

СТАТЬИ

УДК 536.27

DOI 10.17513/snt.39939

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
ОБЖИГОВЫХ И АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН
ДЛЯ СЫРЬЯ ФОСФАТНЫХ РУД****¹Бобков В.И., ¹Быков А.А., ¹Орехов В.А., ²Незамаев С.В.**¹*Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске,
Смоленск, e-mail: vovabobkoff@mail.ru;*²*АО «Первая горнорудная компания», Москва, e-mail: pgrk@armz.ru*

Аннотация. В данной статье представлены результаты расчета теплотехнической части обжиговых и агломерационных машин для их адаптации к сырью фосфатных руд, учитывая физико-химические особенности рудного фосфатного сырья и требования технологии по температурным условиям термической обработки. Научно обосновано перераспределение технологических зон и газоздушных потоков, которые обеспечили наиболее оптимальные режимы функционирования, при максимальном повторном использовании тепла отходящих газов. Выявлены возможности модернизации агломерационных и обжиговых машин для переработки железосодержащих руд и концентратов, на термическую обработку фосфатного рудного сырья, в первую очередь их теплотехнической части, которая обеспечила бы требуемые режимы функционирования и параметры тепловой обработки, а также газодинамику сложного химико-энерготехнологического процесса обжига. Представленные теплотехнические расчеты агломерационной и обжиговой машин позволили определить расходы природного газа и воздуха на горение, выбрать тягодутьевые агрегаты для подачи воздуха. Определить время охлаждения фосфоритового агломерата и окатышей, уточнить распределение зон спекания и охлаждения для различных режимов функционирования обжиговых и агломерационных машин. По результатам расчета выбрана схема рекуперации газоздушных потоков теплоносителя. Выполненные приближенные теплотехнические расчеты агломерационной машины типа АКМ и обжиговой машины типа ОКМ подтвердили возможность получения на них удовлетворительного качества фосфоритового агломерата и окатышей из рудного фосфатного сырья при заданной удельной производительности с обеспечением конечной температуры агломерата и окатышей после охлаждения.

Ключевые слова: агломерационная машина, обжиговая конвейерная машина, температура, агломерат, обжиг, окатыши, фосфоритовая руда

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.

**PECULIARITIES OF HEAT ENGINEERING CALCULATION
OF ROASTING AND AGGLOMERATION MACHINES
FOR PHOSPHATE ORE RAW MATERIALS****¹Bobkov V.I., ¹Bykov A.A., ¹Orekhov V.A., ²Nezamaev S.V.**¹*Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute,
Smolensk, e-mail: vovabobkoff@mail.ru;*²*JSC First Mining Company, General Director, Moscow, e-mail: pgrk@armz.ru*

Annotation. This article presents the results of the calculation of the thermal engineering part of calcining and agglomeration machines for their adaptation to the raw materials of phosphate ores, taking into account the physicochemical features of ore phosphate raw materials and the requirements of the technology for temperature conditions of thermal treatment. The redistribution of process zones and gas-air flows, which ensured the most optimal operating modes, with the maximum reuse of heat of exhaust gases, is scientifically justified. The possibilities of modernization of agglomeration and roasting machines for processing iron-containing ores and concentrates, for thermal treatment of phosphate ore raw materials, primarily their thermal engineering part, which would provide the required operating modes and parameters of heat treatment, as well as the gas dynamics of the complex chemical and energy technological roasting process, have been identified. The presented heat engineering calculations of the agglomeration and roasting machines made it possible to determine the consumption of natural gas and air for combustion, to select traction units for air supply. Determine the cooling time of the phosphorite agglomerate and pellets, clarify the distribution of sintering and cooling zones for various operating modes of calcining and agglomeration machines. Based on the results of the calculation, a scheme for the recovery of gas-air coolant flows was chosen. The approximate thermal engineering calculations of the agglomeration machine of the AKM type and the roasting machine of the OKM type confirmed the possibility of obtaining satisfactory quality of phosphorite agglomerate and pellets from ore phosphate raw materials at a given specific productivity with the provision of the final temperature of the agglomerate and pellets after cooling.

Keywords: agglomeration machine, roasting conveyor machine, temperature, agglomerate, roasting, pellets, phosphorite ore

The work was carried out within the framework of the state assignment, project No. FSWF-2023-0012.

Проведенные научно-исследовательские работы по расчету образцов рудного фосфатного сырья и материалов флюсовых добавок с целью определения их пригодности для производства желтого фосфора позволили определить технологические параметры химико-энерготехнологических процессов агломерации и окомкования сырой руды и рудного концентрата [1, 2]. Теплотехнические расчеты имеют приближенный характер, поскольку не учитывались особенности процессов тепло-массообмена в слое спекаемой шихты и окатышей, для упрощения задачи приняли ряд допущений, вследствие чего полученные результаты не могут считаться окончательными и на стадии выполнения рабочего проекта должны быть проработаны более тщательно [3, 4]. Результаты уточненного расчета должны составить основу для проектирования модернизированной агломерационной или обжиговой машины конвейерного типа применительно к конкретным условиям спекания аглошихты или обжига окатышей из фосфатного рудного материала [5, 6].

Необходимость модернизации агломерационных и обжиговых машин типа АКМ и ОКМ вызывается тем, что указанное оборудование предназначено для переработки железосодержащих руд и концентратов, отличающихся по свойствам от фосфатного рудного сырья [7]. Отсюда возникает необходимость модернизации в первую очередь их теплотехнической части, которая обеспечила бы требуемые режимы функционирования и параметры тепловой обработки, а также газодинамику сложного химико-энерготехнологического процесса обжига [8].

Цель исследования – определение особенностей расчета теплотехнической части обжиговых и агломерационных машин для их адаптации к сырью фосфатных руд, учитывая физико-химические особенности рудного фосфатного сырья и требования технологии по температурным условиям термической обработки, используя перераспределение технологических зон и газоздушных потоков, которые обеспечили бы наиболее оптимальные режимы функционирования, при максимальном повторном использовании тепла отходящих газов.

Материалы и методы исследования

При анализе результатов теплотехнического расчета агломерационной машины типа АКМ был принят ряд допущений, таких как:

- интенсивность теплоподдачи машины – 54470 кДж/м²·мин;
- площадь горна – 6,75 м²;
- скорость движения ленты – 1,5 м/мин.

Расчет производительности агломерационной машины произведен без учета теплообмена в слое рудного сырья, исходя из заданной вертикальной скорости спекания и без увязки со скоростью движения ленты агломерационной машины.

При скорости агломерационной ленты 1,5 м/мин продолжительность пребывания агломерационной шихты в зоне спекания составит 22,7 мин. При вертикальной скорости спекания 16 мм/мин время, необходимое для завершения процесса, составит 18,75 мин, то есть при этих условиях скорость ленты должна составлять не 1,5 м/мин, а 1,8 м/мин.

При более высокой вертикальной скорости спекания соответственно должна возрасти и скорость ленты с тем, чтобы процесс завершался над последней вакуум-камерой зоны спекания [9]. Интенсивность теплоподдачи и длина горна должны быть выбраны так, чтобы с учетом содержания кокса в шихте, протекания физико-химических и теплообменных процессов в слое аглошихты в зоне спекания выдерживался требуемый температурный уровень процесса обжига, а именно 1440 °С, как это указано в исходных данных.

Таким образом, с учетом отмеченных недостатков выполненное исследование и расчет носят весьма ориентировочный характер и требуют уточнений [10]. Однако из него следует, что расход природного газа на тонну годного агломерата не превысит 18 м³. С учетом имеющегося опыта в исходных данных для технико-экономического обоснования авторами принят удельный расход природного газа 25 м³/т.

Необходимое для охлаждения агломерата до температуры 100 °С время составит, с учетом коэффициента запаса 1,5, не более 21 мин, что может быть обеспечено при скорости агломерационной ленты машины 1,43 м/мин.

Следует учесть, что при этом скорость фильтрации охлаждающего воздуха принята равной 0,7 м/с. При скорости фильтрации 1 м/с время охлаждения уменьшится до 15 мин, а скорость агломерационной ленты машины возрастет до 2 м/мин.

Если площадь спекания агломерационной машины не изменится и составит 85 м², то для завершения процесса обжига на последней вакуум-камере вертикальная скорость спекания должна быть равной 17,6 мм/мин, что практически соответствует величине, полученной авторами экспериментальным путем.

Представляется завышенным объем газов, отходящих от зоны спекания [11]. Это связано с тем, что в расчете не учте-

но, что скорость фильтрации под горном не превысит 0,45 м/с, а в зоне собственно спекания 0,82 м/с. В настоящем расчете авторов принято, что в первые 14 мин средняя скорость фильтрации составит 0,85 м/с, а далее 1,1 м/с.

Анализ результатов расчета показал, что объем отходящих от зоны спекания газов с учетом 40% подсосов составит 525000 м³/ч, а от зоны охлаждения – 500000 м³/ч.

Следует отметить, что объемы газов, отходящих от зоны охлаждения, полученные авторами и регламентные, согласуются более удовлетворительно. Эти объемы выражаются числами 648153 м³/ч и 407880 м³/ч.

Конвейерные машины для обжига окатышей типа ОКМ применяются в отечественной практике для обжига окатышей из концентратов железных руд [12]. По мере освоения и усовершенствования технологии обжига они модифицировались с целью повышения надежности, равномерности шихтового поля по ширине и длине технологических зон, снижения расхода топлива на тонну готового продукта и других показателей [13]. В результате было разработано несколько модификаций этих машин.

Однако в силу специфики процесса обжига окатышей из фосфатных рудных концентратов ни одна из них не может быть применена в фосфорном производстве без соответствующей модернизации [14]. Она в первую очередь должна претерпеть изменения своей теплотехнической части, включая конструкцию секций горна, перераспределение технологических зон и газоздушных потоков, которые обеспечили бы наиболее оптимальные режимы тепловой обработки при максимальном повторном использовании тепла отходящих газов.

Для выбора рациональной конструкции обжиговой машины конвейерного типа необходимо выполнение теплотехнического расчета, учитывающего физико-химические особенности рудного сырья и требования технологии по температурным условиям термической обработки [15].

В состав теплотехнического расчета процесса обжига и охлаждения окатышей из концентрата фосфоритовой руды вошли:

- расчет горения природного газа для двух температур дымовых газов;
- определение производительности обжиговой машины и выхода годных окатышей;
- определение расходов теплоносителя по технологическим зонам;
- расчет объемов и температуры отходящих газов по зонам машины;
- определение удельного расхода тепла и газообразного топлива;
- расчет процесса охлаждения окатышей.

На основании проведенных расчетов выбрана схема тепловых и газоздушных потоков с использованием тепла отходящих газов для осуществления отдельных стадий процесса обжига, с использованием тягодутьевых средств – эксгаустеров.

Обжиговая конвейерная машина состоит из отдельных секций, объединенных на технологические зоны: сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Окомкованное фосфоросодержащее рудное сырье с влажностью 13% загружается на конвейер обжиговой машины и поступает в зону сушки, которая состоит из секций 1 и 2. Причем в 1-й секции сушка ведется горячими газами, просасываемыми через плотный слой, движущийся перпендикулярно потоку газа-теплоносителя снизу вверх, а во 2-й секции – сверху вниз.

Реверс газа-теплоносителя приводит к увеличению газопроницаемости слоя окатышей и предотвращает разрушение окатышей в нижней части слоя, вследствие их переувлажнения. В зону сушки подаются отходящие газы из трех вакуум-камер зоны обжига, представляющие собой смесь дымовых газов, газов, выделяющихся при обжиге, и атмосферного воздуха.

Газы просасываются через слой материала в зоне сушки и поступают на газоочистку, а затем эксгаустером через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

Окатыши из зоны сушки поступают в зону подогрева. Подогрев ведется продуктами сгорания природного газа с температурой 950 °С, сжигаемого в горелках зоны. При этом используется горячий воздух, отходящий из зоны охлаждения с температурой 300 °С. Отходящие газы из зоны подогрева через систему газоочистки выбрасываются в атмосферу.

Далее материал поступает в зону обжига, где он подвергается обработке теплоносителем с температурой 1200 °С. Теплоносителем в этой зоне являются также продукты сгорания природного газа. И в этой зоне для горения используется горячий воздух, отходящий из зоны охлаждения с температурой 300 °С.

Отходящие газы из зоны обжига частично поступают в зону сушки (от трех вакуум-камер), а избыточные газы после системы газоочистки выбрасываются в атмосферу.

Из зоны обжига материал поступает в зону рекуперации, где происходит выравнивание температур по высоте слоя засыпки материала. Процесс выравнивания происходит за счет отдачи тепла воздухом, нагретым в зоне охлаждения. Часть этого воздуха попадает в зону обжига над вакуум-камерами № 15, 16.

Таблица 1

Потоки теплоносителя в зонах обжиговой конвейерной машины

Наименование зон	Количество теплоносителей, проходящих через слой (на выходе), м ³ /ч	Количество теплоносителей на выходе из зоны (с подсосами), м ³ /ч	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С	Количество теплоносителя на выбросе в атмосферу, м ³ /ч
Сушки 1	18600	21000	300	50	21000
Сушки 2	34600	76500	300	60	76500
Подогрева	28800, в том числе воздуха на горение 27285	59100	950	150	59100
Обжига	44106, в том числе воздуха на горение 40670	88700	1200	335	35300
Рекуперации	43200	86700	900	408	88200
Охлаждения 1	72000	72000	20	900	Все в зоны рекуперации и обжига
Охлаждения 2	57600	57600	20	300	Все в зоны подогрева и обжига

Отходящие газы из этих вакуум-камер зоны обжига и из зоны рекуперации направляются в один коллектор и через систему газоочистки выбрасываются в атмосферу. Этот коллектор через систему газопроводов связан зоной сушки, при необходимости часть отходящих газов может использоваться для сушки.

Охлаждение верхних слоев окатышей начинается в зоне рекуперации, продолжается в зоне охлаждения 1 и заканчивается в зоне охлаждения 2. Охлаждение осуществляется атмосферным воздухом, который подается в вакуум-камеры и просасывается

через слой окатышей снизу вверх. Средняя температура окатышей на выходе из зон охлаждения 100 °С.

Потоки газа-теплоносителя в технологических зонах и его температура представлены в табл. 1.

Результаты исследования и их обсуждение

За прототип принята обжиговая машина типа ОКМ-108, включая принципиальную схему газопотоков и распределение площади обжиговой конвейерной машины между отдельными технологическими зонами (табл. 2).

Таблица 2

Распределение по площади обжиговой машины между отдельными технологическими зонами

Наименование технологических зон	Распределение площади обжиговой машины между технологическими зонами, м / %	
	Обжиг железорудных окатышей	Обжиг окатышей из фосфатного рудного сырья
Сушка 1 (дутье снизу вверх)	13.3 / 12.3	12 / 11.1
Сушка 2 (просос теплоносителя сверху вниз)	6.7 / 6.2	8 / 7.4
Подогрев (просос теплоносителя сверху вниз)	20 / 18.5	20 / 18.5
Обжиг (просос теплоносителя сверху вниз)	22 / 20.4	20 / 18.5
Рекуперация (просос теплоносителя сверху вниз)	10 / 9.2	12 / 11.1
Охлаждение 1 (продув воздуха снизу вверх)	20 / 18.5	20 / 18.5
Охлаждение 2 (продув воздуха снизу вверх)	16 / 14.8	16 / 14.8

Анализ результатов проведенного исследования и расчетов показывает, что величина зоны сушки при обжиге окатышей из концентрата фосфоритовой руды должна быть увеличена по сравнению с ОКМ-108 для обжига окатышей из железорудных концентратов, так как влажность сырых фосфоритовых окатышей 13%, а железорудных 9%, допустимая температура в зоне сушки для первых не более 300–350 °С, для вторых – более 450 °С.

В зоне рекуперации при обжиге железорудных окатышей помимо процесса конвективного теплообмена, связанного с переносом тепла из верхних горизонтов слоя в нижние, протекает реакция окисления магнетита в гематит с выделением тепловой энергии, что вместе обеспечивает разогрев нижнего слоя окатышей.

При обжиге фосфоритовых окатышей в зоне рекуперации процесс с выделением значительного количества тепловой энергии в химической реакции отсутствует. Следовательно, величина этой зоны изменится.

Для определения оптимального распределения площади машины по зонам необходимо выполнение материальных и тепловых балансов по стадиям с учетом всех процессов массо- и теплообмена, что в теплотехнических расчетах регламентного режима обжига отсутствует, так как скорости фильтрации газа-теплоносителя были приняты, а не рассчитаны. Такой подход, вероятно, допустим, поскольку оценка процесса обжига рудного сырья в регламентном режиме функционирования обжиговой конвейерной машины осуществлялся по укрупненным показателям.

Для проверки основного показателя процесса обжига окатышей – удельной производительности был произведен расчет при скоростях фильтрации газа-теплоносителя в регламентном режиме. В результате расчета получено 0,366 т/м²·ч, что удовлетворительно коррелирует с экспериментальным практическим значением.

Теплотехническим расчетом определено время охлаждения окатышей до температуры 100 °С. Оно составило 17 мин. При суммарной длине зоны охлаждения 18 м и скорости конвейера обжиговой машины 0,82 м/мин продолжительность охлаждения составит 22 мин, то есть с коэффициентом запаса порядка 30%.

Поскольку в теплотехническом расчете размеры технологических зон выбраны по аналогии с машиной ОКМ-108 и скорости фильтрации газа-теплоносителя, в конечном итоге получен расход природного газа 81 м³/т годных окатышей.

Эта величина представляется авторам завышенной. Анализ тепловых потоков на обжиговой машине показывает, что значительная тепловая энергия на машине не используется и выбрасывается в атмосферу, от зон обжига и рекуперации. Объем этих газов составляет 77959 м³/ч, а расчетная температура без подсосов – 607 °С. Можно предположить, что при углубленном теплотехническом расчете схему тепловых и газовых потоков можно будет решить более рационально и за счет этого снизить удельный расход природного газа. В схеме газовоздушных потоков для реверса газатеплоносителя и сброса отработанных газов в атмосферу используется ряд тягодутьевых средств. С целью увеличения срока службы, защиты от абразивного износа необходимо предусмотреть обязательную очистку газов от пыли, а потоки, сбрасываемые в атмосферу, должны быть очищены и от химических примесей: соединений F, S, Р₄. Для очистки реверсируемых газовых потоков от пыли на обжиговых машинах, работающих на заводах черной металлургии, используются жалюзийные уловители пыли, циклоны, батарейные циклоны, электрофильтры.

Заключение

Теплотехнические расчеты агломерационной и обжиговой машин позволили определить расходы природного газа и воздуха на горение, выбрать вентиляторы для подачи воздуха. Определить время охлаждения агломерата и окатышей, уточнить распределение зон спекания и охлаждения для различных режимов функционирования обжиговых и агломерационных машин. По результатам расчета выбрана схема рекуперации газовоздушных потоков теплоносителя.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Выполненные приближенные теплотехнические расчеты агломерационной машины типа АКМ и обжиговой машины типа ОКМ подтвердили возможность получения на них агломерата и окатышей из рудного фосфатного сырья при заданной удельной производительности с обеспечением конечной температуры агломерата и окатышей после охлаждения не более 100 °С.

2. Определены величины газовых потоков, произведен выбор тягодутьевых средств.

3. Разработаны исходные данные на схему газоочистки газовоздушных потоков обжиговой машины типа ОКМ.

4. Результаты теплотехнического расчета носят приближенный характер и требуют уточнения на стадии рабочего проектирования.

Список литературы

1. Borisov V., Bulygina O., Vereikina E. The use of coevolutionary algorithms for optimizing the operating regimes of the roasting conveyor machine // *Journal of Applied Informatics*. 2023. Vol. 18, Is. 3. P. 52–60. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-3-52-60.
2. Дли М.И., Пучков А.Ю., Прокимнов Н.Н., Окунев Б.В. Нечеткологическая модель многостадийной химико-энерготехнологической системы переработки мелкодисперсного рудного сырья // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18, № 3. С. 92–104. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-3-92-104.
3. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В. Оптимизация реакторного узла для проведения жидкофазных последовательно-параллельных реакций // *Современные наукоемкие технологии*. Региональное приложение. 2023. № 1 (73). С. 47–53.
4. Пучков А.Ю., Прокимнов Н.Н., Рысина Е.И., Шутова Д.Ю. Нейрорегулятор комплексной технологической системы переработки рудных отходов // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18, № 5. С. 91–105. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-91-105.
5. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимнов Н.Н., Соколов А.М. Интеллектуальная модель управления рисками нарушения характеристик электромеханических устройств в многостадийной системе переработки рудного сырья // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18, № 1. С. 22–36. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-1-22-36.
6. Бобков В.И., Никифоров В.А., Панченко С.В. Особенности гидродинамики и тепломассопереноса при активизации химико-энерготехнологических процессов восстановления в коксовой зоне руднотермической печи // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 12. С. 148–154.
7. Орехов В.А., Бобков В.И., Быков А.А. Исследование особенностей высокотемпературных режимов обжига окомкованного рудного сырья, обогащенного свободным углеродом // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 11. С. 174–179.
8. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимнов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // *Прикладная информатика*. 2022. Т. 17, № 6. С. 102–121. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121.
9. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности методики определения теплофизических свойств фосфоритового агломерата // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 10–1. С. 59–63.
10. Дли М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М., Моргунова Э.В. Нечеткая динамическая онтологическая модель для поддержки принятия решений по управлению энергоемкими системами на основе прецедентов // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18, № 5. С. 59–76. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-59-76.
11. Иващук О.Д., Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Федоров В.И., Иващук О.О., Каложная Е.В. Автоматизация оценивания эффективности усреднения товарного концентрата руды // *Современные наукоемкие технологии*. 2023. № 10. С. 39–44. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39789> (дата обращения: 05.03.2024).
12. Харламов Д.А., Масыгина Н.И. Математическое моделирование теплового состояния сталеразливочного ковша и его влияние на технико-экономические показатели производства // *Современные наукоемкие технологии*. 2023. № 4. С. 100–105. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39584> (дата обращения: 05.03.2024).
13. Алексеев Е.А., Лабутин А.Н., Пономарева Ю.Н. Робастная система управления реактором твердофазного дополиамидирования // *Современные наукоемкие технологии*. Региональное приложение. 2023. № 1 (73). С. 31–36.
14. Орехов В.А. Математическое моделирование процессов образования шлама в рудно-термических печах при переработке фосфатного рудного сырья // *Современные наукоемкие технологии*. 2023. № 7. С. 78–86. DOI: 10.17513/snt.39698.