

СТЕКЛО

ISSN 0131-9582

И КЕРАМИКА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

15 лет ЗАО «СТРОМИЗМЕРИТЕЛЬ»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО
СОВРЕМЕННЫХ СОСТАВНЫХ ЦЕХОВ И УЧАСТКОВ
ПО ХРАНЕНИЮ И ПЕРЕРАБОТКЕ
СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ



СТРОМИ

№ 4

апрель 2005

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА РЕЦЕПТА ШИХТЫ

М. М. Хаймович, К. Ю. Субботин

ЗАО "Стромизмеритель"

Михаил Монсеевич Хаймович
Заместитель главного инженера

Расчет рецепта шихты — это важная составляющая работы химических лабораторий стекольных заводов и заводов, где для получения конечной продукции осуществляется варка шихты (например, заводов электроплавящихся огнеупоров, цехов по производству фритты на металлургических и керамических предприятиях).

Ошибки, допущенные при расчете рецепта, трудно выявляются, но могут оказать существенное влияние на качество конечной продукции. Появление массового брака конечной продукции, если он связан с ошибками расчета, нередко списывается на качество дозирования и смешивания шихты или на нарушение технологического режима печи.

Постановка задачи расчета рецепта шихты и метод ее решения при ручных расчетах подробно описаны в литературе [1–3, 4]. Массовое содержание оксидов в стекле и компонентах задается в процентах. При этом получают систему линейных уравнений, в которой неизвестным является количество каждого компонента, необходимое для получения 100 кг стекла. Каждое уравнение определяется оксидом, заданным при определении рецепта. При корректной постановке задачи количество линейно-независимых уравнений и неизвестных должно совпадать.

Однако лаборатории различных заводов по-разному подходят к определению набора оксидов и материалов, а значит, и к формированию системы уравнений и, соответственно, к деталям расчетов. Эти особенности следует рассмотреть подробно.

Обычно в результате анализа химического состава соды, сульфата и полевого шпата определяется массовое содержание в них Na_2O , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , K_2O , K_2CO_3 и K_2SO_4 , в то время как в составе стекла задается только содержание Na_2O . В связи с этим перед началом основного расчета рецепта шихты проводится перевод через коэффициент соотношения их атомных масс с учетом того, что при варке стекла CO_2 улетучивается, а содержание SO_3 в стекле принимается во внимание отдельно.

Более того, и сода, и сульфат вводят в стекло только щелочи (Na_2O), и без дополнительной информации определить количество обоих материалов невозможно, поскольку обе переменные содержатся только в одном уравнении, и в этом случае количество решений бесконечно. Для разрешения указанного противоречия большинство лабораторий вводит параметр "процент ввода щелочей через сульфат". Причем на разных за-

водах этот процент понимают по-разному — или как содержание Na_2O в стекле, поступающего с сульфатом, или как процент (доля) от общего содержания Na_2O в стекле. Но при этом задают в рецепте стекла еще и содержание SO_3 . И обычно не учитывается, что это дублирует информацию, так как при определении процента ввода щелочей через сульфат содержание SO_3 , вычисленное такими расчетами, определяет количество сульфата (это дает дополнительное уравнение для сульфата и отделяет его от соды). И наоборот, задание процента ввода щелочей через сульфат однозначно определяет содержание SO_3 , которое будет получено в стекле.

Редко удается выяснить у специалистов, выполняющих расчет рецепта, почему в составе компонентов содержание Fe_2O_3 и Al_2O_3 задается отдельно, а в стекле задается объединенный процент содержания R_2O_3 (полуторных оксидов). Это делается на заводах, на которых не используется оксид железа или крокус. Если в рецепте стекла не объединить оксиды, то количество уравнений оказывается меньше количества неизвестных и система не будет иметь точного решения. Но поскольку каждый из оксидов обуславливает различные свойства стекла, целесообразно вычисления проводить только по Al_2O_3 (т. е. в рецепте стекла задавать Al_2O_3 , а не R_2O_3), а Fe_2O_3 будет определяться по фактическому его содержанию в компонентах. Аналогично в тех случаях, когда карбонаты вводятся в стекло только доломитом (нет ни мела, ни известняка) и в рецепте стекла указывается RO , объединяющий CaO и MgO , целесообразно карбонаты вычислять только по CaO (т. е. в рецепте стекла задавать CaO , а не RO), а MgO будет определяться его содержанием в доломите.

Учет процента уноса (иногда процента аспирации) осложняется тем, что различные лаборатории понимают и определяют данный процент по-разному. Некоторые считают, что это потери только при транспортировании материалов и шихты от дозаторов до загрузчиков печи. Другие учитывают улетучивание в печи. Нормы на эти величины расплывчатые, и их значения чаще всего определяют из опыта работы.

Количество подаваемой при смешивании шихты воды обычно корректируют несколько раз в течение смены по данным текущего лабораторного анализа влажности шихты, а при расчете рецепта добавку воды не определяют. Однако на некоторых заводах такие вычисления все же проводятся. Это объясняется тем, что влажность подаваемой в печь шихты обусловлена не только влажностью входящих в нее компонентов,

но и потерями влаги при транспортировании и хранении шихты, а также влажностью добавляемого стеклобоя, которая может изменяться (особенно у привозного стеклобоя) в различных партиях и даже от погоды. Но следует отметить, что практически везде при попытках вычисления количества воды, требуемого для обеспечения определенной влажности шихты, получается, что вычисленного количества воды мало. Возможно, это связано с взаимодействием между водой и компонентами шихты (в частности, с содой).

Из предыдущего вытекает и расчет количества добавляемого стеклобоя, которое обычно задается в процентах от смеси шихты и боя. Однако при этом возможны разночтения. Чаще всего соотношение шихта : бой задается в виде соотношения массы шихты без добавления воды, но с учетом влажности материалов, и массы стеклобоя с учетом его влажности. Это удобно для вычисления количества стеклобоя, которое должно отвешиваться с помощью дискретного дозатора. При дозировании непрерывным пропорциональным дозатором [5] содержание стеклобоя необходимо определять в пропорции к массе шихты с учетом добавленной воды, так как именно эта шихта взвешивается при прохождении через весовые датчики конвейера. Существуют также заводы, которые задают соотношение шихта : бой по количеству сваренной из них стекло-массы. При этом для определения количества стеклобоя (при дозировании дискретным дозатором) или процента (при дозировании непрерывным пропорциональным дозатором) необходимо принимать во внимание кроме влажности еще и процент угара шихты.

Некоторые заводы, использующие большое количество привозного стеклобоя, ставят дополнительную задачу учета оксидного состава стеклобоя при расчете рецепта шихты. Но этот подход вызывает большие сомнения, поскольку получить усредненную оценку состава стекла привозного стеклобоя с приемлемой точностью сложно.

Расчет угара также проводится неодинаково. На большинстве предприятий угар рассчитывают по сухой шихте без учета уноса, но существуют заводы, для которых важен угар с учетом уноса, а на некоторых заводах в угаре шихты принимается во внимание и влажность, причем не только влажность компонентов, но и добавленная вода.

При ручном расчете эти особенности обычно остаются незамеченными, так как входят в привычку и считаются “незыблемыми”. Однако при разработке программ автоматического расчета рецепта их необходимо учитывать, поскольку иначе внедрение программы на заводе вызовет серьезные осложнения.

Чаще всего программы автоматического расчета рецепта шихты разрабатываются на базе опыта одного завода, и в них учитываются особенности только этого завода. Большинство программ были написаны на базе Microsoft Excel и не обладали необходимой гибкостью, так как при введении новых компонентов или перехо-

де на новые составы стекла от пользователя требуется хорошее знание этого приложения.

Методы расчета, использованные в программе автоматического расчета рецепта шихты ЗАО “Стромизмеритель”, определены из постановки задачи. Для решения системы линейных уравнений в математике применяются метод исключения переменных (метод Гаусса) и итерационный метод Гаусса – Зейделя [6], дающих точное решение для систем, в которых количество неизвестных равно количеству линейно-независимых уравнений. Если это условие не выполняется, то результат зависит от того, какая величина больше.

Если число компонентов в рецепте шихты больше числа оксидов, остающихся в расчете после предварительной обработки (которая включает в себя сведение оксидов материалов, которых нет среди оксидов в рецепте, к оксидам в рецепте и учет формул предварительного вычисления), то требуемое количество по одному или нескольким компонентам не может быть вычислено (количество решений системы уравнений бесконечно), и в постановке задачи необходимо добавить оксиды в рецепт или исключить из него лишние материалы.

При несоответствии числа материалов и числа оксидов предлагаются различные методы получения приближенных решений (метод наименьших квадратов, решение V-задачи линейного программирования и др.) [4, 6]. Эти методы оптимизируют суммарные отклонения по всем оксидам. Для специалистов-практиков более понятен и приемлем результат, получаемый по методу Гаусса – Зейделя. В этом случае при ручных расчетах ситуация несоответствия числа материалов и числа оксидов разрешается автоматически. Если больше число материалов, то это означает, что несколько материалов должны быть рассчитаны по одному оксиду (как, например, сульфат и сода по Na_2O). В этом случае задается дополнительное условие (процент введения щелочей через сульфат) и один из материалов исключается из системы уравнений на предварительном этапе. Если больше число оксидов, то часть оксидов просто не участвует в вычислениях, так как каждый материал вычисляется по определенному оксиду. Для оксидов, не использованных в вычислениях (например, Fe_2O_3 и SO_3), после определения количества компонентов на 100 кг стекла вычисляется процент их содержания в стекле.

В рассматриваемой программе учитывается этот опыт. Если число компонентов, участвующих в системе уравнений, больше числа оксидов, то выдается сообщение “Материал ... неразрешим” и для него устанавливается количество, равное нулю. Если больше число оксидов, то по неиспользуемым оксидам программа дает ненулевую ошибку в результате. По числу оксидов с ненулевой ошибкой можно вычислить, на сколько число оксидов в рецепте больше числа материалов. С ненулевой ошибкой получают те оксиды, для которых массовое содержание в рецепте мало, что определяется алгоритмом.

Для решения задачи в программе применен метод Гаусса, как более приемлемый для программирования, быстрый в работе и дающий лучшую точность.

Ручной расчет рецепта шихты, выполняемый лабораториями на калькуляторе, обычно дает приемлемую точность. Но в некоторых случаях возникают проблемы, приводящие к значительным ошибкам в точности рецепта. Если вычисления на калькуляторе проводились с учетом только двух цифр после запятой, то ошибка достигает 0,5 %. А если в методике не было указано на необходимость хотя бы трехкратного повторения вычислений, ошибка расчета достигает 1 %.

На большинстве заводов при ручных вычислениях учитываются четыре цифры после запятой и проводятся три итерации (повтор вычислений) по методу Гаусса – Зейделя. При этом точность результата по отклонению содержания оксидов от заданного в рецепте не превышает 0,2 %. Моделирование на компьютере расчетов по методу Гаусса – Зейделя показало, что после трех итераций точность составляет порядка 0,1 %. Для получения точности лучше 0,0001 % число итераций должно быть не менее восьми.

Указанные ошибки в ручных вычислениях приводили к невозможности правильной оценки качества дозирования и, соответственно, к проблемам при сдаче дозировочно-смесительного участка в эксплуатацию. В связи с этим в программу автоматического расчета рецепта шихты был добавлен модуль обратного расчета для определения содержания оксидов в стекле по количеству компонентов на 100 кг стекла. Это позволяет оценить точность результатов расчета, выполненного вручную и автоматически. Такая оценка дает возможность убедиться, что даже при довольно значительных различиях в результатах ручного и автоматического методов (иногда по компонентам достигают нескольких килограммов) ошибки по составу стекла не превышают 0,1 – 0,2 % по всем оксидам. Это позволяет сделать вывод об устойчивости задачи к сбалансированным отклонениям в задании на дозирование, связанным с погрешностями в расчетах.

Программа автоматического расчета рецепта шихты ЗАО “Стромизмеритель” — в ней учитываются все приведенные выше особенности и обеспечивается универсальность подхода к расчету рецепта. Но универсальность имеет и другую сторону, что вызывает некоторые трудности в ее использовании. Для создания нового рецепта, в случаях замены сырьевых материалов или изменения содержания оксидов в их составах, других особенностей, влияющих на вычисления, программа имеет модуль настройки. Но подготовительные настройки выполняются нечасто.

Если настройка выполнена, то на экране дисплея в окне задания исходных данных пользователь видит привычные для ручных расчетов:

таблицу задания массового содержания оксидов в компонентах, выраженного в процентах, с дополнительными столбцами для указания цены за килограмм,

а также процента уноса и влажности каждого компонента;

таблицу заданного содержания оксидов в стекле, в процентах;

поля ввода требуемой влажности шихты и величины замеса (плавки);

дополнительные поля для ввода щелочей через сульфат или добавления стеклобоя (в процентах), если они заданы при настройке рецепта.

Универсальность программы позволяет проводить расчет заданной величины замеса (шихта для печей непрерывного действия) или величины плавки (шихта для печей периодического действия, например, в производстве электроплавленных огнеупоров).

Следует отметить, что в таблице ввода компонентов с указанием содержащихся в них оксидов могут быть установлены оксиды, не приведенные в таблице состава стекла. При этом, если данные оксиды в настройке связаны с оксидами, указанными в стекле, пересчет производится автоматически, в соответствии с коэффициентом, заданным в настройке. Например, если в таблице компонентов указаны Na_2CO_3 и Na_2SO_4 , а в таблице рецепта — только Na_2O , но при этом в настройке указано, что коэффициент перевода Na_2CO_3 в Na_2O равен 0,5848, а коэффициент перевода Na_2SO_4 в Na_2O составляет 0,4363, то перед началом вычислений процент Na_2CO_3 в материале будет умножен на 0,5848, Na_2SO_4 — на 0,4363, просуммирован и добавлен к проценту Na_2O в материале. Эта величина будет использована в расчетах.

После заполнения таблиц исходных данных нажатие на кнопку “Расчет рецепта” вызывает вычисления и открытие на экране дисплея окна результатов расчета. В этом окне расположены три таблицы.

Одна из них привычна для химиков и содержит: процент каждого оксида, вносимого в 100 кг стекло-массы каждым компонентом шихты; количество материала на 100 кг стекло-массы без учета и с учетом уноса; количество материала на 100 кг шихты и на замес без учета и с учетом влажности. В итоговой строке указывается количество каждого оксида на 100 кг стекла суммарно по всем компонентам. Следует отметить, что оксиды в этой таблице берутся из таблицы ввода процентного содержания материалов, т. е. если в материалах содержание Fe_2O_3 и Al_2O_3 задается отдельно, а в стекле представлен объединенный процент полуторных оксидов, то в этой таблице значения будут рассчитаны отдельно.

Если в задании компонента содержится оксид, которого нет в заданном составе стекла, и он не сводится ни к одному из таких оксидов, то в процессе вычислений будет выдано предупреждение, но в итоговой таблице для данного оксида будут приведены его количество, вносимое отдельными материалами, и суммарное содержание в составе стекла. Это позволяет ориентироваться по количеству тех оксидов в стекле, для которых не задано контрольное значение и по которым не проводятся вычисления.

Вторая таблица, отображенная на экране, предназначена для оценки отклонений результатов расчета от заданного состава стекла. В ней для каждого оксида, указанного в составе стекла, показываются: исходное задание, суммарное значение на 100 кг стекла и их разность, определяющая отклонение вычисленного значения от заданного. При этом если в материалах содержится Fe_2O_3 и Al_2O_3 задается отдельно, а в стекле дается объединенный процент полуторных оксидов R_2O_3 , то в таблице будут индцироваться значения для R_2O_3 . Если количество оксидов в задании рецепта стекла оказалось больше количества материалов и система не имеет точного решения, то таблица позволит оценить отклонения расчетного состава стекла от заданного.

В третьей таблице индцируются значения угара и предполагаемые результаты химических анализов шихты (теоретический состав) без учета уноса и влажности, с учетом только уноса и с учетом уноса и влажности.

Рассматриваемая программа позволяет получать распечатку исходных данных и результатов расчета, распечатку задания на дозирование, а также сохранять результаты в архиве для последующего просмотра.

Программа автоматического расчета рецепта шихты ЗАО "Стромизмеритель" была разработана с целью обеспечения компьютеризации химических лабораторий заводов и первоначально поставлялась совместно с автоматизированными системами управления дозировочно-смесительными цехами. Основой для разработки послужили требования центральной заводской лаборатории ОАО "Кавминстекло".

Программа внедрена более чем на 20 стекольных заводах, где одобрена химическими лабораториями. Программа постоянно совершенствуется в соответствии с новыми требованиями, высказываемыми на заводах. Возможности настройки обеспечили расчет рецепта шихты для производства электроплавляемых огнеупоров (программа успешно применяется на Щербинском и Домодедовском заводах электроплавляемых огнеупоров). Внедрение программы в экспериментальной лаборатории Лысьвенского металлургического завода "ЛМЗ-Стема" показала возможность автоматизации расчета рецепта шихты для производства фритт.

Дальнейшим развитием программы должна стать автоматизация рабочего места химика с автоматической передачей задания на дозирование в компьютер АСУ ТП дозировочно-смесительного участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будов В. М., Саркисов П. Д. Производство строительного и технического стекла. — М.: Высш. шк., 1985. — 213 с.
2. Панасюк В. И. Химический анализ стекла и сырьевых материалов. — М.: Стройиздат, 1971. — 278 с.
3. Юдин Н. А., Запорожский А. И. Технология стеклянной тары и сортовой посуды. — М.: Высш. шк., 1989. — 231 с.
4. Анализ методов расчета рецепта стекольной шихты / Е. П. Марков, А. Г. Чесноков, В. Е. Маневич, А. И. Овчаренко // Стекло и керамика. — 1980. — № 12. — С. 3–4.
5. Ефременков В. В., Субботин К. Ю., Хаймович М. М. Система дозированной подачи шихты и боя в стекловаренную печь // Стекло и керамика. — 2001. — № 6. — С. 3–4.
6. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. — М.: Наука, 1966.

«В результате выполнения в ЗАО "Стромизмеритель" и ОАО "Институт стекла" комплекса научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ создано принципиально новое поколение оборудования, технологий и систем автоматизации для производства, хранения и транспортирования стекольной шихты и различных многокомпонентных смесей. Для многих дозировочно-смесительных процессов впервые созданы теоретические основы на базе математического и физического моделирования.

Итоговый результат всей работы — это создание и широкомасштабное внедрение конкурентоспособного и многофункционального комплекса импортозаменяющих технологий, оборудования, технических и программных средств АСУ ТП производства шихты».

**Академик П. Д. Саркисов,
ректор РХТУ им. Д. И. Менделеева**