

Теоретическая часть

Добрый день, уважаемые коллеги! Позвольте представиться: Филин Сергей, ООО НПЦ «Стекло-Газ», начальник отдела автоматизации. Тема моего доклада: **Дополнительный электроподогрев стекломассы.**

Интенсификация технологических процессов и повышение качества продукции является основным направлением в развитии современного стекольного производства. Одним из основных инструментариев интенсификации процесса стекловарения в стекловаренной печи является **дополнительный электроподогрев стекломассы.**

КПД стекловаренных печей, отопление которых осуществляется за счет сжигания газа низок, достигает порядка 35%. Большая часть тепла уходит вместе с отходящими газами в окружающую атмосферу. Происходит загрязнение окружающей среды продуктами сгорания топлива, разложения и улетучивания компонентов стекольной шихты. И именно электроподогрев позволяет вводить дополнительную мощность непосредственно в расплав стекла. КПД превращения электрической энергии в тепловую составляет порядка 85-90 %, потери происходят только на холодильниках-электрододержателях, наружной (непогруженной части молибденового электрода), кабельных линиях и трансформаторе.

Перспективы применения электроэнергии в стекловарении обуславливаются прежде всего тем, расплав стекла является электролитом, то есть проводником электрического тока. Необходимое тепло, согласно закону Джоуля-Ленца, выделяется при непосредственном пропускании через него переменного электрического тока. Постоянный ток недопустим, т. к. при его протекании начинается процесс электролиза стекломассы. Расплав стекла обладает ионной проводимостью, причем переносят электрические заряды в основном ионы щелочных металлов. Уже при 300 С электрический ток переносится ионами натрия (в большей степени) и калия, которые входят в состав стекольной шихты.

При проектировании электроподогрева необходимо исходить из количества и состава стекломассы, которую нужно получить дополнительно. В каждом случае исходят из предпосылок, что для варки 1,0 тонны стекломассы в сутки требуется дополнительный расход электрической мощности печи. Эта мощность лежит в диапазоне от 25 кВт для бесцветного тарного стекла до 35 кВт для боросиликатного. При расчете мощности источника энергии для электроподогрева, можно исходить из

теоретических потребностей в энергии, необходимой для варки стекла рассматриваемого типа. Это объясняется тем, что при использовании электроподогрева практически не увеличиваются тепловые потери от печи. Таким образом если теоретически для варки 1 тн тарного бесцветного стекла необходимо 25 кВт тепловой энергии, то, соответственно, электрической надо заложить с учетом КПД — 29 кВт.

Рассмотрим далее основные схемы размещения электродов в печи: вертикальную и горизонтальную установку. Графики распределения кривых энергий и температур беру из справочника по электротоварке стекла чешского автора Ярослава Станека. Исследования проводились с модельной жидкостью при физическом моделировании.

Путем соответствующего размещения электродов можно наилучшим способом оказывать влияние на выделение энергии, распределение температур, а также на потоки стекломассы в бассейне.

Потоки стекломассы, возникающие между вертикальными электродами, образуют три замкнутых цикла: один между электродами, два между электродами и стеной. Стекломасса поднимается вдоль вертикальных электродов, затем поворачивается и движется горизонтально вдоль уровня бассейна и симметрично относительно осей электродов к наиболее холодным участкам (см рис. поперечное распределение температур). Затем стекломасса опускается к наиболее горячим участкам печи, идет вниз (см рис. вертикальное распределение температур) с последующим возвращением к электродам. Во внешних циклах стекломасса также поднимается вверх вдоль электродов, затем в верхней части поворачивается в горизонтальном направлении, движется вдоль уровня бассейна к стенке и затем вдоль нее опускается ко дну. В донной части стекломасса движется вдоль основания электрода, затем поворачивается и вдоль электрода поднимается вверх. Вертикальные электроды, расположенные поперек бассейна (барьерный ДЭП), образуют вертикальный тепловой барьер, который при осуществлении варки в горизонтальном направлении возвращает стекломассу в варочный цикл к загрузочным карманам.

Потоки стекломассы при использовании горизонтальных электродов также образуют замкнутые циклы: внутренний — между вершинами электродов и внешний — над электродами и около стены.

Обзор ДЭП по функционалу

Все применяемые системы электроподогрева отличаются количеством электродов и источников питания-трансформаторов. Большое значение для нормальной работы подогрева имеет схема соединений источников питания и их фазировка. Чаще всего электроды объединяются в силовые группы по два в случае однофазного питания и по 3, 4, 7, 8, 9 электродов в случае трехфазного питания. Каждая силовая группа предназначается для выполнения конкретной технологической задачи. Наиболее распространенными из них являются следующие:

1. Электроподогрев стекломассы в квельпункте стекловаренной печи.

Электроподогрев перед барьером (или барьерный) организуется посредством установки одного или (реже) двух рядов электродов поперек печи. Само расположение электродов указывает на то, что электроподогрев в этой зоне предназначен для усиления сыпчного цикла печи. Особенностью электродов, установленных вертикально в дне печи, является образование мощных восходящих потоков вокруг каждого из них (это мы разбирали в первой части доклада). Это связано с сильным искривлением электрического поля вокруг электрода. Поскольку плотность силовых линий у электродов максимальная, то и плотность выделяемой энергии, а следовательно, и температура расплава максимальные. В межэлектродном пространстве тоже имеют место восходящие потоки, но они менее интенсивные, чем у непосредственно электродов. Благодаря такому воздействию электроподогрева, температура и интенсивность конвективного вала стекломассы в квельпункте значительно возрастают. Расплав, движущийся от квельпункта в сторону засыпки, приобретает дополнительную температуру, за счет чего повышается скорость провара шихты, а также ускоряется осветление свежесваренной стекломассы. Интенсификация сыпчного цикла приводит к повышению температуры придонных слоев всего варочного бассейна, что, несомненно, улучшает качество вырабатываемой стекломассы.

2. Электроподогрев расплава в зоне варки.

Как известно, придонные слои варочного бассейна под шихтой представляют собой насыщенный растворенными газами холодный расплав, который при малейшем

изменении общего технологического режима способен поступать на выработку, загрязняя стекломассу свиллями и мошкой.

Для исключения этих неблагоприятных условий применяется установка электродов в варочной части. Их можно устанавливать как в боковых стенах, так и в дне печи *на следующем слайде*. В результате исследований на физических моделях, как у нас в стране, так и за рубежом, получены зависимости интенсивностей конвективных потоков, создаваемых вертикальными электродами от их рабочей длины. Установлено, что интенсивность потоков возрастает с увеличением рабочей длины электрода до величины, равной половине глубины бассейна в месте установки электродов. Дальнейшее увеличение рабочей длины электрода ведет к снижению интенсивности потоков. Это объясняется следующим образом. При увеличении рабочей длины электрода от нуля до половины глубины бассейна, увеличение интенсивности восходящих потоков происходит за счет большей разности температуры между расплавом в приэлектродной зоне и выше ее. Если мы выдвигаем электрод выше чем половина бассейна, то основной ток электрода сосредотачивается в его верхней части и нижние слои расплава в этом случае в меньшей степени вовлекаются в конвективный поток электрода и перемешивающий эффект уменьшается. Выше половины глубины расплава его температура значительно больше, чем в придонных слоях. Таким образом, как и в случае с боковыми электродами основная энергия выделяется непосредственно под шихтой. Но это возможно на печах, имеющих глубину расплава до 1200 мм так как электроды можно выдвигать на рабочую длину не более 800 мм. Повышение температуры под шихтой достигается за счет восходящих потоков из глубины расплава.

3. Электроподогрев в заглубленной предпроточной зоне имеет небольшую мощность, т.к. он предназначен для выравнивания температуры расплава и улучшения его однородности. Электроды могут устанавливаться как в дне печи, так и в торцевой стене.

4. Электроподогрев протока необходим в процессе наварки печи стеклобоем или при низких съемах стекломассы с печи (когда возможна заморозка стекла в протоке), например, при замене чаши в питателе стекломассы. Т.е. Это механизм применяется эпизодически в редких случаях.

Для снятия электрического потенциала с зеркала стекломассы в выработочном канале печи устанавливают дополнительный электрод, подключенный к цеховому контуру заземления.

Практическая часть

Рассмотрим систему дополнительного электроподогрева, состоящую из шести электродов, установленных в дне варочного бассейна *Это можно увидеть на следующем слайде*. Будем рассматривать систему ДЭП стекломассы на примере запущенного на одном из стекольных заводов в этом году. Номинальная вводимая электрическая мощность в данном проекте составляла 400 кВт.

Материал электродов – молибден (процентное содержание не менее 99,95%), диаметр, как правило, составляет 48 мм (регламентируется плотностью электрического тока), длина порядка 2,5 м для вертикальной установки в дне печи и 2 м для горизонтальной установки. Для боковых электродов плотность не должна превышать 1А/см², для вертикальных — 3А/см². Длина погружения электрода в расплав варьируется в пределах от 500 до 800 мм.

Молибденовый электрод устанавливается в специальном водоохлаждаемом холодильнике, который предохраняет молибден от окисления на воздухе при высоких температурах (выше 600 С) Т.е. внутри печи и огнеупорного бдока электрод защищен расплавом стекла, его обволакивающим, а внутри холодильника низкой температурой. Холодильник представляет собой стальную болванку, выполненную из жаростойкой стали с расположенными внутри нее каналами, по которым движется вода, объем воды в болванке обычно не превышает 150 мл, таким образом мы получаем высокую скорость движения воды. Как показал многолетний опыт именно такая конструкция холодильника наиболее живучая, иногда прощает некоторые ошибки при их эксплуатации. В конструкции холодильника предусмотрена установка термодпары, спай которой находится в головке холодильника, в 15 мм от торца. Это позволяет нам контролировать и регулировать степень охлаждения головок холодильников, помогает при продвижениях электродов в стекломассу, когда нам надо разогреть головку холодильника до 750 — 800 С.

Холодильник-электрододержатель, устанавливается в свою очередь, в специальном блоке, выполненном из электроплавленного огнеупора повышенного качества и выступающем на 100 мм из дна печи. *Это можно увидеть на слайде:*

представлен разрез установки электрода и электродного блока. Более того он выполняется ступенчатым, для дополнительной защиты металла холодильника от высоких температур стекломассы. Если посмотреть в разрезе мы видим две ступени: первая диаметром 117 мм для размещения в ней непосредственно рубашки холодильника, вторая 51 мм — для прохода молибденового электрода в расплав стекла. Это делается для исключения быстрого разрушения дна в районе установки электрода вследствие повышенной температуры и интенсивных восходящих потоков стекломассы.

Нижний конец холодильника крепится к металлоконструкциям печи через изоляторы. *Это можно увидеть на следующем слайде.* Также свое крепление к металлоконструкциям имеет и электрод. На нижнюю его часть крепится медный токоподвод, который в свою очередь соединяется с источником питания кабельными сетями или шинопроводами. Для снижения механических нагрузок на электрод от силовых кабелей в своих проектах мы используем токопроводящую медную пластину, установленную на электроизоляторах на конструкции печи. Электрод с пластиной соединяем при помощи гибкой медной шины.

В качестве источников питания применяются электропечные трансформаторы – однофазные или трехфазные с первичным напряжением 380 В и величиной вторичного напряжения от 80 до 200 В. В ряде случаев для четного количества электродов (кратное 4-м) применяют трехфазный трансформатор по схеме Скотта с двумя вторичными обмотками. Данная конструкция позволяет симметрично нагрузить трехфазную сеть предприятия.

В нашем случае мы применили три однофазных сухих трансформатора, расположенных в защитном металлическом кожухе. *Это можно увидеть на следующем слайде* Особенностью электропечных трансформаторов является жесткая выходная характеристика по напряжению, под нагрузкой падение напряжения минимально. Конструкцией электропечных трансформаторов предусмотрены несколько первичных и вторичных обмоток с большим числом припаянных выводов, конкретно в этой модели: пять отпаек на первичной обмотки и две на вторичной. Это необходимо для подбора нужного электрического напряжения системы подогрева, начальной настройке. Первичные обмотки подключаются к трехфазной сети, фазировка электродов выбирается в соответствии с расчетом, чтобы выравнять токи в

группах и не перекосить трехфазную питающую сеть. Плавное регулирование вводимой электрической мощности осуществлялось при помощи тиристорных регуляторов напряжения *на следующем слайде*, включенных в первичную обмотку трансформаторов, фазоимпульсный режим работы тиристоров. Для уменьшения реактивной составляющей потребляемой из сети мощности за счет возможности ступенчатого изменения напряжения трансформаторов подбирается режим открытия тиристоров не менее 80%.

Режим работы этого ДЭП стекломассы представлен на *на следующем слайде*. По заданию технологов необходимо было ввести 300 кВа электрической мощности, равномерно распределив нагрузку на электродах. На этом режиме получены были значения токов порядка 900 А, напряжений — 110 В.

ДЭП стекломассы на показанных ранее слайдах управляла система автоматического управления на базе программируемого контроллера. Это позволило нам:

- реализовать алгоритмы стабилизации вводимой электрической мощности
- осуществить контроль токов и напряжений на электродах
- температур головок холодильников и охлаждающей воды
- величин расхода охлаждающей воды
- управление и архивирование всего технологического процесса и аварийных ситуаций

О программе

В нашей организации имеется программа расчета параметров системы как ДЭП стекломассы, так и электропечей. Позволяет рассчитывать токи и напряжения в группах электродах, подключенных к разным трансформаторам. Количество электродов, участвующих в расчетах может достигать до 20 шт. В качестве исходных данных задается химсостав стекла, габариты печи и электродов, пространственное положение электродов, желаемые вводимые электрические мощности, количество трансформаторов, состав электродов, подключенных к каждому трансформатору, фазировки питания. На выходе мы получаем ожидаемые значения токов и напряжения на электродах для выбора соответствующего трансформатора. Учитывается взаимное влияние различных групп электродов, подключенных к разным трансформаторам, друг на друга. Для понимания: 100 кВа можно ввести как $100 \text{ В} * 1000 \text{ А}$, так и 200

В*500А в зависимости от состава стекла. Трансформаторы, соответственно, для этих случаев будут различны.

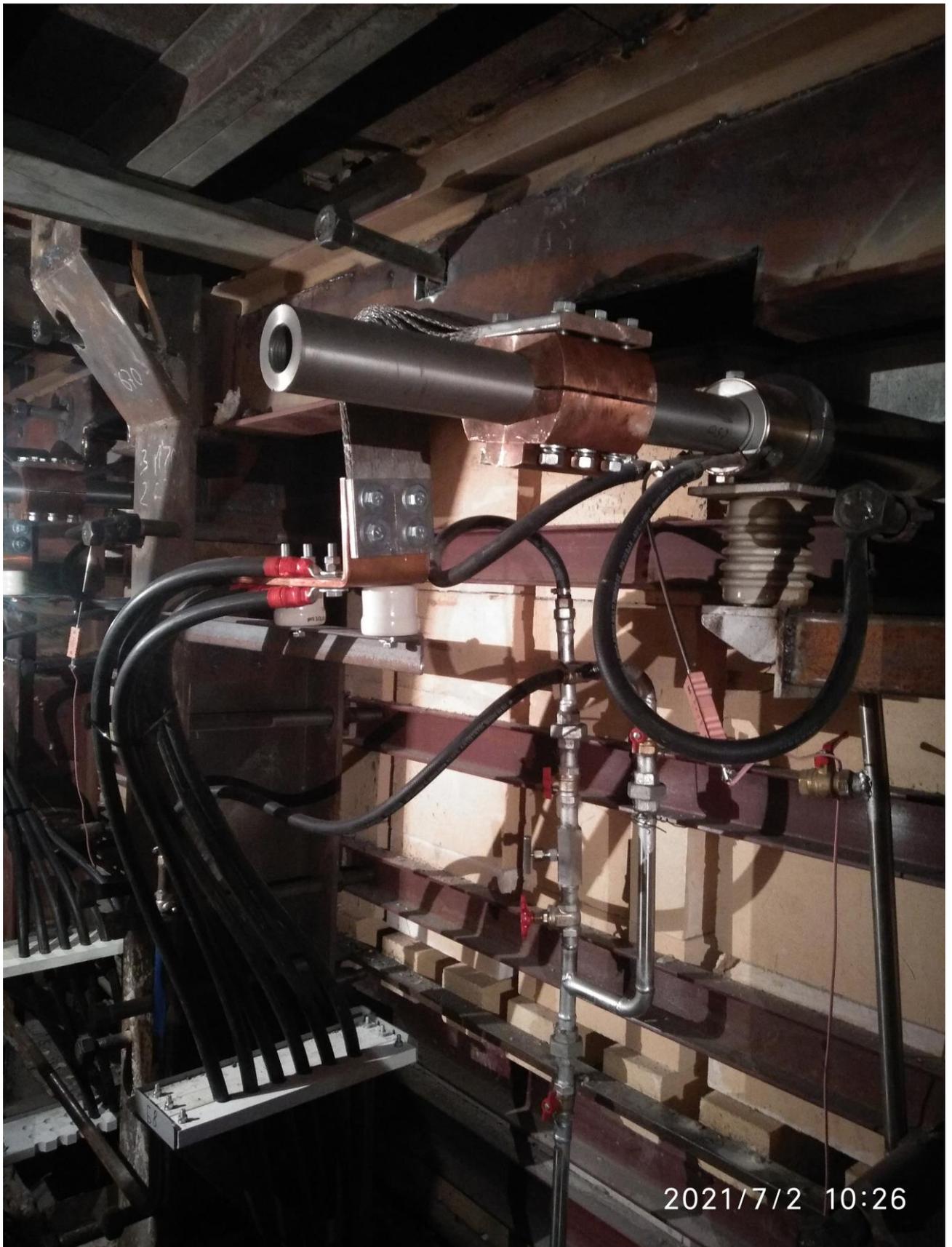
Заключение

В заключении хочу сказать, что сотрудники моей организации, ООО НПЦ «Стекло-Газ» имеют 30-летний опыт проектирования, изготовления и внедрения на предприятиях стекольной промышленности систем электроподогрева стекломассы и электропечей. За эти годы был накоплен богатый опыт (запущены десятки электропечей для различных видов стекол, десятки систем электроподогрева стекломассы), приобретена достаточная компетенция для внедрения современных систем в производство. Только в течение последних 3-х лет были изготовлены и запущены в эксплуатацию 5 систем электроподогрева стекломассы, несколько договоров сейчас находятся в стадии заключения. Поставка происходит комплексная:

- проектно-конструкторская документация,
- молибденовые электроды в комплекте с холодильниками-электрододержателями, трансформаторы,
- силовые щиты с тиристорными регуляторами мощности,
- система автоматического управления, реализованная на программируемом контроллере,
- система обратного водоснабжения в составе:
 - станция умягчения
 - узел водораспределительный (напорный и сборный коллектор, вы можете увидеть в коридоре)
 - насосная группа;
 - сухие градирни,
 - обвязка холодильников (запорная и регулирующая арматура, высокотемпературные силиконовые шланги)

Спасибо за внимание! Если у кого возникли вопросы рад буду ответить индивидуально.

Боковая установка электродов.



Донная установка электрода.



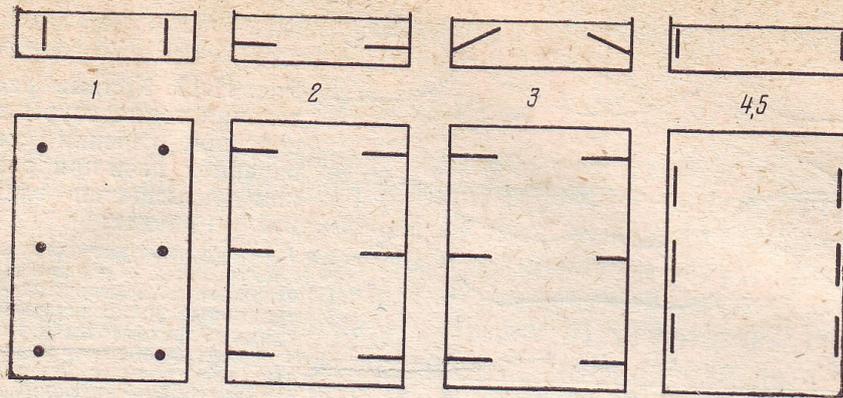


Рис. II.10. Схема размещения электродов в печи:
 1 — вертикальные стержневые электроды; 2 — горизонтальные стержневые электроды; 3 — наклонные стержневые электроды; 4, 5 — пластинчатые электроды

Рис. II.11. Кривые выделяемой энергии в поперечном сечении стекловаренной печи при различном размещении электродов:

1 — вертикальные стержневые электроды; 2 — горизонтальные стержневые электроды; 3 — наклонные стержневые электроды; 4 — вертикальные пластинчатые электроды с трехфазным питанием; 5 — вертикальные пластинчатые электроды с однофазным питанием

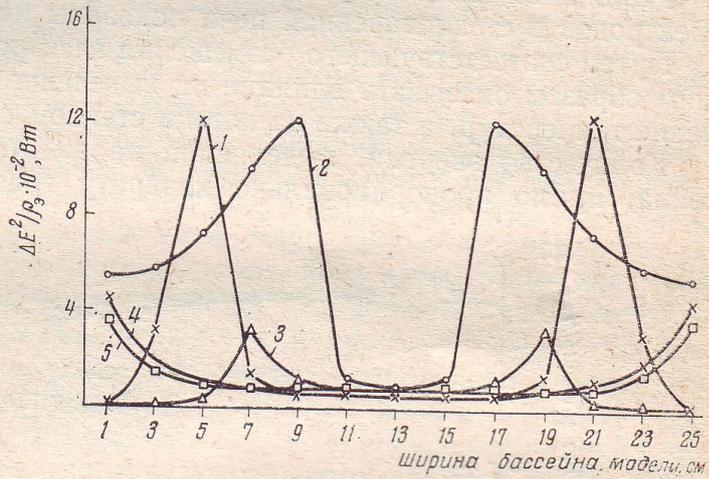
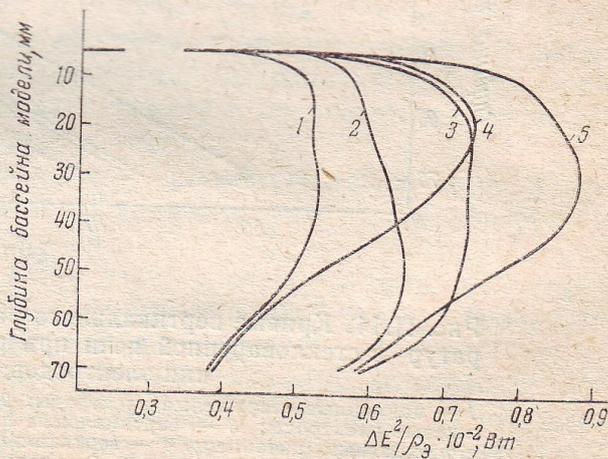


Рис. II.12. Кривые вертикального распределения выделяемой энергии в стекловаренной печи при различном размещении электродов:

1 — вертикальные пластинчатые электроды с трехфазным питанием; 2 — вертикальные стержневые электроды; 3 — горизонтальные стержневые электроды; 4 — наклонные стержневые электроды; 5 — вертикальные пластинчатые электроды с однофазным питанием



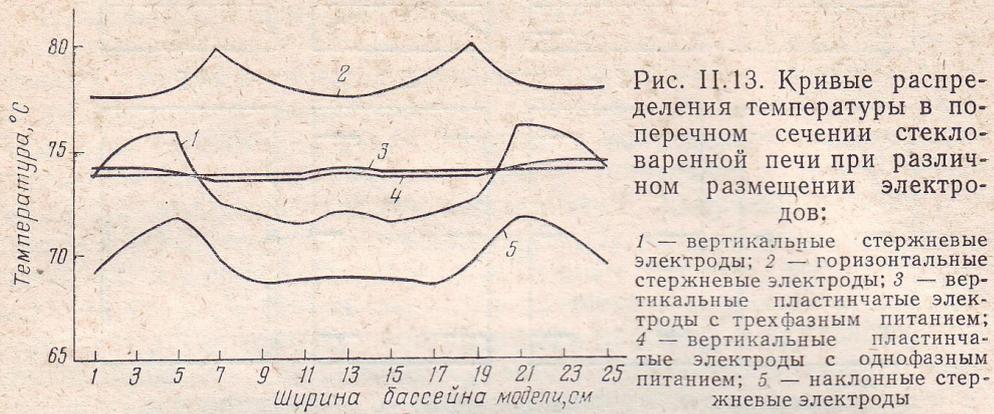


Рис. II.13. Кривые распределения температуры в поперечном сечении стекловаренной печи при различном размещении электродов:

1 — вертикальные стержневые электроды; 2 — горизонтальные стержневые электроды; 3 — вертикальные пластинчатые электроды с трехфазным питанием; 4 — вертикальные пластинчатые электроды с однофазным питанием; 5 — наклонные стержневые электроды

положении. Пластинчатые электроды размещают вдоль стен бассейна.

Различные способы размещения стержневых и пластинчатых электродов в стекловаренной печи показаны на рис. II.10.

Путем соответствующего размещения электродов можно наилучшим образом оказывать влияние на выделение энергии, распределение температур, а также на потоки стекломассы в бассейне [49].

Количество энергии, выделяемой на отдельных участках бассейна, прямо пропорционально квадрату градиента напряжения

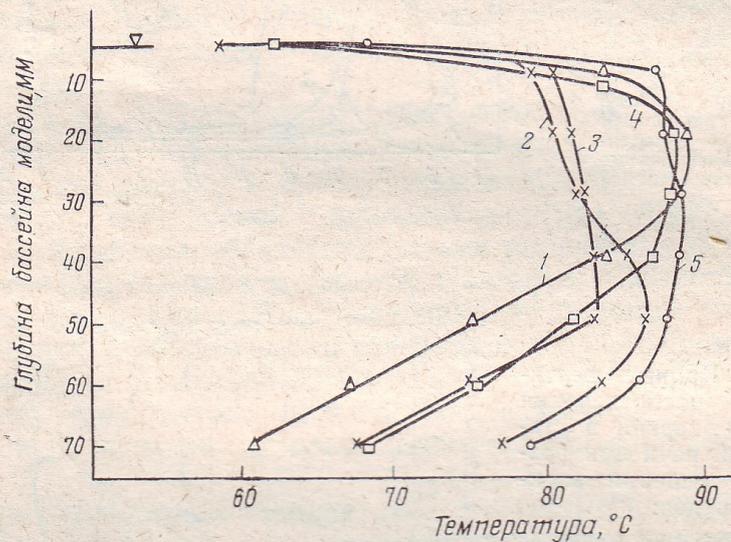


Рис. II.14. Кривые вертикального распределения температур в стекловаренной печи при различном размещении электродов:

1 — наклонные стержневые электроды; 2 — вертикальные стержневые электроды; 3 — вертикальные пластинчатые электроды с трехфазным питанием; 4 — вертикальные пластинчатые электроды с однофазным питанием; 5 — горизонтальные стержневые электроды