnichenko V. Theoretical and experimental research into manufacturing of silicate products without thermal treatment / V. Vinnichenko, A. Krot, N. Vizenko // Восточно-Европейский журнал передовых технологий = Східно-Європейський журнал передових технологій = Eastern-European journal of enterprise technologies. – Харьков, 2016. – Vol 5, no. 6 (83). – С. 29–36. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/79465>.

REFERENCES

1. Vinnichenko V.I., Lisin D.V., Mokrenko N.N., Kuzemskij V.V. and Bondarenko Yu.A. *Parametry ustanovki dlya termoobrabotki tverdoj vzvesi fosfogipsa v potoke teplonositylya* [Application parameters for heat treatment of the phosphogypsum solid suspension in a coolant flow]. *Seriia: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia* [Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”]. Kharkiv, 2011, no. 65, pp. 162–169. (in Russian).
2. Vinnichenko V.I. and Supryaga N.N. *Pererobotka fosfogipsa v polugidrat sul'fata kal'tsiya* [Processing of phosphogypsum in calcium sulphate hemihydrate]. *Seriia: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia* [Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”]. Kharkiv, 2016, no. 35 (1207), pp. 37–41. (in Ukrainian).
3. Il'nykh G.V. *Otsenka teplotekhnicheskix svoystv tverdyx bytovyx otxodov isxodya ix morfologicheskogo sostava* [Evaluation of heat engineering properties of solid domestic waste based on their morphological composition]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politeknicheskogo universiteta. Urbanistika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics]. 2013, no. 3, pp. 125–137. (in Russian).
4. Baskakov A.P., Lukachevskij B.P., Muxlenov I.P., Ojgenblik A.A., Prokopenko A.N., Rashkovskaya N.B., Sazhin B.S., Todes O.M., Filippovskij N.F., Frolov V.F. and Citovich O.B., eds: Muxlenov I.P., Sazhin B.S. and Frolov V.F. *Raschet apparatov kipyashchego sloya* [Calculation of the fluidized bed apparatus]. Leningrad: Ximiya, 1986, 352 p. (in Russian).
5. Trunova I.A., Sidorenko R.V., Vakal S.V. and Karpovich E.A. *Analiz osnovnyx napravlenij utilizacii fosfogipsa - otxoda proizvodstva fosfornoj kisloty* [Analysis of the main directions of a phosphogypsum utilization - a waste of phosphoric acid production]. *Ekologichna bezpeka*, 2010, no. 2, pp. 31–35. (in Russian).
6. Frankovic Mihelja N., Ukrainczyk N., Leakovic S., Sipusic J. *Waste Phosphogypsum – Toward Sustainable Reuse in Calcium Sulfoaluminate Cement Based Building Materials*. Chemical and biochemical engineering quarterly. Croatia, 2013, vol. 27, no. 2, pp. 219–226.
7. Gorakh S. Bandgar, Madhav B. Kumthekar and Amarsinh B. Landage *A Review of Effective Utilization of Waste Phosphogypsum as a Building Material*. International Journal of Engineering Research. 2016, vol. 5, iss. 1, pp. 277–280. DOI: 10.17950/ijer/v5is1/065.
8. Kong W.M. *Implementation of Incineration for Efficient Waste Reduction*. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering. 2015, vol. 87, pp. 77–80. DOI: 10.7763/IPCBE.
9. Sara Bisone, Mathieu Gautier, Vincent Chatain and Denise Blanc *Spatial distribution and leaching behavior of pollutants from phosphogypsum stocked in a gypstack: Geochemical characterization and modeling*. Journal of environmental management. 2017, vol. 193, 15 May, pp. 567–575. DOI:org/10.1016/j.jenvman.2017.02.055.
10. Tayibi H., Choura M., Lopez F.A., Alguacil F.J. and Lopez-Delgado A. *Environmental impact and management of phosphogypsum*. Journal of Environmental Management, 2009, vol. 90, iss. 8, pp. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007.
11. Vinnichenko V., Krot A. and Vizenko N. *Theoretical and experimental research into manufacturing of silicate products without thermal treatment*. Eastern-European journal of enterprise technologies. Kharkov, 2016, vol. 5, no. 6(83), pp. 29–36. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/79465>.

Рецензент: Бєліков А. С., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 13.09.2017 р.

Прийнята до друку: 30.09.2017 р.