

*Складено алгоритм розрахунку температурних полів та конфігурації поперечного перерізу вогнетривкого бруса бокового огородження пламеневої ванної скловарної печі при умові руйнування під впливом агресивної дії розплаву скломаси. На базі розробленого алгоритму створено програмний комплекс який дозволяє отримати розподіл температури в вогнетривких та ізоляційних матеріалах огородження, конфігурацію вогнетриву в зоні розплаву та тривалість роботи вогнетривкого бруса в даному перерізі*

*Ключові слова: алгоритм, корозія вогнетривів, конфігурація вогнетривів, скловарна піч, температурне поле*

*Разработан алгоритм расчёта температурных полей и конфигурации поперечного сечения огнеупорного бруса бокового ограждения пламенной ванной стекловаренной печи при условии разрушения под воздействием агрессивного высокотемпературного расплава стекло­массы. На базе разработанного алгоритма создан программный комплекс, позволяющий получить распределение температуры в огнеупорных и теплоизоляционных материалах ограждения, конфигурацию огнеупора в зоне расплава и длительность работы огнеупорного бруса в данном сечении*

*Ключевые слова: алгоритм, коррозия огнеупоров, конфигурация огнеупоров, стекловаренная печь, температурное поле*

# АЛГОРИТМ РАСЧЁТА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА БОКОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ВАННОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

**Д. В. Бекназарян**  
Ассистент\*

E-mail: david\_beck@mail.ru

**В. М. Кошельник**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: david\_beck@mail.ru

**А. А. Ларин**

Кандидат технических наук, доцент\*\*

E-mail: alexeya.larin@gmail.com

\*Кафедра теплотехники и энергоэффективных технологий\*\*\*

\*\*Кафедра «Динамика и прочность машин»\*\*\*

\*\*\*Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

## 1. Введение

В работе рассматривается высокопроизводительная пламенная ванная стекловаренная печь непрерывного действия. Эксплуатация ванн печей характеризуется высоким уровнем температур расплава стекла и продуктов сгорания (1450–1550) и (1580–1600) °С [1, 2]. Под влиянием высокотемпературного и физико–химического воздействия расплава стекло­массы и агрессивной среды на огнеупорный материал стен происходит коррозионное разрушение кладки варочной зоны [3, 4], что влияет на длительность периода эксплуатации ограждения [5, 6]. Таким образом, исследование процессов коррозионного износа стен ванны представляет большой практически интерес. Закономерности утонения материала, а так же влияние на этот процесс эксплуатационных факторов и конструктивных решений позволит повысить надёжность эксплуатации печи, её долговечность.

Как известно, скорость коррозии определяется в первую очередь уровнем температуры стенки ванны в месте её контакта с расплавом стекло­массы

[7, 8], а так же свойствами огнеупорных материалов, используемых при сооружении ограждений печи [9, 10]. В этой связи основным вопросом в изучении протекающих процессов становится решение задачи об определении теплового состояния в стенке ванны. Аналитические подходы к реализации данной задачи существенно ограничены в силу достаточно сложной геометрии объекта, наличия неоднородных граничных условий, необходимости учёта теплофизических свойств различных материалов, используемых при сооружении бокового ограждения печи. Наиболее эффективным подходом в этом случае является конечно–элементное моделирование. Основным вопросом исследования является коррозия огнеупорного материала в зоне контакта огнеупорный брус–стекломасса, который приводит к утонению стенки варочного бассейна, что в свою очередь изменяет геометрию объекта, а следовательно и распределение температур. Таким образом, возникает замкнутая задача: распределение температуры определяет скорость коррозии, которая приводит к утонению стенки, а, следовательно, к изменению её теплового состояния. Существующие программные

комплексы конечно-элементного (КЭ) моделирования не имеют стандартных средств для решения комплексной задачи.

Исходя из вышесказанного, разработка алгоритма расчёта температурного поля в поперечном сечении бокового ограждения бассейна печи, вычисления скорости коррозии, а также построения конфигурации подверженного коррозии огнеупорного материала на границе контакта огнеупор-стекломасса, является актуальной научно-прикладной задачей, решению которой и посвящена данная работа.

**2. Постановка задачи в общем виде**

Рассматривается ванная стекловаренная печь, состоящая из рабочей камеры и воздухонагревателей. Варочный бассейн образован плоским подом, продольными и поперечными стенками, выложенными из огнеупорных блоков, охлаждаемых снаружи (рис. 1, а). Сверху бассейн ограничен сводом. Основные геометрические и эксплуатационные характеристики печи приведены в табл. 1. Фрагмент модели разбитой на конечные элементы представлен на рис. 1, б.

Из-за разрушения огнеупоров наименее долговечными элементами ванной печи являются продольные боковые ограждения, влёты горелок, огнеупорная кладка стен в районе протока [7, 11]. При этом интенсивное разрушение наблюдается на продольных стенах варочной зоны бассейна. Таким образом, в качестве объекта, который исследуется нами выбрано боковое ограждение печи, как наиболее аварийноопасный участок огнеупорной кладки.

Величина суточной коррозии рассчитывается по уравнению, приведенному в работе [12], мм:

$$\Delta = \sqrt{K_y \cdot \tau} = \sqrt{e^{\frac{A-B}{T}} \cdot \tau}, \tag{1}$$

где *A, B* – коэффициенты кинетических уравнений Аррениуса рассматриваемого огнеупорного материала; *T* – температура ограждения на границе огнеупор – стекломасса, К;  $\tau$  – время взаимодействия со стекломассой, сут.;

Задав и решив уравнение теплопроводности в двумерной постановке (2)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \tag{2}$$

где  $a, \frac{M^2}{c}$  – коэффициент температуропроводности;

$t_{\Pi} = f(x, y, \tau)$  – граничные условия на границе огнеупор стекломасса;  $-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_{\Pi} - t_p)$  – граничные условия

на границе огнеупорный брус (теплоизоляционный материал) –воздух, огнеупорный брус – пламенное пространство.

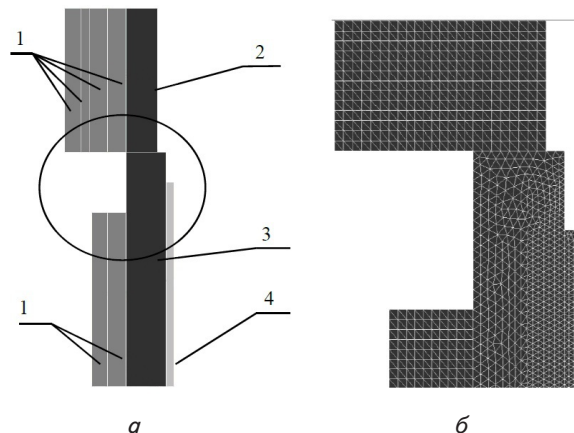


Рис.1. Фрагмент поперечного расчётного сечения бокового ограждения ванной в начале кампании печи: 1 – теплоизоляционные панели зоны пламенного пространства и варочной зоны; 2 – огнеупорный брус зоны пламенного пространства (бакор–33); 3 – огнеупорный брус варочной зоны (бакор–41); 4 – пристенный слой расплава стекломассы; а – конфигурация бокового ограждения в начале кампании печи; б – КЭ сетка на уровне зеркала стекломассы

Таблица 1

Исходные данные для моделирования длительности кампании печи

Геометрические параметры ограждения	Значения, мм	Условия теплообмена	Значения
высота	2550	температура продуктов сгорания, °С	1500
толщина	250	температура воздуха, °С	30
остаточная толщина огнеупорного бруса на линии зеркала стекломассы в момент останова печи	40	коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К):	147–200
		– по газовой стороне	
высота зоны обдува	200	– по воздушной стороне	30
		– естественная конвекция	
высота расположения соплового аппарата	1350	– принудительное охлаждение	200–300
		температура стекломассы:	
толщина охлажденного пристенного слоя расплава стекломассы	50	– на уровне зеркала, °С	1400
		– на уровне пода, °С	

### 3. Разработка алгоритма расчёта коррозионного износа бокового ограждения стекловаренной печи

При построении алгоритма расчёта температурного состояния за основу взята математическая модель [13], позволяющая учитывать разнородные граничные условия и изменения теплофизических свойств используемых материалов в зависимости от температуры [14]. Структурно алгоритм (рис. 2) состоит из ряда блоков, позволяющих реализовать математическую модель. В блоке 1 алгоритма (далее по тексту Б1) выполняется задание теплофизических свойств огнеупорных, теплоизоляционных материалов и стекломассы.

Заданными являются геометрические параметры модели (Б2). А именно: общая высота и толщина сечения огнеупорной стенки; глубина бассейна, заполненного расплавом; толщины охлаждённого слоя стекломассы, контактирующего с огнеупорным материалом; высота зоны обдува; число теплоизоляционных панелей по зоне расплава и рабочего (пламенного) пространства их высоты, толщины. Все геометрические величины задаются в параметрической форме, что позволяет легко трансформировать исходную геометрическую модель в соответствии с необходимыми размерами. В (Б3) осуществляется построение базовой части модели, которая включает неподвижные границы огнеупоров, не подверженные разрушению. Построение подвижной границы по глубине варочного бассейна и в зоне ячеистой коррозии, которая изменяет свою конфигурацию выполняется в (Б4). На каждой итерации расчёта, соответствующей одним суткам происходит перестроение геометрической модели за вычетом величины разрушенного огнеупорного материала в районе подвижной границы. Следует отметить, что продвижение коррозионных процессов происходит по нормали к границе контакта огнеупор–стекломасса. Если толщина огнеупора на данной итерации достигла заранее заданного минимального значения (Б5), то происходит сохранение температурного поля по сечению ограждения, координат точек подвижной границы, величин коррозии для каждой подвижной точки, шага по времени при котором толщина огнеупорного бруса достигла минимального значения и завершение работы программы (Б6). В противном случае происходит нанесение конечно-элементной сетки. При этом использованы треугольные плоские КЭ с тремя узлами и одной степенью свободы в каждом узле. Сетка имеет сгущение в области ожидаемой коррозии. Созданная программа позволяет варьировать густотой сетки в параметрической форме. Изначально, исходя из формы бокового ограждения, выбрано равномерное разбиение геометрической модели. При изменении конфигурации огнеупорного бруса под воздействием коррозионных процессов на криволинейную, автоматически выполняется произвольное разбиение границы с переходом на равномерное, вдали от прокорродировавшей границы. Начальные и краевые граничные условия выбор характера процесса передачи тепла (стационарный или нестационарный) задаются в (Б8). Далее выполняется определение теплового состояния ограждения, а именно поля температур бокового ограждения (Б9). Расчёт величины коррозии огнеупорного материала (Б10) основывается на полученных данных о распределении температур по толщине модели. При этом используется уравнение (1).

Сохранение полученных расчётным путём данных осуществляется в (Б11) Построение «новой» подвижной границы (Б12) выполняется на основе данных (Б10), путём перемещения подвижных точек на величину коррозии огнеупорного бруса, рассчитанной для конкретно взятой точки, по нормали к имеющейся границе вглубь огнеупорного бруса.

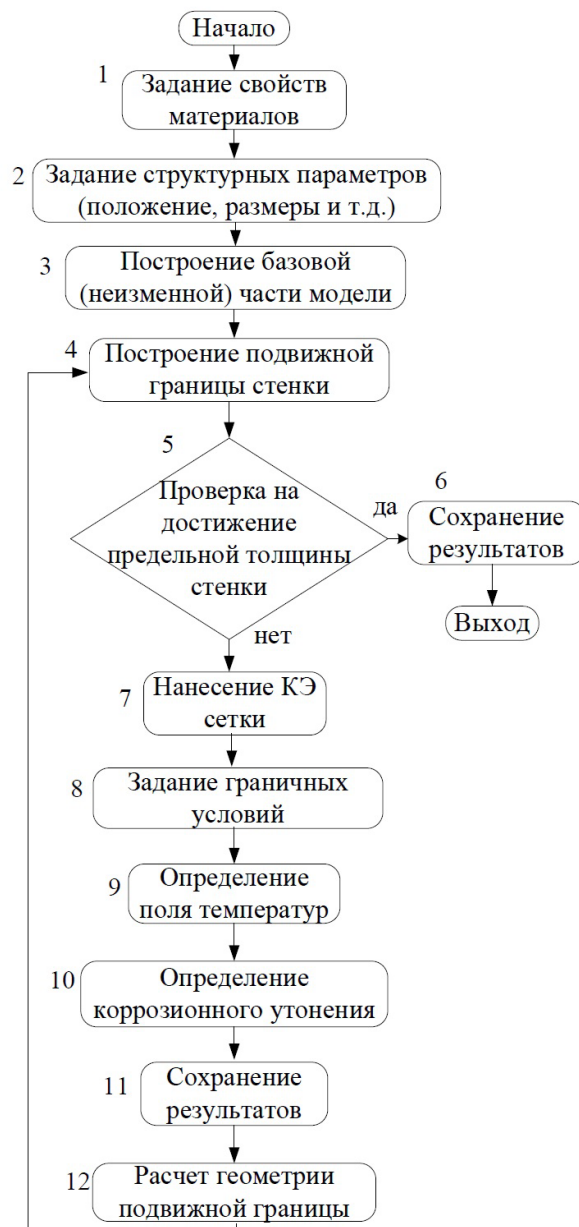


Рис. 2. Структура алгоритма расчёта температурного поля и срока работы стенового огнеупорного бруса продольного ограждения ванной стекловаренной печи

Наибольший практический интерес представляет часть алгоритма, которая посвящена подвижной части модели и реализации процедуры перемещения данной части конструкции в процессе корроирования. Далее рассмотрим эту часть алгоритма подробнее. Изменение геометрии осуществляется в зоне контакта огнеупорного материала с расплавом стекломассы. В данной работе эту подвижную границу предлагается аппроксимировать кусочно линейно. Для этого

область, которая потенциально может быть подвижна разбивается на  $(N-1)$  отрезок конечной длины. При таком подходе геометрия подвижной границы (корродирующей стенки) будет описываться  $N$  точками, определяющими концы данных отрезков (рис. 3). На (рис. 3, а) показано начальное состояние модели. Сама по себе модель состоит из трёх отдельных, физически различных областей: огнеупорная стенка (I), зона пламенного пространства (II) и пристеночный слой расплава стекломассы (III).

Наиболее интенсивно коррозия будет протекать в районе раздела трёх фаз (К), так как для этой зоны характерна максимальная температура расплава и его агрессивное физико-химическое воздействие на огнеупорную стенку. Действительно, в районе раздела трёх фаз следует ожидать подвижность стекломассы, что обеспечивает такие дополнительные агрессивные воздействия как доступ газов, выделяющихся при варке стекломассы к поверхности огнеупорного бруса и циклические температурные воздействия. Более того, наличие описанной «подвижности» способно приводить к взаимодействию расплава с огнеупором выше точки раздела трёх фаз, что обусловлено наличием сил поверхностного натяжения (рис. 3, б). Данный факт имеет экспериментальное подтверждение [7] и характеризуется зоной «смачивания» расплавом огнеупорной стенки. При этом известно, что высота данной зоны не превышает некоторого заданного значения. Таким образом, коррозия может протекать выше точки «К», но высота распространения ограничена фиксированным значением. По мере разъедания огнеупорного бруса возникает характерная в зона выше точки «К», имеющая участок наклонённый в сторону стекломассы и поверхность близкую к горизонтальной. На этих участках имеет место феномен, называемый вертикальной ячеистой коррозией. Высота «смоченного» участка определяется химическим составом и температурой расплава стекломассы, а так же химическими и структурными свойствами огнеупорного материала стенки, которые являются эмпирически определёнными параметрами [12]. В данной работе эти величины считаются заданными.

Общее количество подвижных точек  $N$ ,  $m$  – количество подвижных точек задействованных в процессе коррозии,  $k$  – номер точки раздела трёх фаз,  $x_{min}$  – минимальная толщина огнеупорного бруса, обеспечивающая безаварийную работу печи,  $\Delta_i$  – величина коррозии для каждой точки аппроксимации, рассчитываемой в зависимости индивидуально в зависимости от температуры по уравнению (1),  $(x_i, y_i)$  – координаты подвижных точек в текущий момент времени (нумерация точек осуществляется от пода печи),  $(x'_i, y'_i)$  – координаты точек в следующий момент времени.

Рассмотрим более детально алгоритм построения и перестроения границы огнеупорного бруса, подверженного коррозии. Данный алгоритм приведен на рис. 4.

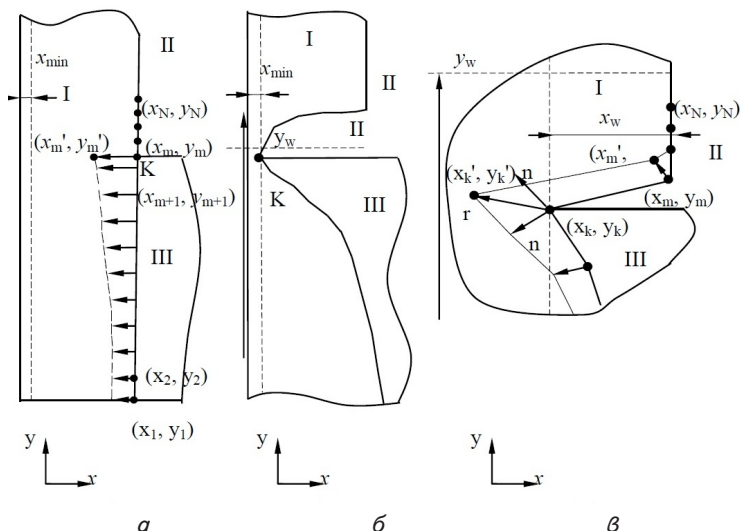


Рис. 3. Зона ячеистой коррозии при изменении геометрии огнеупорного бруса: а – исходная конфигурация огнеупорного бруса б – конфигурация огнеупорного бруса в момент вовлечения новой точки в процесс вертикальной ячеистой коррозии; в – фрагмент конфигурация огнеупорного бруса в момент достижения минимально допустимой толщины огнеупорного бруса

На рис. 3: I – огнеупорный брус; II – зона пламенного пространства; III – пристенный слой стекломассы; К – точка раздела трёх фаз (огнеупорный брус – стекломасса – пламенное пространство);  $r, n$  – результирующий вектор точки раздела трёх фаз и векторы узловых точек для их перемещения в новое положение; сплошная жирная линия – конфигурация огнеупорного бруса; пунктирная линия – расчётная конфигурация бруса в зоне контакта со стекломассой; штрих пунктирная линия – минимально-допустимое значение толщины огнеупорного бруса.

Формально процедура определения геометрии границы происходит отдельно для каждой точки кусочно представленной границы (рис. 3, а). То есть в каждый момент времени происходит КЭ расчёт температурного поля и значения температуры в точках  $(x_i, y_i)$ . По вычисленным значениям температуры выполняется расчёт суточной величины коррозии  $\Delta_i$ , по формуле (1) после чего происходит определение новых координат точки  $(x'_i, y'_i)$ , как вектора длиной  $\Delta_i$  по нормали к отрезку, которому принадлежит данная точка.

Некоторые характерные особенности данный алгоритм имеет для вычисления скорости коррозии в районе раздела трёх фаз. Во-первых, вектор рассчитывается не по нормали к отрезку, а как вектор результирующий к нормальям двух отрезков, лежащих выше и ниже токи «К». Во-вторых, проводится анализ вероятности возникновения вертикальной ячеистой коррозии. При её возникновении, в расчёт включается точка с номером большим «К», и так до максимально возможной высоты, на которой может иметь место вертикальная ячеистая коррозия.

В начальный момент времени координаты  $(x'_i, y'_i)$ , величины  $\Delta_i$  обнулены, количество подвижных точек совпадает с номером точки на разделе трёх фаз. Далее происходит построение геометрической модели, нане-



сение конечно-элементной сетки, наложение граничных условий в соответствии с исходными данными (Б3). Если координата любой из подвижных точек достигает значения  $x_{\min}$  (Б4) происходит сохранение результатов расчёта в виде таблиц температур по сечению огнеупора, величин  $\Delta_i$  в заключительный момент времени, графическое представление конфигурации огнеупорного бруса и распределение температуры по толщине огнеупорного материала и тепловой изоляции; завершение работы программы (Б5). В случае, если значение  $x_{\min}$  не достигнуто, рассчитываются температуры по толщине ограждения (Б6) и величины  $\Delta_i$  для каждой узловой подвижной точки (Б7). Рассчитываем координаты точки  $(x'_i, y'_i)$ , которая получается прибавлением  $\Delta_i$  к координате  $x_i$  (Б8). Если номер потенциально подвижной точки больше двух (Б9) и больше максимального номера подвижной точки на текущей итерации то проверяем условие вовлечения точки в процесс ячеистой коррозии (Б19), который начинается при достижении точкой раздела трёх фаз значения  $x_w$ . При этом значение  $x_w$  уменьшается на заданную в исходных данных величину, переприсваивается и используется в последующих расчётах, пока координата  $x_k$  точки раздела трёх фаз не достигнет «нового» значения  $x_w$ , после чего данная процедура повторяется. Если координата точки, вовлечённой в процесс ячеистой коррозии, по оси ординат достигла значения  $y_w$ , то процесс коррозии для данной точки останавливается, так как расплав, смачивающий огнеупорный брус, не поднимается выше амплитуды волны. Если условие (Б19) выполняется, то в процесс ячеистой коррозии вовлекается новая точка (Б20), координаты которой  $(x'_{m+1}, y'_{m+1})$  определяются как вектор длиной  $\Delta_{m+1}$  по нормали по отношению к отрезку  $[(x_{m+1}, y_{m+1}); (x_m, y_m)]$ .

Далее происходит увеличение количества точек вовлечённых в процесс коррозии на единицу  $m = m+1$  (Б22) и перемещение подвижных точек в новое положение при следующей итерации (Б21). Если условие (Б19) не выполняется новая точка в процесс коррозии не вовлекается и сразу происходит переход к (Б21) и далее к боку построения геометрии наложению конечно-элементной сетки и граничных условий (Б3).

Если условие (Б10) не выполняется, то осуществляется проверка, является ли текущая точка границей раздела трёх фаз  $i = k$  (Б11). Если условие выполняется, значит рассматривается точка раздела трёх фаз и «новая» координата точки  $(x'_i, y'_i)$  вычисляется как результирующий вектор между вектором нормальным к отрезку  $[(x_{i-1}, y_{i-1}); (x_i, y_i)]$  и отрезку  $[(x_i, y_i); (x_{i+1}, y_{i+1})]$  (Б13). Обозначим  $y_I = y_{i-1}; x_I = x_{i-1}$ ,  $y_{II} = y_i; x_{II} = x_i$ , рассчитываем коэффициент  $k = \frac{y_{II} - y_I}{x_{II} - x_I}$  и определяем ко-

ординаты  $x'_i = \frac{k \Delta_{II}}{\sqrt{k^2 + 1}} + x_I$  при  $k < 0$ , в противном случае  $x'_i = x_I - \frac{k \Delta_{II}}{\sqrt{k^2 + 1}}$ . Определяем координату  $y'_i = y_I - \frac{x'_i - x_I}{k}$ . По приведенным выше формулам вычисляются координаты  $(x'_i, y'_i)$  расчётных точек с номерами от 1 до  $m$ , за исключением рассматриваемой точки раздела трёх фаз.

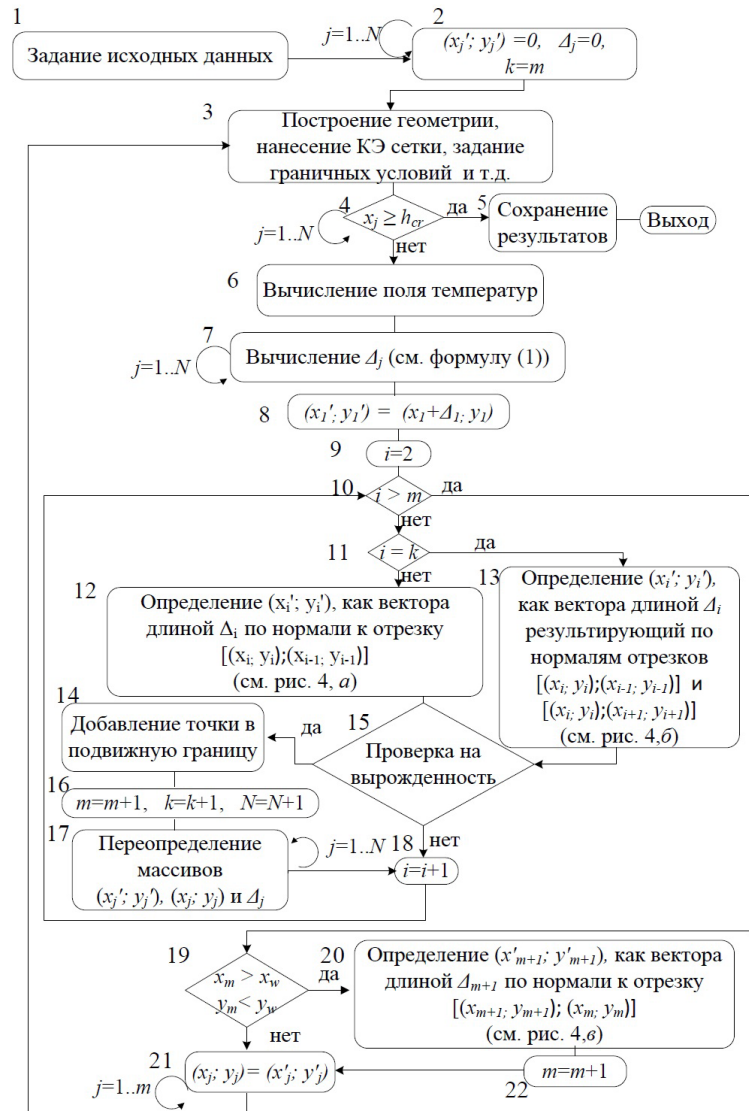


Рис. 4. Структура алгоритма расчёта величины коррозии и построения подвижной границы

Вслед за координатами  $(x'_i, y'_i)$ , аналогичным образом, определяем координаты окончания вектора нормального к отрезку  $[(x_{i+1}, y_{i+1}); (x_i, y_i)]$ , которые обозначим  $(x''_i, y''_i)$ . При этом начало отрезка, к которому строится вектор нормали имеет координаты  $y_I = y_{i+1}; x_I = x_{i+1}$ , конец отрезка  $y_{II} = y_i; x_{II} = x_i$ .

Если условие  $i = k$  (Б11) не выполняется, следовательно подвижная точка находится ниже зеркала стекломассы и координаты новой точки определяются

как вектор длиной  $\Delta_i$  нормальный по отношению к отрезку с координатами  $[(x_{i-1}, y_{i-1}); (x_i, y_i)]$  (Б12). Далее следует общая для (Б12 и Б13) проверка на вырожденность (Б15), проверяется происходит ли наложение подвижных точек друг на друга или пересечение отрезков, соединяющих подвижные точки. Если нет, то счётчик  $i$  увеличивается на 1 (Б18) и рассматривается следующая подвижная точка. При выполнении условия (Б15) добавляется дополнительная точка (Б14), если какой-либо из отрезков, соединяющих подвижные точки, стал на  $1/3$  короче своей первоначальной длины, что говорит о тенденции к вырождению. Увеличиваем на единицу счётчики  $m, k, N$  (Б16) и производим переопределение массивов, содержащих данные о текущих координатах подвижных точек и координатах точек в которые они переместятся на следующей итерации, величин  $\Delta_i$  температур в подвижных точках и т. д. (Б17). Далее переходим к (Б18) и после увеличения счётчика  $i$ , переходим к (Б10).

Созданный алгоритм реализован в виде программного комплекса, в котором температурное поле поперечного сечения бокового ограждения бассейна рассчитывается с использованием метода конечных элементов. Твердотельная геометрическая модель разбивалась на равносторонние треугольные конечные элементы (КЭ), что позволяет решить уравнение теплопроводности в двумерной постановке. Точки пересечения сторон элементов разбиения являются узлами, в которых рассчитывается температура материала. Теплофизические свойства огнеупорных, теплоизоляционных материалов и стекломассы в течение одной итерации, моделирующей одни сутки работы ограждения, считаем неизменными.

Длина ребра треугольного элемента области разбиения определена с помощью вычислительного эксперимента, исходя из условия отличия температуры точки раздела твёрдой жидкой и газообразной фаз (огнеупор–расплав стекломассы–продукты сгорания топлива) в пределах трёх процентов для модели с большим размером элемента от модели с меньшим размером элемента. Результаты расчётов приведены в виде графических зависимостей на рис. 5, 6. В табл. 2 содержатся данные, характеризующие влияние длины ребра элемента на температуру границы раздела огнеупор–стекломасса, в частности точки раздела трёх фаз в конце кампании печи и длительность службы огнеупорного бруса.

Таблица 2

Зависимость температуры огнеупорного бруса и длительности кампании печи от количества КЭ на подвижной границе

Количество КЭ на подвижной границе, шт.	Температура точки раздела трёх фаз, °С	Длительность кампании печи, сут
54	1204	1322
60	1104,6	1967
75	1090,85	2818
90	1094,07	2891

Так при использовании КЭ с длиной ребра 22,5 и 18 мм отличие температур точки раздела трёх фаз и длительность кампании печи составляет, соответ-

ственно, 1,24 % (13,75 °С) и 30,2 % (851 сут.). Как видно, расчёт температуры выполняется с достаточной точностью, однако полученное отличие температур даёт не удовлетворительные результаты при расчёте длительности кампании печи. Этот факт требует уменьшения длины ребра КЭ до 15 мм, что приводит к снижению отличия по температуре точке раздела трёх фаз и длительности кампании, соответственно, до 0,29 % (3,22 °С) и 2,53 % (73 сут.). Таким образом, использование КЭ с длиной ребра 15 мм позволяет получать результаты с достаточной точностью.



Рис. 5. Зависимость температуры точки раздела трёх фаз от количества КЭ в подвижной границе

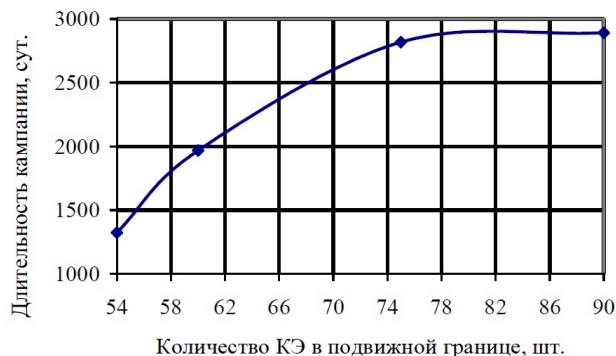


Рис. 6. Зависимость длительности кампании от количества КЭ в подвижной границе

#### 4. Выводы

Таким образом, разработан алгоритм решения задачи коррозионного износа огнеупорного бруса ограждения варочного бассейна стекловаренной печи. Составленный алгоритм реализован в виде программного комплекса, позволяющего получать данные о температурном поле огнеупорного бруса и поле температур теплоизоляционных панелей. На основании расчёта получено изменение конфигурации бокового ограждения в процессе работы печи, а также длительность службы огнеупорного бруса при его заданной минимальной остаточной толщине.

Данные расчётов могут быть использованы при проектировании, реконструкции и эксплуатации стекловаренных печей, а также при разработке системы управления тепловым режимом печи.

## Литература

1. Дзюзер, В. Я. Совершенствование методики расчёта теплового баланса регенеративной стекловаренной печи (окончание) [Текст] / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 4. – С. 22–27.
2. Allendorf, M. D. Thermodynamic analysis of silica refractory corrosion in glass-melting furnaces [Text] / M. D. Allendorf, K. E. Spear // Journal of the electrochemical society. – 2001. – Vol. 148 (2). – P. B59–B67.
3. Дзюзер, В. Я. Огнеупоры для варочной части стекловаренных печей [Текст] / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №5. – С. 24–32.
4. Dzyuzer, V. Ya. Electrofused AZS refractories for high-capacity glass-founding furnaces [Text] / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and industrial ceramics. 2013. – Vol. 54 (4), – P. 304–306.
5. Tokarev, V. D. Analysis of service of refractories in glass-melting tank furnaces [Text] / V. D. Tokarev, S. S. Igat'ev, O. N. Popov // Glass and ceramics. – 2006. – Vol. 63(5-6). – P. 154–157.
6. Sokolov, V. A. Fusion-cast chromium-bearing refractories - the most durable materials in aggressive melts [Text] / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan // Refractories and industrial ceramics. – 2011. – Vol. 52 (2). – P. 146–150.
7. Будов, В. М. Продление межремонтного периода работы стекловаренных печей – резерв увеличения выпуска листового стекла [Текст] / В.М. Будов // Стекло и керамика. – 1975. – №4. – С. 4–7.
8. Rahimi, R. A. Corrosion behavior of ZrO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> refractories in lead silicate glass melts [Text] / R. A. Rahimi, A. Ahmadi, S. Kakooci, Sadrnezhaad, S.K. Sadrnezhaad // Journal of the european ceramic society. – 2011. – Vol. 31 (5). – P. 715–721.
9. Ermakov, I. N. New refractory materials for construction and overhaul of glass furnaces [Text] / I. N. Ermakov, V. V. Skurikhin // Glass and ceramics. 2006. – Vol. 63 (9–10). – P. 351–355.
10. Skurikhin, V. V. Traditional and new refractory materials for construction and repair of glass-melting furnaces [Text] / V. V. Skurikhin, I. N. Ermakov // Glass and ceramics. – 2004. – Vol. 61 (9-10) – С. 346–351.
11. Дзюзер В. Я. Эффективное применение электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров в высокотемпературных стекловаренных печах (часть I) [Текст] / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 6. – С. 45–49.
12. Кучерявый М.Н. Кинетика коррозии огнеупоров расплавом многощелочного тарного стекла [Текст] / М. Н. Кучерявый // Стекло и керамика. – 1985. – № 3. – С. 22–27
13. Кошельник В. М. Прогнозирование температурного состояния и срока службы ограждения ванной стекловаренной печи [Текст] / В. М Кошельник, Д. В. Бекназарян., Е. В. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ» – 2012. – № 8. – С. 178–183.
14. Товажнянский Л. Л. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве: монография [Текст] / Л. Л. Товажнянский, В. М. Кошельник, В. В. Соловей, А. В. Кошельник; под ред. В.М. Кошельника. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.