

Изучение динамики образования гарнисажа при производстве муллитокорундового шамота во вращающейся печи

1. Технология производства

Получение шамота муллитокорундового состава с массовой долей Al_2O_3 $79\pm 1\%$ обеспечивается использованием технического глинозема и глинистой составляющей (глины Латненские, каолины Поволжского, Обозновского или Окладневского месторождений).

Муллитокорундовый шамот используется для производства изделий, масс, смесей и мертелей. Технология его производства основана на брикетировании смеси тонкомолотых каолина и глинозема с последующим высокотемпературным обжигом брикета во вращающейся печи (рис. 1).

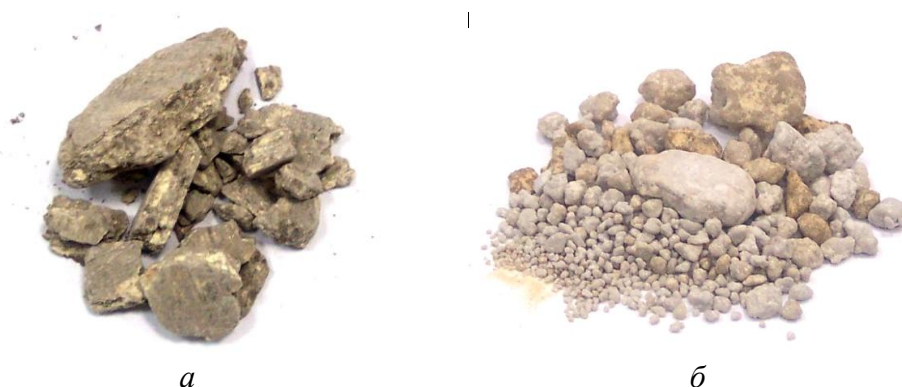


Рис. 1. Внешний вид сырья и продукта обжига:
а – брикетированный материал; *б* – муллитокорундовый шамот.

Качество муллитокорундового шамота согласно техническим условиям (табл. 1).

При розжиге и охлаждении печи получают шамот с водопоглощением более 5%, который используется для производства муллитокорундового мертеля или при розжиге печи с целью уменьшения потерь сырья.

Таблица 1

Технические требования к шамоту

Наименование показателей	Нормативы
1. Массовая доля, % Al_2O_3 , не менее Fe_2O_3 , не более	 79±1 1,0
2. Огнеупорность, °С, не ниже	1800
3. Водопоглощение, %, в пределах	2,0 – 5,0
4. Кажущаяся плотность (объемный вес), г/см ³ , не	2,70

менее	
5. Влажность, %, не более	0,5
6. Содержание зерен мельче 0,5 мм, % не более	15,0
7. Размер кусков, мм, не более	60

Исходные сырьевые материалы

В качестве глинистой составляющей используются:

- ❖ каолин Поволжского месторождения марки ПЛК-О или ПЛК-В;
- ❖ каолин Кировоградский Обозновского месторождения;
- ❖ глины Латненские марок ЛТ-0 или ЛТ-1 (табл. 2).

Таблица 2

Технические требования к связующим глинам и каолинам

Марка каолина, глины	Массовая доля, %		Изменение массы при прокаливании, %, не более	Огнеупорность, °С, не ниже	Влажность, %, не более	Остаток на сите №0063, %, не более	Размер кусков, мм, не более
	Al ₂ O ₃ , не менее	Fe ₂ O ₃ , не более					
ПЛВК	41,0	1,2	-	1750	24,0	2,0	н/н
ПЛК-О	40,0	1,5	-	1750	24,0	5,0	н/н
КО-0	44,0	1,2	16,0	1770	24,0	0,9	н/н
КО-1	42,0	1,3	16,0	1750	24,0	5,0	н/н
КБЛПСО	40,0	2,5	16,0	1750	22,0	н/н	400
ЛТ-0	39,0	1,5	15,0	1730	24,0	н/н	н/н
ЛТ-1	37,0	1,5	18,0	1730	24,0	н/н	н/н

Таблица 3

Технические требования к глинозему

Наименование показателя, массовая доля, %	Норма для марок			
	Г-О	Г-ОО	Г-1	Г-2
1. Содержание компонентов, не более:				
SiO ₂	0,03	0,02	0,05	0,08
Fe ₂ O ₃	0,05	0,03	0,04	0,05
TiO ₂ +V ₂ O ₃ +Cr ₂ O ₃ +MnO	0,02	0,01	0,02	0,02
ZnO	0,02	0,01	0,03	0,03
P ₂ O ₅	0,002	0,002	0,002	0,002
Na ₂ O+K ₂ O в пересчете на Na ₂ O	0,5	0,4	0,4	0,5
2. Потеря массы при прокаливании, %, не более	1,2	1,2	1,2	1,2
3. Влажность материала, %, не более	2,5	2,5	2,5	2,5

Примечание: 1. Согласно ГОСТ 30558-98 расчетную массовую долю влаги глинозема принимают равной 0,5 %. 2. Рекомендуемый остаток глинозема на сите №0063 (до помола) не более 40,0 %.

Таблица 4

Требования к лингносульфонату техническому

Наименование показателя	Норма для марки А
1. Внешний вид и цвет	Однородная жидкость темно-коричневого цвета
2. Массовая доля сухих веществ, %, не менее	47,0

Наименование показателя	Норма для марки А
3. Вязкость условная, с, не более	50-320
4. Плотность, кг/м ³ , не менее	1230

Подготовка глинистой составляющей

Подготовка глинистой составляющей производится в помольном участке.

Сырье, используемое в связующей части шихты огнеупорной массы, хранится на складе в условиях, исключающих смешивание, загрязнение посторонними включениями и дополнительное увлажнение.

Огнеупорные каолины на складе сырья ковшами грейферного крана подаются в загрузочный бункер, в котором глина дробится до кусков, размерами не более 60 мм.

Дробленая глина сушится в сушильном барабане (длина 14 м; диаметр 2,4 м), работающему по принципу прямотока. Температура на входе в сушильный барабан поддерживается в пределах 600...800 °С, на выходе должна быть не ниже 100 °С. Влажность высушенного каолина должна быть не более 5,0 %.

Высушенный каолин через камневыделительные вальцы, где происходит отделение каменистых включений, равномерно подается на измельчение в центробежную мельницу – дезинтегратор, а после измельчения просеивается на вибросите с размерами отверстий сеток: верхней – 4,0...4,7 мм, нижней – 1,8-2,2 мм.

Таблица 1.5

Требования к зерновому составу молотого каолина

Наименование показателей	Норматив, массовая доля, %
1. Остаток на сите 2 мм, не более	3
2. Проход через сито 0,5 мм, не менее	75

Измельченный каолин винтовым конвейером подается в бункер, откуда пневмонасосами, установленными под ним, подается в шихтовочные бункера брикетного участка. Туда же подается пыль электрофильтров сушильного барабана, работающего на сушке каолинового сырья, предназначенного для производства муллитокорундового шамота и изделий.

Обработка глинозема

Глинозем из железнодорожных вагонов перегружается силос, откуда при помощи пневмооткатных насосов подается в бункера над трубными мельницами брикетного отделения.

Далее он измельчается в двухкамерной трубной мельнице. Для ускорения помола глинозема в мельницу подается ПАВ, представленный водным раствором ГКЖ-10 или ГКЖ-11 и триэтаноламин (ТЭА).

Таблица 1.6

Гранулометрический состав измельченного глинозема

Наименование показателей	Норматив, массовая доля, %
1. Остаток на сите № 0063, не более	5,0
2. Фракция –3 мкм, не менее	30,0

Измельченный глинозем пневмокамерными насосами, установленными под трубной мельницей, подается в бункера. В один из бункеров брикетного отделения поступает и пыль электрофильтров.

Приготовление огнеупорной массы

Компоненты шихты огнеупорной массы, подаваемые на смешение, дозируются автоматическими весовыми дозаторами.

Таблица 1.7

Вещественный состав шихты

Наименование компонентов	Массовая доля, % на прокаленное вещество	
	Шихта №1	Шихта №2
1. Глина ЛТ-0, ЛТ-1	–	34±1
2. Каолин ПЛКО (В), КО-0 (1), КБЛПС	35±2	–
3. Глинозем тонкомолотый	65±2	66±2

Смешивание компонентов шихты и обработка массы производится с добавлением воды. Влажность огнеупорной массы после бетономесителей должна быть в пределах 20-22 %.

Огнеупорная масса от бетоносмесителя ленточным транспортером и элеватором подается в бункера, откуда ячейковым питателем ее подают в двухвальную смеситель, в котором производится дополнительное увлажнение массы водным раствором ЛСТ до влажности 24-28 %, который подается через распыляющее устройство.

Переработка пыли электрофильтров

Переработка пыли электрофильтров, уловленной за предыдущий цикл работы печи и предварительно измельченной в трубной мельнице, производится в бетономесителе, где она также увлажняется водным раствором ЛСТ.

Брикетирование огнеупорной массы

Прессование брикета из огнеупорной массы производится на пресссвальцах. Сформованный на пресссвальцах брикет имеет неправильную форму с размерами, в

основном, 5-40 мм. Массовая доля пылевидных частиц с размерами менее 0,5 мм в только что сформованном брикета не должна превышать 15 %.

Обжиг брикета на шамот

Брикет ленточным конвейером через загрузочную течку загружается во вращающуюся печь (длина 75 м, диаметр 3,6 м). Охлаждение обожженного шамота в холодильнике производится потоком воздуха и путем орошения водой, подаваемой воздушно-водяной форсункой. Шамот, обожженный во вращающейся печи, подается в силоса силосного склада.

2. Образование гарнисажного кольца

В процессе эксплуатации трубчатой вращающейся печи при нарушении технологии подготовки шихты или неудовлетворительной работе пресс-вальцов может образовываться до 10 % брака обжига. После остановки печи из печи вручную выкручивается до 80 т намазки.

Образование намазки происходит по всей длине зоны обжига, при этом температура в этой зоне оказывает ощутимое влияние на скорость зарастания печи. Об этом свидетельствует и тот факт, что перенос зоны максимальных температур в направлении оси печи (изменение длины факела) приводит к интенсификации процесса образования гарнисажа на участке с падающей температурой. Косвенно об этом можно судить по продольному профилю намазки, наблюдаемому после остановки печи (рис. 2).

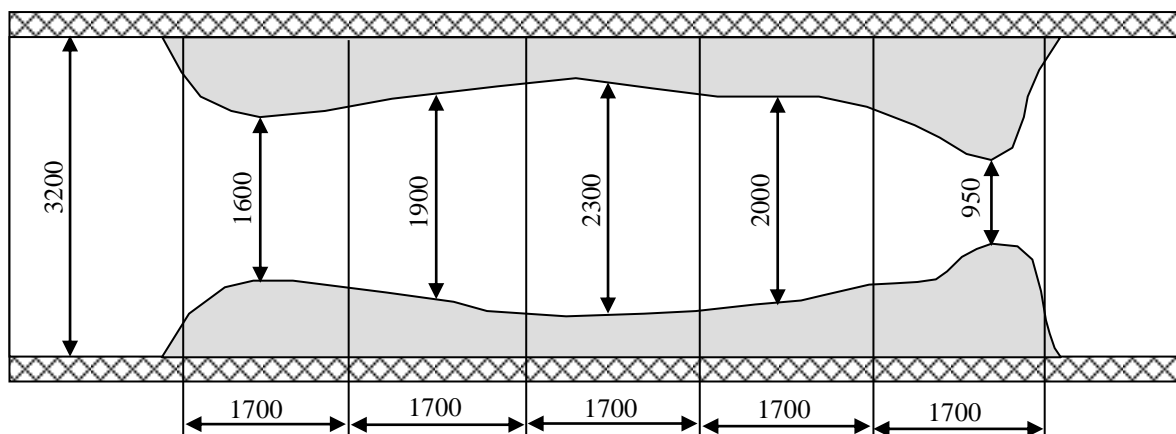


Рис 2. Профиль гарнисажа во вращающейся печи, зафиксированный после останова.

Изменение длины факела приводит к повышению температуры гарнисажного кольца в локальной области, и сопровождающееся частичным расплавлением налипших агрегатов с образованием монолитной, плотно спекшейся массы темного оттенка. Часть намазки откалывается от кольца. Отколовшиеся свары имеют размер до 40 см и при попадании в разгрузочную лентку способны закупорить ее, вызывая аварийную остановку печи.

При визуальном осмотре намазки видно, что она различна по структурному составу. Светлые куски более рыхлые, состоят из множества слипшихся агрегатов, темные куски – монолитные и более плотные (рис. 3). Физико-химические показатели намазки представлены в табл. 8.

По результатам анализов можно сказать, что образующаяся в печи намазка соответствует требованиям, предъявляемым к продукту обжига.



Рис 3. Куски намазки: *a* – рыхлый агрегат; *б* – спекшийся агрегат.

Таблица 8

Намазка	Ср. проба	Темные куски
Массовая доля, %		
Al ₂ O ₃	79,7	80,3
Fe ₂ O ₃	0,83	0,70
П.п.п., %	0,48	0,02
Водопоглощение, %	3,20	2,31
	3,25	2,43
Кажущаяся плотность, кг/м ³	2940	2910

Анализ данных технологических отчетов о работе печи и опытных пусков с целью уточнения технологии обжига шамота позволяет сделать следующие выводы:

- ❖ обжиг высокоглиноземистого брикета затруднен вследствие больших затрат тепла на удаление влаги, меньшей температуры нагрева воздуха, поступающего на горение из холодильного барабана;
- ❖ при нарушении работы прессвальцев приводит к снижению плотности брикета, не обеспечивается равномерная и оптимальная загрузка печи и, как следствие, это приводит к нарушению режима и ускоренному образованию намазки;
- ❖ из-за неполной загрузки печи снижается производительность печи и увеличивается удельный расход топлива;
- ❖ переработка пыли, уловленной в электрофильтрах, с введением ее в состав шихты на стадии помола в трубной мельнице снижает интенсивность образования намазки, при этом гарнисаж имеет более рыхлую структуру и не сплошной характер;
- ❖ перемещение зоны максимальных температур при помощи изменения длины факела способствует обрушению рыхлых агрегатов намазки;
- ❖ при изменении длины факела наблюдается образование двойного кольца гарнисажа (нижний слой – плотный, верхний – рыхлый);

- ❖ удлинение зоны горения путем повышения разрежения в пылевой камере ведет к удлинению кольца намазки.

Для составления алгоритма определения толщины и скорости образования гарнисажа был изучен ряд методик расчета температуры обжигаемого материала и футеровки в зоне обжига. Этим кругом вопросов в 1990-е годы занимались научные институты цементной промышленности. Исследователи допускали, что о толщине гарнисажа во вращающейся и состоянии футеровки можно судить по температуре корпуса печи в зоне ее образования. Институтом ВАМИ был исследован ряд печей для производства цемента и кальцинации глинозема, изучено изменение температуры корпуса вдоль оси печи в зависимости от остаточной толщины футеровки. По результатам исследований предложена «Методика контроля состояния обмазки и футеровки, а также прогнозирования прогрева корпуса вращающихся печей», разработанная ГИПРОЦЕМЕНТОМ и НИИЦЕМЕНТОМ. С ее помощью температура поверхности футеровки, обращенной в рабочую зону, и толщина гарнисажа определяются графически по номограммам, которые индивидуальны для каждого печного агрегата.

Разработанная методика была опробована и хорошо зарекомендовала себя при расчете тепловых потерь печей, используемых в цементной и глиноземной промышленности (печь кальцинации глинозема 4,5×110 м; печь для обжига известняка 3×45 м; печь спекания АГК 5×185; цементная печь 3,6×60 м).

Температуры поверхности кожуха определялись посредством цифрового лазерного пирометра. Плотность теплового потока через футеровку может быть найдена по известным значениям температур корпуса и окружающей среды по формулам:

$$\alpha_{\hat{a}} := 3.5 + 0.062(t_{\hat{a}} - t_{\hat{a}}) + 2.9 \frac{W^{0.8}}{(2r_{\hat{a}})^{0.2}}; \quad (1)$$

$$q := 2 \cdot \pi \cdot (t_{\hat{a}} - t_{\hat{a}}) \cdot r_{\hat{a}} \cdot \alpha_{\hat{a}}, \quad (2)$$

где α_v – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м·К); $t_{\text{нар}}$ – температура кожуха, °С; t_v – температура окружающего воздуха, °С; W – скорость ветра, м/с; $r_{\text{нар}}$ – внешний радиус кожуха, м; q – плотность теплового потока, Вт/м².

Температуры на внутренних границах и на поверхности намазки определяли по формулам

$$t_{\hat{e}} := \frac{-1}{2 \cdot \pi \cdot b_{\hat{e}}} \cdot \left[2 \cdot \pi \cdot a_{\hat{e}} - 2 \cdot \left(\pi^2 \cdot a_{\hat{e}}^2 + \pi \cdot b_{\hat{e}} \cdot q \cdot \ln \left(\frac{r_{\hat{a}}}{r_{\hat{e}}} \right) + 2 \cdot \pi^2 \cdot b_{\hat{e}} \cdot t_{\hat{a}} \cdot a_{\hat{e}} + \pi^2 \cdot b_{\hat{e}}^2 \cdot t_{\hat{a}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

$$t_{\hat{o}} := \frac{-1}{2 \cdot \pi \cdot b_{\hat{o}}} \left[2 \cdot \pi \cdot a_{\hat{o}} - 2 \cdot \left(\pi^2 \cdot a_{\hat{o}}^2 + \pi \cdot b_{\hat{o}} \cdot q \cdot \ln \left(\frac{r_{\hat{e}}}{r_{\hat{o}}} \right) + 2 \cdot \pi^2 \cdot b_{\hat{o}} \cdot t_{\hat{e}} \cdot a_{\hat{o}} + \pi^2 \cdot b_{\hat{o}}^2 \cdot t_{\hat{e}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

$$t_{\hat{i}} := \frac{-1}{2 \cdot \pi \cdot b_{\hat{i}}} \left[2 \cdot \pi \cdot a_{\hat{i}} - 2 \cdot \left(\pi^2 \cdot a_{\hat{i}}^2 + \pi \cdot b_{\hat{i}} \cdot q \cdot \ln \left(\frac{r_{\hat{o}}}{r_{\hat{i}}} \right) + 2 \cdot \pi^2 \cdot b_{\hat{i}} \cdot t_{\hat{o}} \cdot a_{\hat{i}} + \pi^2 \cdot b_{\hat{i}}^2 \cdot t_{\hat{o}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

где t_k – температура на границе огнеупора и кожуха, °С; t_{ϕ} – температура футеровки, обращенной в рабочую зону, °С; t_n – температура намазки, °С; a_k и b_k , a_{ϕ} и b_{ϕ} , a_o и b_o – коэффициенты уравнения теплопроводности для кладки, футеровки и намазки соответственно, причем коэффициент теплопроводности $\lambda = a + b \cdot t$; r_k и r_{ϕ} – внешний и внутренний радиусы огнеупорной кладки соответственно, м.

Тогда толщина обмазки может быть определена путем сравнения текущей плотности теплового потока с ее величиной у полый печи по формуле

$$h_{\hat{a}i} := r_{\hat{o}} \cdot \left(1 - \exp \left(-\pi \cdot \frac{-2 \cdot t_{\hat{i}} \cdot a_{\hat{i}} - 1 \cdot b_{\hat{i}} \cdot t_{\hat{i}}^2 + 2 \cdot t_{\hat{o}} \cdot a_{\hat{i}} + b_{\hat{i}} \cdot t_{\hat{o}}^2}{q} \right)^{-1} \right), \quad (6)$$

где $h_{\text{обм}}$ – толщина обмазки, м.

На встроенном языке Matlab была написана компьютерная программа, реализующая указанный метод. С ее помощью можно находить как отдельные значения толщины гарнисажа, так и строить его профиль (рис. 1).

Указанная программа позволяет вести наблюдение за состоянием гарнисажа и футеровки во вращающейся печи и может быть использована как при изучении факторов, влияющих на процесс гарнисажеобразования, так и в целях оперативного контроля.

В ходе расчетов были обработаны данные наблюдений температуры корпуса печи за 6 контрольных пусков. В результате была выявлена более простая взаимосвязь между температурой кожуха печи и толщиной гарнисажа

$$h_{\text{обм}} = 0,0087 \cdot t_k^2 - 6,7 \cdot t_k + 1,47, \quad (7)$$

а также выражение, позволяющее описать динамику его образования в обычном режиме работы печи

$$h_{\text{обм}} = 5,388 \cdot t_k + 0,208. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) имеют определенную неточность ввиду того, что обработка данных велась не с момента пуска печи, а со времени выхода печи на стационарный режим по факту начала снижения температуры на кожухе печи, т.е. в момент, когда в зоне спекания уже имелся некоторый слой намазанного материала. Толщина этого начального слоя определялась как средняя по 6 опытам величина.

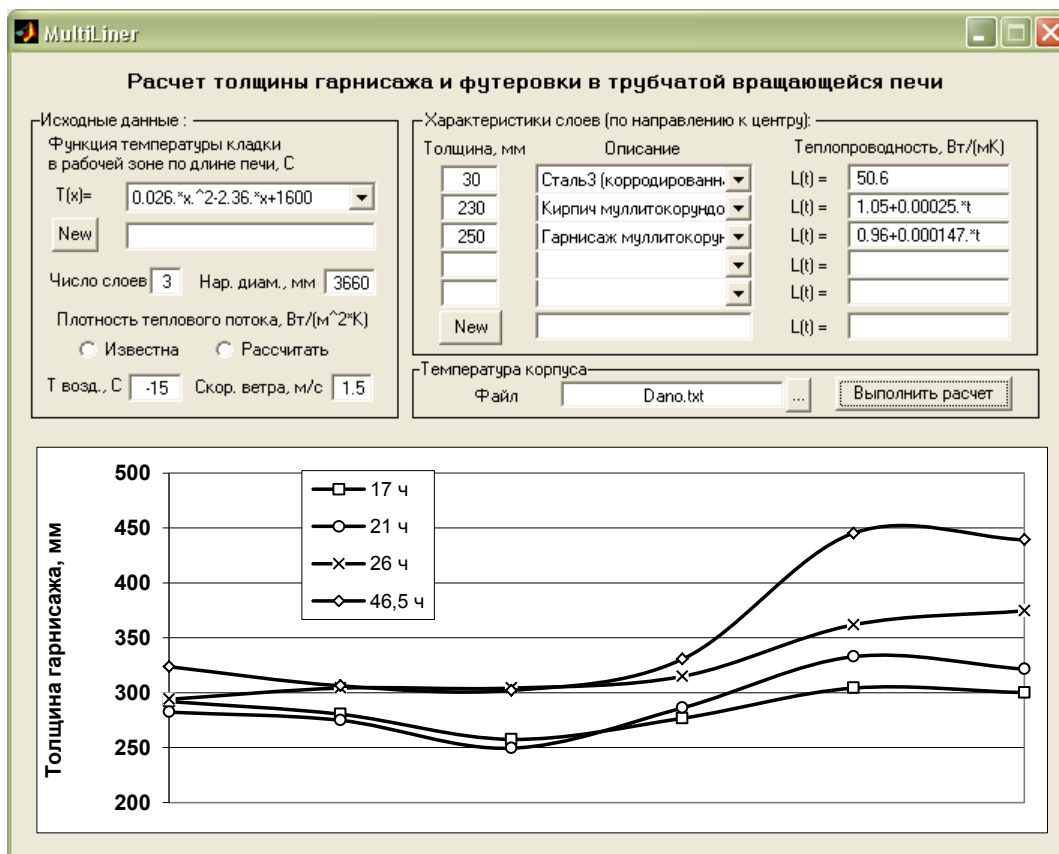
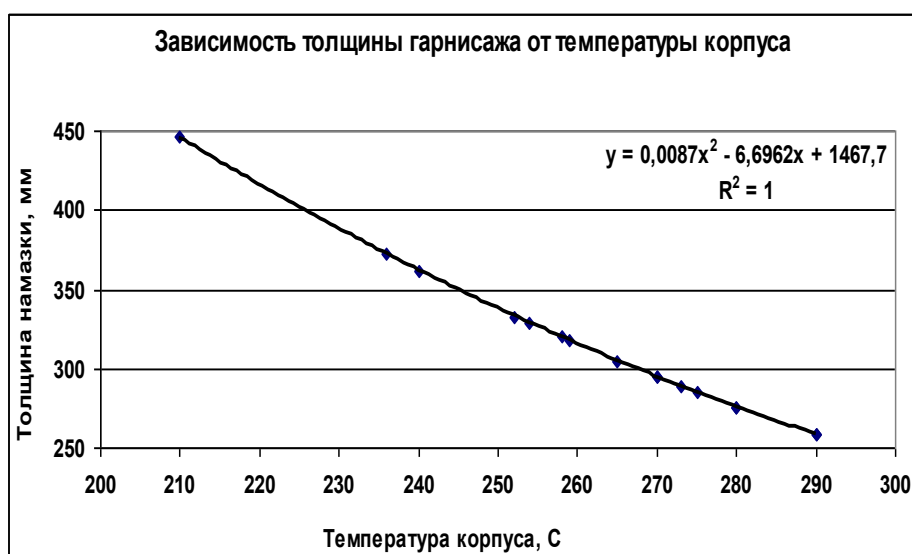


Рис 1. Интерфейс программы для расчета толщины футеровки и гарнисажа.

Результаты расчета представлены на рис. 2. График и выражение для описания динамики образования гарнисажа соответствуют установившемуся тепловому режиму работы печи без изменения длины факела (на 20 витках) при температуры в рабочей зоне и в отсутствии отслоений гарнисажного кольца.



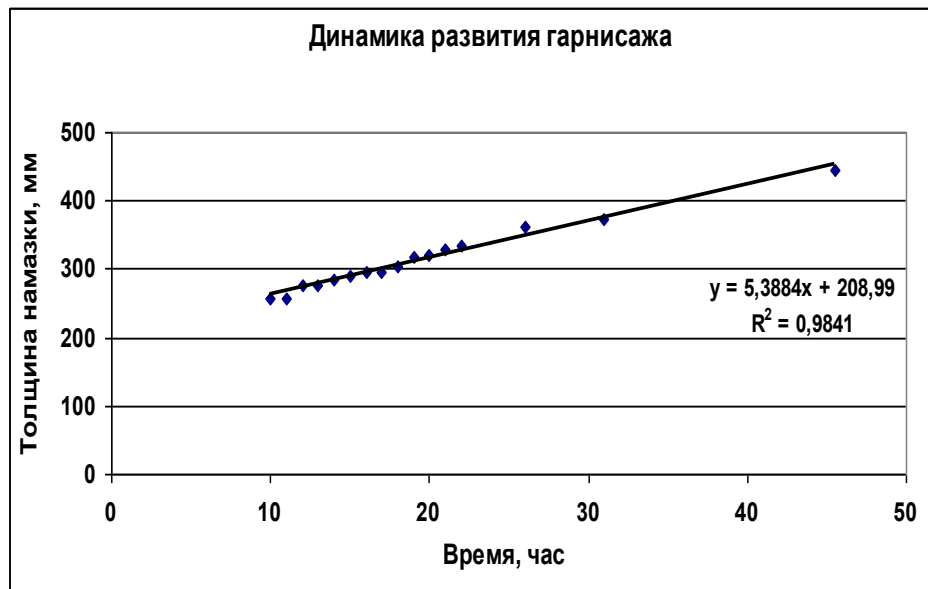


Рис 2. Зависимость скорости образования намазки от температуры кожуха и продолжительности работы печи

На рисунке 3.3 приведены расчетные кривые, соответствующие расчетным профилям толщины гарнисажа в различные моменты времени. Следует отметить, что характер полученных кривых близок к внешнему виду кольца намазки после останова печи.

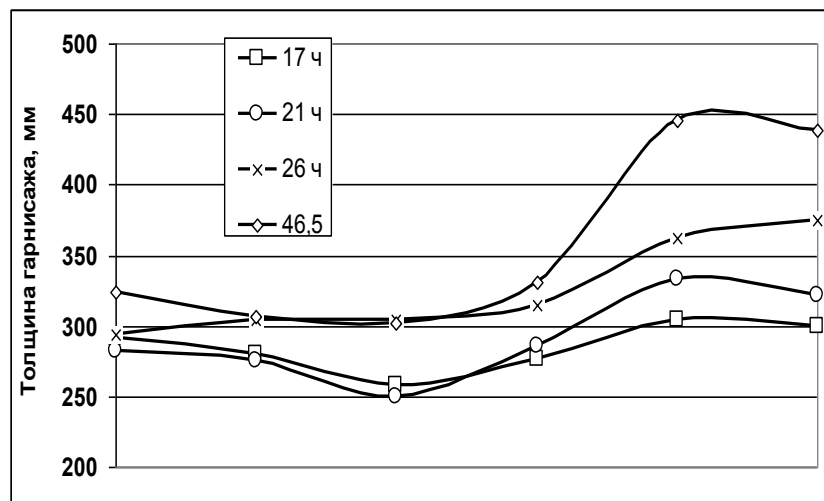


Рис 3.3. Изменение профиля гарнисажа в обжиговой зоне во времени

К сожалению, определить точное значение главного фактора, определяющего скорость «зарастания» печи, а именно, разницы температур на границе футеровки и материала по этой методике нельзя, поскольку глубина проникновения температурных колебаний в огнеупор не превышает по разным оценкам 40-60 мм, а при обычной для вращающихся печей толщине футеровки в 200-300 мм зарегистрировать эти колебания на

поверхности кожуха невозможно. Численные значения градиентов температуры в областях нестационарного теплообмена могут быть найдены с использованием конечно-элементных и разностных методик расчета тепловых процессов при наличии четкого математического описания процесса образования гарнисажа.

Влияние режимных параметров работы печи на скорость образования гарнисажа

Работа вращающейся печи сопровождается частыми сбоями, вызванными нестабильностью загрузки, периодическими неполадками оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры. В конечном счете, это выражается в снижении качества получаемого шамота, выходе его контролируемых показателей (удельный вес, водопоглощение) за пределы регламентируемых норм. В связи с этим существует необходимость прогнозирования качества получающегося продукта и осуществления осознанного управления работой печи в условиях недостатка информации в режиме реального времени.

С этой целью была предпринята попытка выявления степени влияния режимных параметров процесса спекания на показатели качества шамота и установления количественных закономерностей, обуславливающих изменения удельного веса и водопоглощения шамота. Статистической обработке были подвергнуты данные из журналов оперативного контроля за 8 полных циклов работы печи. Для установления степени влияния факторов (давление и расход газа, температура в зоне обжига и в пылевой камере, разрежение в пылевой камере, длина факела) на функции отклика (объемный вес, водопоглощение шамота), построения частных уравнений регрессии и статистической модели трубчатой вращающейся печи как многомерного объекта была использована программа построения статистической модели объекта по методу Брандона.

В результате статистической обработки установлено нижеследующее.

По степени влияния на качественные показатели шамота (объемный вес и водопоглощение) факторы можно выстроить в последовательности (по убыванию): 7-3-6-4-5-2-1.

Расшифровка факторов: 1 – загрузка брикета, у.т.; 2 – загрузка недопала, у.т.; 3 – расход газа, м³/ч; 4 – длина факела, витки; 5 – температура в печи, °С; 6 – температура в пылевой камере, °С; 7 – разрежение в пылевой камере, кгс/м².

Анализируя результаты ранжирования можно прийти к выводу, что качество шамота, получаемого в трубчатой вращающейся печи во многом определяется аэродинамикой рабочей зоны, на что указывают первые 5 факторов, и в меньшей степени

количеством и отношением брикета и недопала в исходной шихте. При осуществлении управления работой печи в первую очередь следует обращать внимание на первые три параметра в ранговой последовательности, оказывающие ощутимое влияние на протекание подготовительных стадий процесса обжига (испарение влаги и нагрев материала до температуры начала реакций). Такие параметры, как длина факела и температура в зоне спекания занимают срединное положение в приведенной последовательности, следовательно, их изменение менее значительно сказывается на качестве продукта. Обусловлено это, по-видимому, тем, что нижний предел температур, регистрируемых в зоне обжига (1720-1740 °С), вполне достаточен для завершения реакций перекристаллизации и дальнейший прогрев материала не ведет к улучшению его качества. Перенос зоны максимальных температур при изменении длины факела, как показывает статистика, заметно сказывается на качественных показателях, а значит, его осуществление (в том числе и с целью обрушения гарнисажа) требует более глубокого осмысления, обоснования длительности и величины смещений.

В результате обработки массива из 866 точек выявлена взаимосвязь качественных показателей процесса (объемного веса и водопоглощения):

$$\gamma = -0,047W + 2,9478 \text{ при } R^2 = 0,4314. \quad (9)$$

Принимая во внимание значение среднеквадратичного отклонения, можно заметить, что четкая зависимость между объемным весом шамота и его водопоглощением отсутствует, поэтому необходимо раздельно исследовать влияние режимных параметров на каждый из этих показателей. Тем не менее, между этими ними прослеживается явно выраженная линейная зависимость (с ростом объемного веса водопоглощение снижается), из чего можно заключить, что типы регрессионных уравнений, выражающих частные зависимости объемного веса и водопоглощения должны быть идентичными, но обратными по знаку.

В ходе анализа были получены следующие статистические модели для расчета объемного веса γ и водопоглощения W шамота (10) – (11).

$$\begin{aligned} \gamma = & (0.97567 + 0.0070393*x_1 - 0.00045923*x_1^2)* \\ & *(2.7701 + 0.0022065*x_2 - 0.00020711*x_2^2)* \\ & *(0.89413 + 0.00011676*x_3 - 3.0356e - 008*x_3^2)* \\ & *(0.92894 + 0.011407*x_4 - 0.00040307*x_4^2)* \\ & *(-0.86506 + 0.0021398*x_5 - 6.1364e - 007*x_5^2)* \\ & *(0.88645 + 0.00042511*x_6 - 3.7546e - 007*x_6^2)* \\ & *(0.99351 + 0.0011821*x_7 - 4.1012e - 005*x_7^2) \\ W = & (1.3123 - 0.089721*x_1 + 0.0058037*x_1^2)* \\ & *(3.8506 - 0.1468*x_2 + 0.012151*x_2^2)* \\ & *(3.7176 - 0.0025004*x_3 + 5.6808e - 007*x_3^2)* \\ & *(2.6082 - 0.23381*x_4 + 0.0077833*x_4^2)* \\ & *(3.7565 - 0.00049848*x_5 - 6.0338e - 007*x_5^2)* \\ & *(0.70211 + 0.00065502*x_6 - 3.1525e - 007*x_6^2)* \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} W = & (1.3123 - 0.089721*x_1 + 0.0058037*x_1^2)* \\ & *(3.8506 - 0.1468*x_2 + 0.012151*x_2^2)* \\ & *(3.7176 - 0.0025004*x_3 + 5.6808e - 007*x_3^2)* \\ & *(2.6082 - 0.23381*x_4 + 0.0077833*x_4^2)* \\ & *(3.7565 - 0.00049848*x_5 - 6.0338e - 007*x_5^2)* \\ & *(0.70211 + 0.00065502*x_6 - 3.1525e - 007*x_6^2)* \end{aligned} \quad (11)$$

$$*(0.65009 + 0.057502*x_7 - 0.001509*x_7^2)$$

Итоговые корреляционные отношения для регрессий составили 0,258 – для первого показателя и 0,407 – для второго. Поскольку значения эти малы, регрессии следует признать неудовлетворительно описывающими объект исследования, хотя общая динамика изменения расчетных функций соответствует данным наблюдений (рис. 4 и 5).

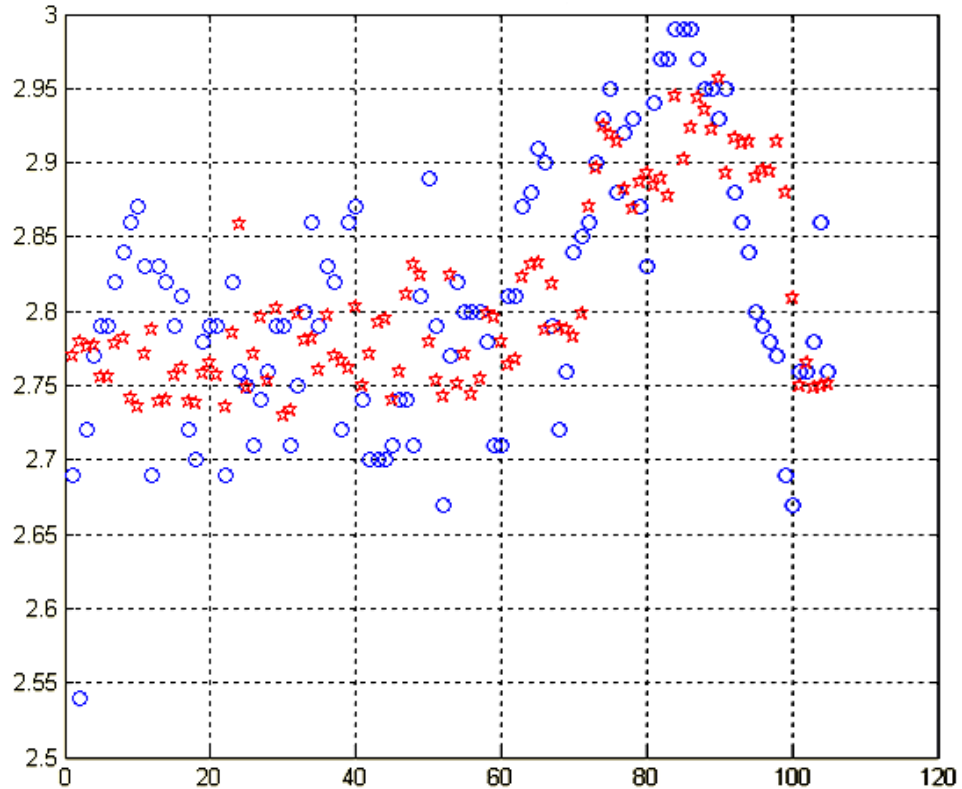


Рис. 4. Отклонение экспериментальных и расчетных значений объемного веса:
о – экспериментальные; * – расчетные.

Частные зависимости параметров были использованы для определения оптимального режима работы печи, который обеспечивает получение шамота марки ШМК с наилучшими показателями качества (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальные значения контролируемых показателей работы печи

Обозн.	Наименование	Размерность	Величина
x ₁	загрузка брикета	у.т.	6 – 9
x ₂	загрузка недопала	у.т.	4 – 8
x ₃	расход газа	м ³ /ч	2000 – 2200
x ₄	длина факела	витки	15 – 17
x ₅	температура в печи	°С	1720 – 1740
x ₆	температура в пылевой камере	°С	550 – 650
x ₇	разрежение в пылевой камере	кгс/м ²	8 – 12

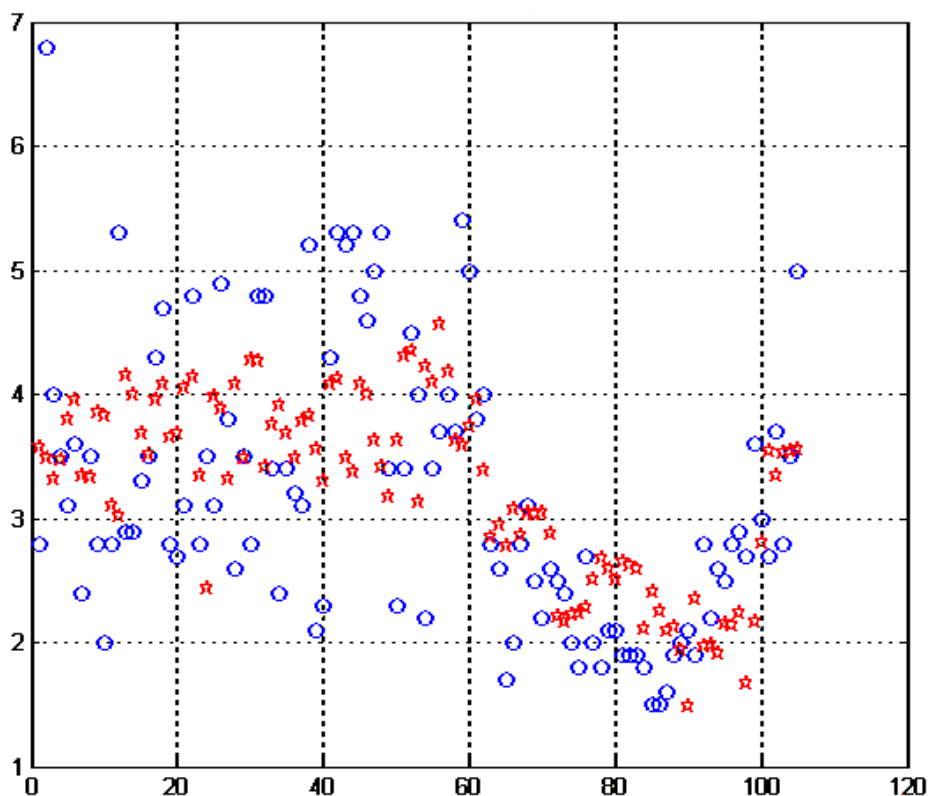


Рис. 5. Отклонение экспериментальных и расчетных значений водопоглощения:
 о – экспериментальные; * – расчетные.

Вторая задача, при решении которой также была использована программа «Brandon_Analyze», состояла в выявлении режимных параметров, косвенно свидетельствующих о толщине намазки во вращающейся печи. Предполагалось, что величина разрежения $P_{п.к.}$ и температуры $T_{п.к.}$ в пылевой камере, как показатели, характеризующие аэродинамику вращающейся печи в целом, могут оказаться определяющими. Предположение подтверждается и результатами наблюдений за работой печи, явно свидетельствующими о том, что с увеличением толщины гарнисажа наблюдается рост разрежения и снижение температуры в пылевой камере (рис. 6).

В результате анализа данных серии из 6 наблюдений установлено, что толщина гарнисажа в печи может быть выражена косвенным путем через режимные показатели согласно регрессионному уравнению

$$h_{обм} = -3,887(T_{п.к.}/P_{п.к.}) + 608,9. \quad (12)$$

Величина среднестатистической ошибки в отдельных опытах варьировалась в диапазоне 0,78–0,92 и в среднем составила $R^2 = 0,855$. Отклонение расчетных величин от экспериментальных для одного из опытов показано на рис. 7.

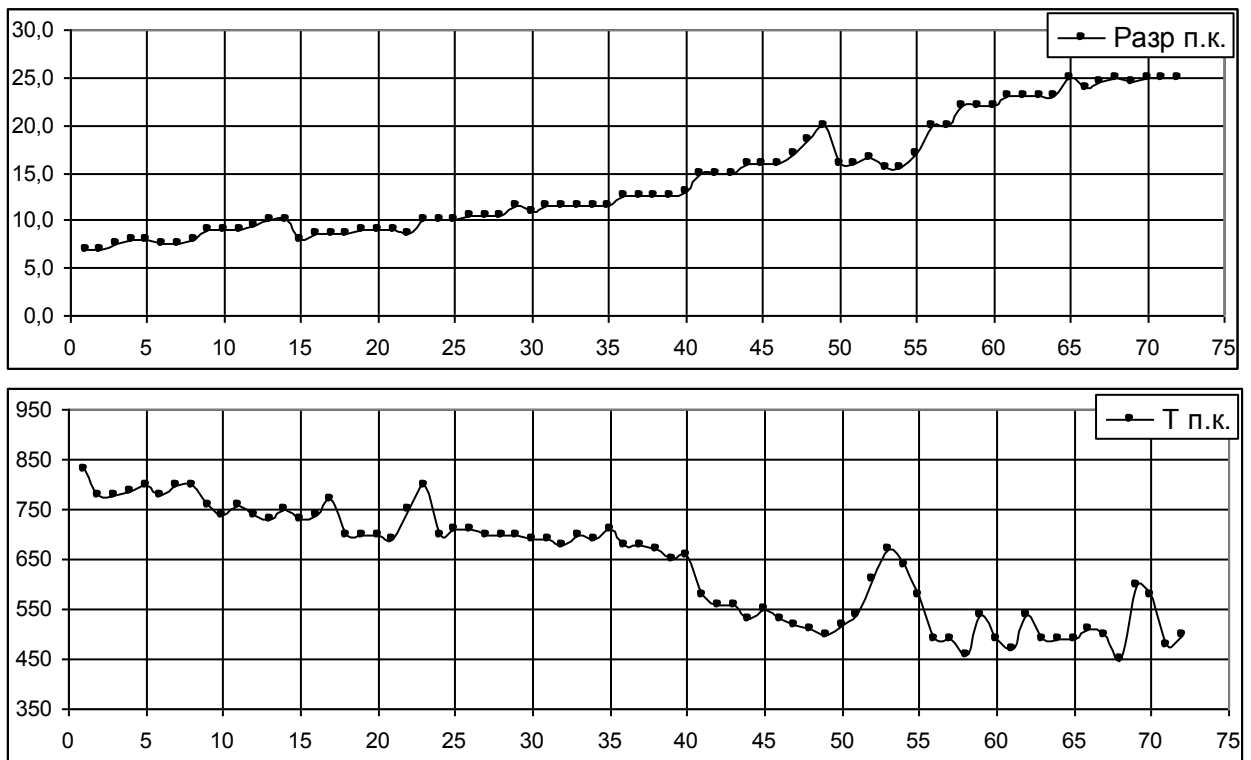


Рис. 6. Графики изменения величин разрежения и температуры в пылевой камере за 72 часа.

К сожалению, статистическая обработка не позволила выявить влияние на скорость роста гарнисажа режимных параметров процесса. Величина среднеквадратичной ошибки ни для одной из изученных серий не превысила 0,5, а потому говорить о значимости отдельных факторов и адекватности регрессионных зависимостей в целом не приходится. Причины, обусловившие неудачу, состоят в низкой точности измерений, сильной их дискретизации по времени, частыми сбоями в работе датчиков температуры и контрольных весов, а также невозможностью длительное время поддерживать какой-либо из показателей на постоянном уровне. Все это, тем не менее, не мешает использовать экспериментальные данные о работе печи при проверке адекватности математической модели, синтезированной аналитическим путем.

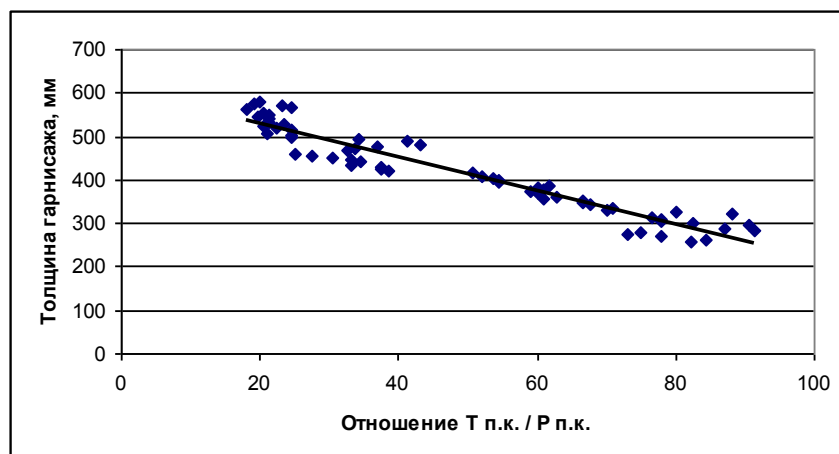


Рис. 7. График зависимости толщины гарнисажа от температуры и давления в пылевой камере.