

УДК 691.175

В. И. ВИННИЧЕНКО, Н. Н. СУПРЯГА**ПЕРЕРАБОТКА ФОСФОГИПСА В ПОЛУГИДРАТ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ**

Проведен обзор и сделаны выводы о повышенной энергоёмкости существующих машин для производства строительного гипса. Обоснована целесообразность применения обжига материала в тонкодисперсном состоянии. Представлены результаты проведенного обжига фосфогипса во взвешенном состоянии помольно-обжиговой установке. Установлено, что качество полученного из фосфогипса строительного гипса соответствует требованиям существующих стандартов, а время обжига сокращается на несколько порядков по сравнению с применяемыми в настоящее время машинами. Полученное вяжущее можно применять для получения широкой номенклатуры строительных материалов и изделий

Ключевые слова: фосфогипс, гипс строительный, обжиг во взвешенном состоянии, энергоёмкость, металлоёмкость, пониженный расход топлива и электроэнергии, гипсоварочный котел, вращающийся барабан, автоклав, совместный помол и обжиг фосфогипса с вращением его в гипс строительный.

Зроблено висновки про підвищену енергоємність існуючих машин для виробництва будівельного гіпсу. Теоретично обґрунтовано, що доцільно випалювати матеріал в тонкодисперсному стані. Представлені результати випалу фосфогіпсу у зваженому стані на створеній установці – помольно-випалювальній. Встановлено, що якість отриманого із фосфогіпсу будівельного гіпсу відповідає вимогам стандартів, що існують, а час випалу скорочується на кілька порядків у порівнянні з застосовуваними в даний час машинами.

Ключові слова: фосфогіпс, гіпс будівельний, випал в зваженому стані, енергоємність, металоємність, знижена витрата палива і електроенергії, гіпсоварочний котел, обертовий барабан, автоклав, спільний помел й випал фосфогіпсу з перетворенням його в гіпс будівельний.

Presented a study on recycling gypsum-containing waste tonnage production of fertilizers and phosphoric acid - phosphogypsum. A review of existing production lines and systems for the processing of phosphogypsum in stucco, in particular machines for his firing. The conclusions of the environmental inappropriate and loss of production due to the increased power consumption. Expediency of firing the material in a finely divided state. The results of the firing phosphogypsum suspended on established Entirely-roasting plant. It is found that the quality of the obtained phosphogypsum plaster comply with existing standards, and the firing time is reduced by several orders of magnitude compared to currently used machines. The resulting binder may be used to produce a wide range of gypsum building materials and products. The developed equipment makes it possible not only to obtain high-quality building materials, but also to solve the environmental problem of disposal tonnage phosphogypsum dumps and thereby free up vast tracts of land designated for the production of waste.

Keywords: phosphogypsum, gypsum plaster, firing in suspension, power consumption, metal consumption, lower fuel consumption and electricity gipsovorochny boiler, rotary drum autoclave joint milling and baking phosphogypsum to convert it into gypsum plaster.

Введение. В мире запатентовано более 70 технологий по превращению фосфогипса в строительный гипс. Но почти все они экологически нецелесообразны или убыточны по причине высокой энергоёмкости предложенных технологий.

Постановка проблемы. Научные работы последних лет свидетельствуют об интересе производителей и ученых к фосфогипсу и получению из него строительного гипса и других строительных материалов и изделий. Результаты исследований позволили расширить представления об области применения. Однако главная проблема заключается в отсутствии энергосберегающего оборудования, при помощи которого происходит преобразование двухводного сульфата кальция в полуводный – строительный гипс – а среди производителей и ученых нет единого мнения по вопросу наиболее целесообразной машины для осуществления этого процесса.

Анализ применяемого оборудования. Самыми распространенными в настоящее время маши-

нами для получения гипсового вяжущего являются: вращающиеся печи (барабаны), гипсоварочные котлы, дмпферы и автоклавы [1 – 3].

Во вращающихся барабанах (рис. 1) обжигают материал, подаваемый в виде щебня. Материал во время вращения барабана движется от верхнего – загрузочного конца барабана к нижнему – разгрузочному. Газовый поток, полученный при сжигании топлива, передает тепло разнофракционным кускам материала. Крупные куски выходят из барабана недообожженными внутри, а мелкие – с пережогом. В результате – степень обжига получается неоднородной.

В технологических схемах с применением вращающихся барабанов в качестве помольного оборудования, как правило, используют шаровую мельницу. Фосфогипс при помолу в шаровой мельнице обладает способностью к агрегированию и на выходе из мельницы появляются сплюснутые частички, которые по тонкости помола не соответствуют стандартам качества.

В гипсоварочном котле (рис. 2) исходным материалом является порошок. Гипсовый порошок получают,

как правило, в шахтной мельнице, а затем направляют его на тепловую обработку в гипсоварочный котел. Гипсоварочный котел представляет собой сосуд со сферическим днищем, внутри которого вращается мешалка, перемешивающая порошок.

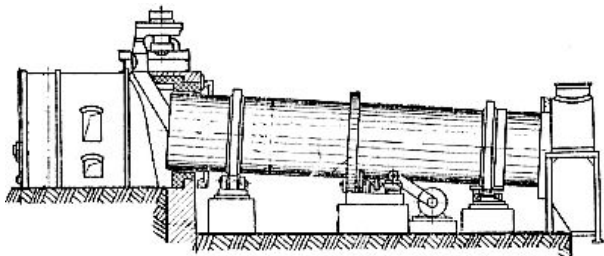


Рис. 1 – Вращающийся барабан

В котле порошок нагревается и протекает реакция отщепления полутора молекул воды от двуводного гипса. Выделившиеся при сжигании топлива в топке горячие газы омывают днище и стенки котла, передавая тепло теплопроводностью через металлическую стенку внутрь котла к слою гипса. Иногда трубы, по которым проходят дымовые газы, встраивают внутрь котла.

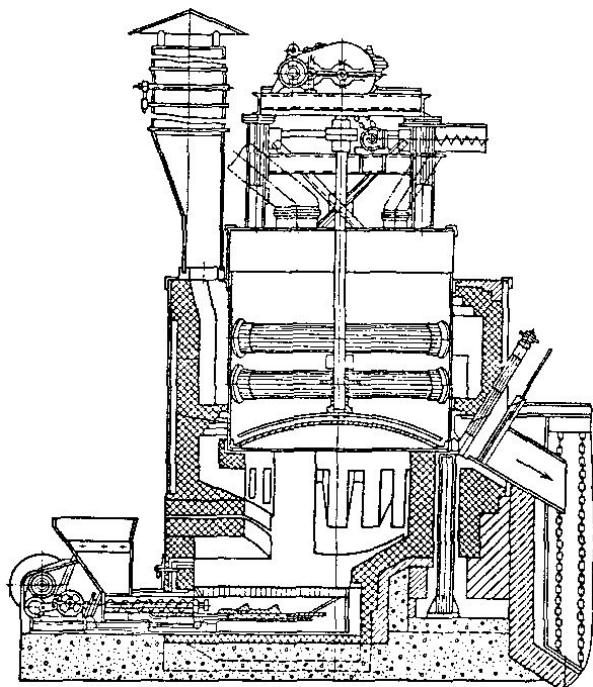


Рис. 2 – Гипсоварочный котел

Внешний обогрев котла приводит к значительной разнице температур, между материалом, прилегающим к стенкам и находящимся на расстоянии. Водяные пары, выделяющиеся при дегидратации, поднимаются вверх внутри гипсового порошка, приводя в движение порошок. Объем порошка внутри котла увеличивается, а внешне поведение массы гипсового порошка напоминает кипение

жидкости. Поэтому процесс обжига гипса в гипсоварочных котлах назвали варкой гипса. Важным фактором интенсификации процесса обжига гипса является тщательное перемешивание материала, благодаря чему быстрее достигается более равномерное распределение температуры в материале.

При обжиге фосфогипса в гипсоварочном котле фосфогипсовый порошок прилипает к внутренним стенкам котла, и убирать приваренный материал приходится вручную.

В рассмотренных выше машинах процесс обжига протекает при атмосферном давлении. Качество полученного вяжущего, определяемого прочностью на сжатие соответствует марке 5 – 8 МПа.

Более высокую марку получают в герметичных аппаратах: демпферах и автоклавах при повышенном давлении пара. В демпфере давление создается паром, выделяемым при преобразовании двуводрата сульфата кальция в полугидрат, а в автоклав пар еще и нагнетают извне.

Автоклав (рис. 3) представляет собой аппарат, чаще всего, цилиндрической формы. В автоклав материал для тепловой обработки подают в виде щебня или прессованных изделий.



Рис. 3 – Автоклав

Общим недостатком технологических линий с применением демпферов и автоклавов является значительная длительность цикла тепловой обработки [2].

Этот факт способствует значительному повышению удельного расхода тепла – примерно в два и более раза (табл. 1) на единицу готовой продукции по сравнению с гипсовыми вяжущими, полученными в гипсоварочных котлах и вращающихся барабанах, что делает гипс, полученный с помощью таких технологий очень дорогостоящим.

Значительное разнообразие технологических схем получения гипсовых вяжущих является свидетельством того, что рациональная технология и машина для дегидратации двуводного гипса еще не найдена.

Таблица 1 – Основные показатели оборудования для получения строительного гипса

Оборудование	Время тепловой обработки	Удельный расход		Продукт, прочность на сжатие
		Условного топлива, кг/тонну	Электроэнергии, кВт·час/тонну	
Гипсоварочный котел	1 – 3 часа	45 – 52	26 – 30	(β -CaSO ₄ ·0,5H ₂ O), 5 – 8 МПа
Вращающийся барабан	45 – 60 минут	48 – 56	30	(β -CaSO ₄ ·0,5H ₂ O), 5 – 8 МПа
Демпфер	5 часов	110 – 120	20	(α -CaSO ₄ ·0,5H ₂ O), 10 – 20 МПа
Автоклав	4 – 6 часов	259 – 282	30 – 32	(α -CaSO ₄ ·0,5H ₂ O), 10 – 20 МПа

Теоретический подход. Согласно известному закону Фурье количество тепла, передаваемого материалу от теплоносителя в единицу времени при постоянстве разности температур и коэффициента, характеризующего интенсивность передачи тепла, количество переданного тепла в единицу времени тем выше, чем больше поверхность материала, которая контактирует с теплоносителем.

Другими словами, чем мельче частицы материала и чем лучше они соприкасаются с теплоносителем, тем большее количество тепловой энергии в единицу времени воспринимает материал.

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t,$$

где Q – тепловой поток, передаваемый материалу от теплоносителя, Вт; Δt – среднелогарифмическая разность температур, °С; F – поверхность соприкосновения материала, воспринимающего теплоносителя, м²/с; α – коэффициент, характеризующий интенсивность передачи тепла.

Таким образом, с точки зрения энергетической целесообразности, тепло лучше передается материалу в ряду изделия – куски – порошок, т.е. если имеется

такая возможность, то для более быстрой передачи тепла используется тонкомолотый материал.

За последние годы значительного прогресса в этом отношении достигла цементная промышленность. Появились печные агрегаты с циклонными теплообменниками и декарбонизаторами, в которых тонкомолотая сырьевая смесь нагревается газовым потоком во взвешенном состоянии [4].

А почему бы не использовать опыт цементников для получения гипсовых вяжущих?

Экспериментальные исследования. В Харьковском национальном университете строительства и архитектуры создана машина для совместного помола и обжига фосфогипса с превращением его в гипс строительный [7 – 8]. Теоретические исследования обосновали правомерность [9 – 10] обжига фосфогипса во взвешенном состоянии.

Проведенные эксперименты показали, что за 3 – 6 секунд возможно получение из фосфогипса гипса полуводного, качество которого удовлетворяет требованиям существующих стандартов.

На рис. 4 представлена зависимость прочности на сжатие фосфогипсового вяжущего от времени тепловой обработки.

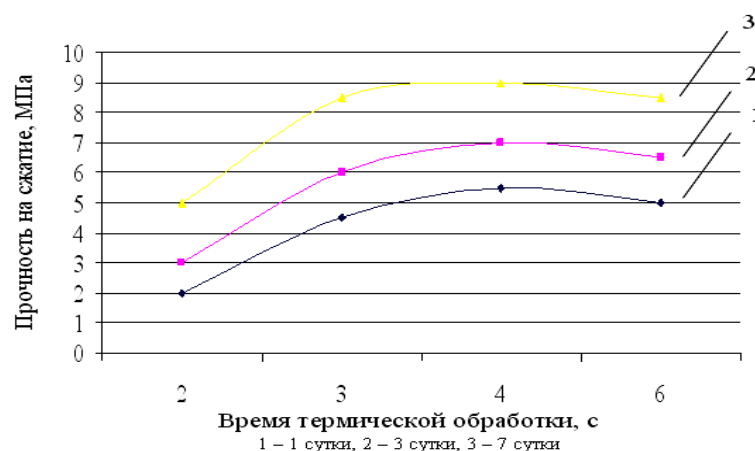


Рис. 4 – Зависимость прочности на сжатие фосфогипсового вяжущего от времени тепловой обработки

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технология

и выдано техническое задание на проектирование технологической линии и помольно-обжигового агрегата для превращения фосфогипса в строительный гипс.

Сушность технологии: в технологии помол и обжиг осуществляются в одной машине – помольно-обжиговом агрегате, что способствует снижению энергетических и эксплуатационных затрат, а также уменьшению занимаемой производственной площади (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнительные показатели

Показатели	Гипсоварочный котел (существующее)	Помольно-обжиговый агрегат (предлагаемое)
Производительность, т/час	5	5
Расход электроэнергии, кВт ч/тонну	26 – 30	20
Расход топлива, кг условного топлива/т	40 – 45	35
Металлоемкость, т	43	9
Занимаемая площадь, м ²	100	10

В настоящее время изготовлен помольно-обжиговый агрегат и осуществляется строительство цеха по производству строительного гипса корпорацией «Экология-Днепр» в г. Днепродзержинск Днепропетровской области.

Основные преимущества разработанной технологии:

- отличается от известных меньшими расходами топлива,
- сниженным расходом электроэнергии,
- сокращенным временем обжига,
- пониженной металлоемкостью,
- полной безотходностью технологии,
- снижением выбросов парниковообразующих газов в атмосферу.

В таблице 2 приведены сравнительные показатели гипсоварочного котла и предлагаемого помольно-обжигового агрегата. Как следует из табл. 2 одинаковой производительности при работе помольно-обжигового агрегата расход электроэнергии снижается более чем на 30 %, расход топлива – 10 %, металлоемкость уменьшается примерно в 4 раза, а занимаемая площадь – в 10 раз.

Выводы.

Выполнен анализ оборудования для переработки фосфогипса в гипс строительный. Показано, что применяемые в настоящее время машины имеют высокие показатели энергоёмкости.

Экспериментально подтверждено, что получение строительного гипса во взвешенном состоянии способствует снижению энергетических показателей процесса.

Установлено, что за несколько секунд обжига возможно получение качественного продукта.

Приведены сравнительные характеристики основных показателей работы гипсоварочного котла и вновь созданного – помольно-обжигового агрегата.

Список литературы

1. Пащенко А. А. Вяжущие материалы / А. А. Пащенко, В. П. Сербин, Е. А. Старчевская. – К.: Высшая школа, 1985. – 435 с.
2. Иваницкий В. В. Производство и применение высокопрочных гипсовых вяжущих в СССР и за рубежом / В. В. Иваницкий. – М.: ВНИИЭСМ, 1982. – 54 с.
3. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М.: Стройиздат, 1979. – С. 23 – 60.
4. Иваницкий В. В. Классификация сырья для производства гипсовых и ангидритовых вяжущих / В. В. Иваницкий // Сб. тр. ВНИИ строительных материалов и конструкций. – 1987. – № 60(80). – С. 37 – 44.
5. Дуда В. Цемент / В. Дуда; [пер. с нем. Е. Ш. Фельдмана]; под ред. Б. Э. Юдовича. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
6. Винниченко В. І. Технологічний комплекс з виробництва гіпсового в'язучого з відходів / В. І. Винниченко, В. В. Котляренко // Дороги і мости. – 2008. – Вип. 10. – С. 66 – 68.
7. Винниченко В. І. Анализ установок для дегидратации гипса и сравнение их по продолжительности тепловой обработки / В. І. Винниченко, В. В. Котляренко, А. В. Бабинцев // Вісник НТУ «ХПІ». – 2007. – № 26. – С. 123 – 127.
8. Винниченко В. І. К вопросу о продолжительности обжига гипса / В. І. Винниченко // Науковий вісник будівництва. – 2002. – № 16. – С. 144 – 147.
9. Винниченко В. І. Перспективы обжига гипса во взвешенном состоянии / [В. І. Винниченко, И. Э. Казимагомедов, В. І. Бабушкин, А. А. Мамедов] // Строительные материалы и изделия. – 2001. – № 4. – С. 35 – 36.
10. Винниченко В. І. Теоретическое определение основных параметров установки для термообработки твердой взвеси материала в потоке теплоносителя / [В. І. Винниченко, А. В. Бабинцев, В. В. Котляренко, Д. В. Лисин] // Научный вестник строительства. – 2008. – № 46. – С. 128 – 131.

References (transliterated)

1. Pashenko A. A., Serbin V. P., Starchevskaya E. A. *Vyazhushchie materialy* [Knitting materials]. Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1985, 435 p.
2. Ivanitskiy V. V. *Proizvodstvo i primeneniye vysokoprochnykh gipsovyykh vyazhushhix v SSSR i za rubezhom* [The production and use high strength gypsum binders in the USSR and abroad]. Moscow, VNIIESM Publ., 1982, 54 p.
3. Volzhenskij A. V. , Burov Y. S. , Kolokolnikov V. S. *Mineralnye vyazhushhie veshhestva* [Mineral binders]. Moscow, Strojizdat, 1979, pp. 23 – 60.
4. Ivanitskiy V. V. *Klassifikaciya syrya dlya proizvodstva gipsovyyh i angidritovykh vyazhushhix* [Classification of raw materials for the production of gypsum and anhydrite binders]. Sbornik trudov VNI str. materialov i konstrukcij, 1987, No 60(80), pp. 37 – 44.
5. Walter H. Duda. *Cement – Data – Book. Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie. 2. Völling neybearbeitete und erweiterte Auflage.* Wiesbaden und Berlin, Bauverlag GmbH, 1977, 464 p.
6. Vinnichenko V. I., Kotlyarenko V. V. *Texnologichnij kompleks z virobництва gipsovogo v'язучого z vidxodiv* [Technological

- complex for the production of gypsum binder from waste]. *Dorogi i mosti*, 2008, Iss. 10, pp. 66 – 68.
7. Vinnichenko V. I., Kotlyarenko V. V., Babincev A. V. *Analiz ustanovok dlya degidratacii gipsa i sravnenie ih po prodolzhitel'nosti teplovoj obrabotki* [Analyzing installations for dehydration of gypsum and compare them for the duration of the heat treatment]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2007, No 26, pp. 123 – 127.
 8. Vinnichenko V. I. *K voprosu o prodolzhitel'nosti obzhiga gipsa* [On the question of the duration of the firing of gypsum]. *Naukovij visnik budivnictva*. – 2002. – No 16, pp. 144 – 147.
 9. Vinnichenko V. I., Kazimagomedov I. E., Babushkin V. I., Mamedov A. A. *Perspektivy obzhiga gipsa vo vzveshenom sostoyanii* [The prospect of roasting of gypsum in suspension]. *Stroitelnye materialy i izdelya*. 2001, No 4, pp. 35 – 36.
 10. Vinnichenko V. I., Babincev A. V., Kotlyarenko V. V., Lisin D. V. *Teoreticheskoe opredelenie osnovnykh parametrov ustanovki dlya termoobrabotki tverdoj vzvesi materiala v potoke teplonositel'ya* [Theoretical determination of the basic installation options for heat treatment of solid material suspended in the flow of coolant]. *Nauchnyj vestnik stroitelstva*. – 2008, No 46, pp. 128 – 131.

Поступила (received) 22.07.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Переробка фосфогіпсу в напівгідрат сульфату кальцію / В. І. Вінниченко, Н. М. Супряга // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 35 (1207). – С. 37 – 41. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0821.

Переработка фосфогипса в полугидрат сульфата кальция / В. И. Винниченко, Н. Н. Супряга // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 35 (1207). – С. 37 – 41. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0821.

Processing of phosphogypsum in hemi-calcium sulfate / V. I. Vinnichenko, N. N. Supryaga // Bulletin of NTU "KhPI". – Series: Chemistry, chemical technology and ecology. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – No. 35 (1207). – P. 37 – 41. – Bibliogr.: 10 names. – ISSN 2079-0821.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вінниченко Варвара Іванівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури, м. Харків; тел.: (057) 71-78-017; e-mail: vvinnichenko@ukr.net

Винниченко Варвара Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации строительных процессов Харьковского национального университета строительства и архитектуры, г. Харьков; тел.: (057) 71-78-017; e-mail: vvinnichenko@ukr.net

Vinnichenko Varvara Ivanovna – Dr. Sc. Sciences, Professor, Full Professor Department of mechanization of construction processes of the Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov; tel.: (057) 71-78-017; e-mail: vvinnichenko@ukr.net

Супряга Наталія Миколаївна – Харківський національний університет будівництва та архітектури, молодший науковий співробітник кафедри механізації будівельних процесів; тел.: (099) 66-82-063; e-mail: supryaganataliya@ukr.net

Супряга Наталия Николаевна – Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, младший научный сотрудник кафедры механизации строительных процессов; тел.: (099) 66-82-063; e-mail: supryaganataliya@ukr.net

Supryaga Nataliya Nikolaevna – Kharkiv National University of Construction and Architecture, junior researcher of the department of mechanization of construction processes; tel.: (099) 66-82-063; e-mail: supryaganataliya@ukr.net