

## СТАТЬИ

УДК 66.021.4

**ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ****Бобков В.И., Орехов В.А.***Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске,  
Смоленск, e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

Проведено экспериментальное обследование действующей обжиговой конвейерной машины, которое показало существование значительных неравномерностей газовых потоков по ширине колосниковой решетки. Для повышения эффективности работы обжиговых машин необходимо в первую очередь организовать мероприятия по устранению неравномерностей потока газа-теплоносителя. Выданы рекомендации об организации контроля температур уходящих газов обжиговых машин. Установлено, что для повышения энергоэффективности химико-энерготехнологического процесса обжига рудного сырья в динамическом плотном слое с перекрестной подачей газа-теплоносителя на конвейере обжиговой машины важно: повысить температуру рудного материала из нижних слоев многослойной массы, осуществлять засыпку рудного сырья на колосниковую решетку конвейера, устраняя сегрегацию. Необходимо регулировать горелочные устройства в горне обжиговой конвейерной машины для исключения температурных неоднородностей по ширине колосниковой решетки. Обосновано использование энергосберегающих мероприятий с учетом особенностей тепло- и массообменных термически активируемых процессов, протекающих в плотном слое кускового или окомкованного фосфатного сырья, и способов их интенсификации. Выработана стратегия научно-технического поиска значимых и приемлемых технологических решений, учитывающих полученные в настоящей работе температурные характеристики тепло-массообмена в плотном слое рудного материала с перекрестной подачей газа-теплоносителя, для детерминированного описания химико-энерготехнологических термически активируемых процессов и энергоемких аппаратов. Комплексное описание всей картины взаимосвязанных и взаимозависимых термически активируемых явлений в описываемой технологии позволяет обоснованно применять методы оптимизации и управления теплофизическими и химико-технологическими процессами. Научно и практически обоснована необходимость уточнения теплового и газодинамического режима работы агрегатов в различных технологических зонах обжиговой конвейерной машины, а также составления режимной карты функционирования машин в зависимости от типа рудного фосфатного сырья.

**Ключевые слова:** рудное фосфатное сырье, режим функционирования, обжиговая машина, температура, тепло- и массообмен, колосниковая решетка, газ теплоноситель, нагрев, плотный слой

**PECULIARITIES OF EXPERIMENTAL EXAMINATION  
TEMPERATURE MODE OF OPERATION  
ROASTING CONVEYOR MACHINE****Bobkov V.I., Orekhov V.A.***Smolensk Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk,  
e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

An experimental examination of the existing roasting conveyor machine was carried out, which showed the existence of significant irregularities in gas flows along the width of the grate. To increase the efficiency of the roasting machines, it is necessary to first of all organize measures to eliminate irregularities in the flow of the coolant gas. Recommendations were issued on the organization of temperature control of the outgoing gases of roasting machines. It has been established that in order to increase the energy efficiency of the chemical-energy technological process of roasting ore raw materials in a dynamic dense layer with a cross-feed of coolant gas on the conveyor of the roasting machine, it is important: to increase the temperature of the ore material from the lower layers of the multilayer mass, to fill the ore raw materials on the grate of the conveyor, eliminating segregation. It is necessary to adjust the burner devices in the hearth of the roasting conveyor machine to avoid temperature inhomogeneities along the width of the grate. The use of energy-saving measures is justified taking into account the peculiarities of heat and mass exchange thermally activated processes of lumpy or pelletized phosphate raw materials occurring in a dense layer and methods of their intensification. A strategy has been developed for the scientific and technical search for significant and acceptable technological solutions that take into account the temperature characteristics of heat and mass exchange obtained in the present work in a dense layer of ore material with a cross-feed of coolant gas for a deterministic description of chemical-energy technological thermally activated processes and energy-intensive devices. A comprehensive description of the entire picture of interconnected and interdependent thermally activated phenomena in the described technology allows us to reasonably apply methods for optimizing and controlling thermophysical and chemical processes. It is scientifically and practically justified the need to clarify the thermal and gas-dynamic mode of operation of the units in various technological zones of the roasting conveyor machine, as well as to draw up a regime map of the operation of the machines depending on the type of ore phosphate raw materials.

**Keywords:** ore phosphate raw material, functioning mode, roasting machine, temperature, heat and mass exchange, grate, coolant gas, heating, dense layer

Технология термического способа получения желтого фосфора предусматривает комплексное многостадийное теплоэнергетическое воздействие на фосфатное рудное сырье, поэтому энергоэффективность большинства стадий его термической переработки определяется интенсивностью тепло-массообменных химико-энерготехнологических процессов [1, 2]. Осуществление технологических расчетов агрегатов в технических зонах обжиговой конвейерной машины: подогрева, высокотемпературного обжига и охлаждения, а также анализ процессов теплообмена в плотном слое рудного фосфатного сырья на колосниковой решетке невозможны без наличия достоверных данных по температурным режимам функционирования обжиговой конвейерной машины [3, 4].

Рациональное использование сырьевых рудных ресурсов и применение энергосберегающих мероприятий обуславливают необходимость изучения особенностей тепло- и массообменных термически активируемых процессов, протекающих в плотном слое кускового или окомкованного фосфатного сырья, и способов их интенсификации [5, 6]. Трудности и дороговизна экспериментального изучения всех условий протекания массо-теплообменных и химико-энерготехнологических процессов определили путь к разработке математических и компьютерных моделей и их использованию для идентификации и оптимизации. Такая стратегия научно-технического поиска наиболее приемлемых технологических решений требует знания температурных характеристик тепло-массообмена в плотном слое рудного материала с перекрестной подачей газа-теплоносителя для детерминированного описания химико-энерготехнологических термически активируемых процессов и энергоемких аппаратов. Оптимизация и управление теплофизическими и химико-технологическими процессами обеспечиваются степенью их исследованности, глубины описания и комплексности всей картины термически активируемых явлений в описываемой технологии [7, 8].

Основанием для комплексного и углубленного изучения теплофизических и химико-технологических процессов служит пониженная на сегодняшний день эффективность применения материальных и энергетических ресурсов в таких агрегатах, как обжиговые конвейерные машины фосфорной и металлургической промышленности [9]. Так, например, по полученным данным длительной эксплуатации обжиговых кон-

вейерных машин, коэффициент использования их мощности неприемлемо занижен [10, 11]. Существенно меньшим является коэффициент использования календарного времени  $\approx 0,8$ . Снижает технико-экономические показатели и тот факт, что при уменьшении мощности относительно режимной сильно увеличивается удельный расход электроэнергии, до 19 МВт·ч/т. Более того, варьирование режима функционирования обжиговых конвейерных машин приводит к уменьшению качества готового продукта и наличию оксида фосфора в шлаке [12].

Обнаружено, что при нагреве в фосфоритовом рудном сырье протекает несколько термически активируемых, экзо- и эндотермических превращений, сопровождаемых существенными изменениями структуры и химического состава. К числу практически значимых следует отнести следующие химико-энерготехнологические процессы:

- удаление гигроскопической влаги, 360–410К;
- удаление химически связанной воды, свыше 500К;
- диссоциация карбонатов, 750–1050К;
- выгорание органических примесей, свыше 800К;
- разложение основного фосфатного вещества.

Изменения физико-химических свойств и структуры исходных рудных материалов при нагреве обусловлены, как правило, процессами в таких группах породообразующих минералов, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , и ряду примесей, из которых наибольшее значение имеют слюды и карбонаты.

Группа силикатов до 1020–1070К существенных изменений не претерпевает. Однако в этом диапазоне температуры проявляется увеличение трещин в материале, которое обусловлено различными коэффициентами термического расширения. На процесс растрескивания влияет также дегидратация опала и халцедона, 370–470К. В температурном диапазоне до 1100К обнаруживается максимальная потеря веса в этой группе – до 3%. Более чем с 1020К формируется новая силикатосодержащая фаза – кристобалит. С дальнейшим возрастанием температуры отмечается постепенное снижение степени кристаллизации кварца. При 1330К наблюдается появление волластонитовой фазы, что связано с наличием в исходном рудном сырье значительного количества карбонатных минералов, отличающихся в основном до 1250К образованием  $\text{CaO}$ , взаимодействующего с  $\text{SiO}_2$ .

Процессы дегидратации, термического расширения и кристаллизации, происходящие при нагревании фосфоритового рудного сырья в диапазоне 290–1470К, способствуют снижению прочности группы  $\text{SiO}_2$ . Твердость изменяется от 1200–1260 кг/мм<sup>2</sup> в сыром фосфатном рудном материале, до 860–670 кг/мм<sup>2</sup> в обожженном, с температурой 1470К.

Процессы, протекающие в кремнистой группе, обеспечивают усиленное трещинообразование и снижение прочности при нагреве фосфоритовых руд в целом. Интенсивное растрескивание кремнистых составляющих отмечено в диапазоне 530–720К.

Цель исследования: разработка методики экспериментального обследования температурного режима функционирования действующей обжиговой конвейерной машины при обжиге кускового или окомкованного фосфоритового рудного сырья в движущемся плотном слое с перекрестной подачей потока газа-теплоносителя.

#### Материалы и методы исследования

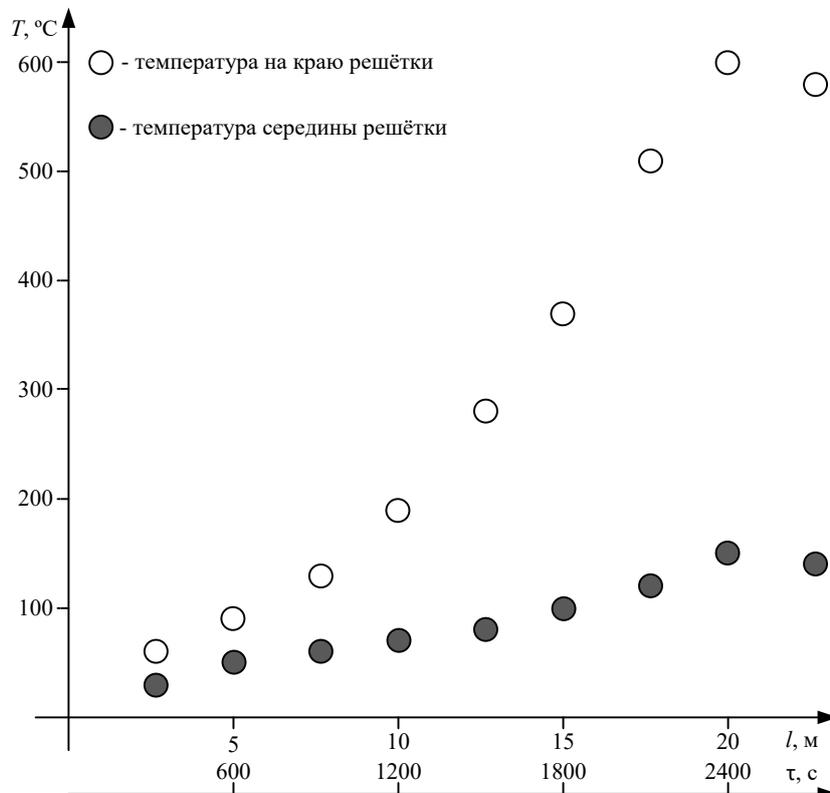
Проводились замеры температур на колосниках обжиговых конвейерных машин в технологических зонах загрузки, сушки

и высокотемпературного декарбонизирующего обжига. Для исследований использовались термопары Хромель – XI8И9Т диаметром 1 мм в абсолютной изоляции с длиной термоэлектродов 25 м. Рабочие спаи термопар зачеканивались в медные пластины.

Закладки термопар осуществлялись до зоны загрузки материала на конвейер обжиговой машины. Измерения температур производились на колосниках обжиговой машины, расположенных в средней части решетки и по краю, на расстоянии 150 мм от борта. Результаты замеров температур представлены на рисунке.

Одновременно с измерением температуры колосников производилась регистрация показаний щитовых приборов (таблица).

Результаты замеров показали, что до загрузки рудного фосфатного сырьевого материала температура колосников, расположенных на краю колосниковой решетки, на 40–50°С выше, чем у колосников средней части. После загрузки материала температура колосников снижается на 30–40°С. В зоне сушки температура колосников возрастает до 60–150°С. При этом наблюдается более интенсивный нагрев колосников, расположенных по краю колосниковой решетки.



*Результаты замеров температуры на колосниках  
в зоне высокотемпературного обжига действующей конвейерной машины*

Показания щитовых приборов действующей конвейерной машины

Время замеров, мин	Расход газа на горелки, м <sup>3</sup> /мин			Расход воздуха на горелки, м <sup>3</sup> /мин			Температура по длине зон обжиговой машины, м						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3	107	108	109	110	121	122	123
0	190	310	325	4020	2595	3600	500	750	750	910	130	178	150
10	190	310	330	3950	2695	3600	510	770	750	960	145	180	155
20	190	310	330	3950	2695	3650	520	800	780	940	160	185	165
30	190	310	330	3950	2695	3700	520	810	780	930	150	195	170

В зоне высокотемпературного обжига неравномерность температур резко возрастает, и в конце этой зоны перепад температур по ширине ленты конвейера обжиговой машины достигал 500°C. При этом крайние колосники нагревались до температуры 630°C. Показания термопар, установленных в вакуум-камерах под зоной высокотемпературного обжига, не превышали 310°C.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Наблюдаемая неравномерность температур может быть объяснена совместным действием двух факторов: краевыми эффектами и неоднородностью фракционного состава засыпки в плотный слой кускового фосфатного сырья по ширине колосниковой решетки, связанной с сегрегацией материала в загрузочном устройстве. В результате сегрегации у бортов располагаются наиболее крупные фракции рудного материала, сравнительно однородные по размеру; основная же часть засыпки полифракционного состава рудного сырья с присутствием мелких, ~10 мм, фракций располагается в середине колосников. Так как полифракционная засыпка рудного фосфатного сырья имеет более высокие коэффициенты газодинамического сопротивления, неоднородность засыпки способствует образованию зон, предпочтительных для прососа греющих газов вдоль бортов машины, и, как следствие этого, перегреву материала колосниковой решетки в этих зонах.

Таким образом, преждевременный выход из строя колосников решетки может быть объяснен периодическим перегревом и резким охлаждением после разгрузки рудных материалов. Недогрев основной массы материала приводит к снижению эффективности химико-энерготехнологического процесса обжига рудных материалов.

Существующая неоднородность нагрева материала и местные перегревы решетки

могут быть значительно снижены при проведении мероприятий, направленных на повышение однородности фракционного состава рудного фосфатного сырья, а также при исключении явления сегрегации в загрузочных устройствах (например, путем продольного секционирования точек). Одним из возможных путей снижения температур колосниковой решетки и неравномерности температур по ее ширине при обжиге полифракционного плотного слоя рудного фосфатного сырья является применение двухточечной засыпки. Для этого необходимо произвести рассечку рудного сырья на две фракции: 15–20 мм и 20–25 мм, и засыпку мелкой фракции производить в нижнюю часть плотного слоя, а крупной – в верхнюю. При этом разгрузка мелкой фракции может осуществляться с использованием существующих устройств выгрузки обработанного сырья. Верхнюю засыпку крупной фракцией целесообразно проводить первым конвейером, что позволит исключить неоднородность фракционного состава плотного слоя рудного фосфатного сырья по ширине ленты.

Использование двухслойной засыпки, как отмечалось нами ранее, позволит также существенно повысить энергоэффективность процесса декарбонизирующего обжига за счет повышения средней температуры по высоте слоя.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что контроль температурного режима колосниковой решетки по показаниям термопар, установленных в вакуум-камерах при существующей неравномерности прососа греющих газов, недостоверен. Существенно искаженные показания указанных датчиков могут быть объяснены подсосом к периферийному потоку газов, имеющих высокую температуру, охлажденных газов средней части решетки.

В качестве контроля равномерности газораспределения по ширине слоя засыпки

и температурного режима колосниковой решетки могут служить показания термодатчиков, установленных в вакуум-камерах в непосредственной близости к колосникам в трех-четырёх точках по ширине ленты в зоне наиболее высоких температур. Для уменьшения погрешности, вызванной перемешиванием уходящих из слоя газов в вакуум-камере, термодатчики следует помещать в газонаправляющие трубки.

Более объективный непрерывный контроль температурного режима колосниковой решетки может быть осуществлен с применением современных бесконтактных методов измерения температур.

### Заключение

Результаты обследования теплового режима работы конвейерных обжиговых машин подтверждают полученные нами ранее научные предположения и выводы. По ширине ленты конвейерной обжиговой машины существуют значительные градиенты температур. Разница температур на режимах функционирования между краем и серединой колосниковой решетки в конце зоны обжига достигает 500°C. При этом показания термопар, расположенных под решеткой обжиговой машины, не превышает 350°C. Существование такого неравномерного прососа газа-теплоносителя по ширине ленты вызывает неэффективную работу обжиговой машины, приводит к частым прогарам колосниковых решеток.

Неравномерность прососа газов по ширине ленты обусловлена сегрегацией материала при загрузке, влиянием краевых эффектов при просасывании газами слоя материала, лежащего на ленте конвейера обжиговой машины.

Для повышения эффективности работы конвейерных обжиговых машин в первую очередь необходимо выровнять потоки газ-теплоносителя по ширине ленты. Для этой цели и для повышения степени декарбонизации обжигаемого рудного сырья, как показывают аналитические исследования теплообмена в слое, необходимо применить двухслойную засыпку рудных материалов на решетку, при которой первый, нижний слой фосфатных сырьевых материалов имеют фракционный состав 15–20 мм, а фракции 20–25 мм составляют верхний слой.

Из-за геометрических особенностей вакуум-камер в зоне термопар, расположенных под колосниковой решеткой, происходит интенсивное перемешивание уходящих из слоя газов. Поэтому показания

термопар не соответствуют локальным температурам газов, и поддержание режима работы машин по показаниям этих термопар может вызвать значительный местный перегрев колосниковых решеток, что могло быть причиной частого выхода их из строя. Предложенная в работе методика измерения температур уходящих газов значительно уменьшит перемешивание газов в зоне измерения температур, улучшит точность определения локальных температур уходящих газов и обеспечит эффективность контроля теплового режима функционирования обжиговых конвейерных машин.

После проведения этих мероприятий на основе исследования кинетики декарбонизации и теплофизических свойств фосфоритов, результаты которого приведены в работах авторов [13, 14], необходимо уточнить тепловой и газодинамический режим работы в различных технологических зонах обжиговой машины, составить режимную карту работы машин в зависимости от типа рудного сырья [15].

Научно обосновано, что затраты энергетических ресурсов повышаются при утилизации мелкой фракции фосфоросодержащего рудного сырья во всех трех химико-технологических схемах термической подготовки и переработки: обжиг кусковой фракции, окомкованного сырья и агломерация самой мелкой фракции.

Повышение энергоресурсоэффективности в энергоемких химико-технологических процессах основывается на возможности оптимального, с точки зрения энергоресурсосбережения, управления теплофизическими и химико-технологическими процессами, происходящими в фосфоритовых рудных материалах при термической обработке на базе существенной интенсификации тепло- и массообмена.

*Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды № 22-11-00335, <https://rscf.ru/project/22-11-00335/> «The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. № 22-11-00335, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00335/>.»*

### Список литературы

1. Семенов Г.Е., Кейно П.П. Применение математических моделей на основе генетических алгоритмов в задачах планирования сложных технических объектов // Прикладная информатика. 2019. Т. 14. № 2. С. 56-62.
2. Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B. Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. Steel in Translation. 2018. № 48(9). P. 573-577.
3. Бобков В.И., Дли М.И., Панченко С.В. Обобщенная структурно-функциональная модель инжиниринга и управления экологически безопасной переработкой отвалов

горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 48-52.

4. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53-57.

5. Клочков М.А. К вопросу информационной поддержки систем управления технологическим процессом // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 1. С. 32-43.

6. Новичихин А.В., Шорохова А.В. Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 60. № 7. С. 565-572.

7. Звягинцев Н.В., Биллинг В.А. Оценка эффективности условий проведения химических реакций // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 2. С. 273-278.

8. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1(97). С. 55-68.

9. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Росс Г.В., Яшин Е.С. Инвестиции, инновации, импортозамещение: имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта в управлении проектными рисками // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 1(85). С. 63-102.

10. Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимов Н.Н. Компьютерная программа для эксплуатационной диагностики

электромеханических систем на основе топологического подхода // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 4(94). С. 62-73.

11. Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И. Автоматизированная система поддержки принятия решений по управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы обжига фосфоритовых окатышей // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53. № 6. С. 609-616.

12. Антипина Е.В., Мустафина С.А., Антипин А.Ф. Программная реализация алгоритма поиска оптимального температурного режима каталитического процесса // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 106-112.

13. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Исследование теплофизических характеристик окомкованного фосфатного материала // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7-1. С. 26-29.

14. Орехов В.А., Бобков В.И. Экспериментальная методика исследования кинетики термической декарбонизации при наличии градиентов температур в исследуемых образцах // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 6. С. 261-267.

15. Читалов Д.И. Разработка модуля для формирования перегородок в расчетных сетках при постановке численных экспериментов с помощью графического интерфейса пользователя платформы OPENFOAM // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 4. С. 75-86.