

Бекназарян Д. В.
Строгонов К. В.

**Прогнозирование состояния
тепловой изоляции
плавильной зоны
печей ванного типа**

Монография

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Д. В. Бекназарян, К. В. Строгонов

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ПЛАВИЛЬНОЙ ЗОНЫ ПЕЧЕЙ ВАННОГО ТИПА**

Монография

Санкт-Петербург
Научно-технологические
2023

УДК 536.24

ББК 31.31

Б42

Рецензенты:

Федяев Александр Артурович – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладной механики и инженерной графики» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»;

Манашев Ильдар Рауфович – кандидат технических наук, заместитель директора по развитию производства композиционных материалов ООО «Научно-техническая производственная фирма «ЭТАЛОН»

Б42 Бекназарян Д. В. Прогнозирование состояния тепловой изоляции плавильной зоны печей ванного типа. Монография / Д. В. Бекназарян, К. В. Строгонов. – СПб.: Научное издание, 2023. – 132 с.

ISBN 978-5-907618-68-8

В монографии рассмотрены научные подходы к прогнозированию срока службы тепловой изоляции, на примере наиболее подверженной износу части боковых ограждений стекловаренной печи.

Описаны принцип коррозии огнеупорного ограждения и методы охлаждения для повышения стойкости огнеупоров и продолжительности кампаний печей.

Предложен критерий эффективности и метод поиска экстремума функции по оптимизации теплоизоляции огнеупорных ограждений стекловаренной печи.

Монография адресуется специалистам в области теплоэнергетики и руководителям предприятий стекольной промышленности, может быть полезна докторантам, аспирантам и студентам энергетических и технологических специальностей.

УДК 536.24

ББК 31.31

© Бекназарян Д. В., Строгонов К. В., 2023

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

ISBN 978-5-907618-68-8

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. КОНСТРУКТИВНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СТЕКЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	8
1.1. Характеристики высокотемпературных плавильных агрегатов стеклового производства и процесса стекловарения.....	8
1.1.1. Классификация и характеристики наиболее распространенных стекловаренных печей.....	8
1.2. Применение огнеупорных материалов в ваннах стекловаренных печей.....	18
1.2.1. Требования к футеровке и теплоизоляции варочного бассейна.....	18
1.2.2. Огнеупорные материалы главного свода печи.....	22
1.2.3. Коррозионная стойкость огнеупорных материалов в основных элементах стекловаренных печей.....	24
1.3. Особенности применения и условия работы тепловой изоляции в высокотемпературных агрегатах.....	31
1.4. Методы охлаждения стеновых брусев варочного бассейна.....	35
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДЕНИЙ ВАРОЧНОГО БАСЕЙНА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ.....	37
2.1. Выбор темы, постановка цели и задач научного исследования.....	37
2.2. Особенности процессов теплообмена в стекловаренных печах. Задание граничных условий.....	40
2.2.1. Теплообмен в газовом пространстве варочного бассейна.....	40
2.2.2. Теплообмен в объеме стекломассы.....	42
2.2.3. Теплообмен в стеновом брусце.....	47
2.2.4. Теплообмен при натекании плоской турбулентной струи, формируемой системой принудительного воздушного охлаждения, на огнеупорный брус, расположенный нормально к ее оси.....	49
2.3. Моделирование процесса коррозии огнеупорных брусев варочного бассейна.....	53
2.3.1. Механизмы коррозионного износа огнеупорных изделий.....	53
2.3.2. Определение зависимости скорости процесса разрушения от температуры стекломассы.....	57
2.4. Оценка адекватности математической модели. Расчет теплового состояния огнеупорного бруса варочного бассейна.....	66
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ СТЕНОВЫХ БРУСЬЕВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	72
3.1. Влияние изменения режимных параметров системы охлаждения и типов изоляционных материалов, применяемых в стеновом ограждении печи.....	72

3.1.1. Моделирование режимов работы печи в различных температурных диапазонах	73
3.1.2. Исследование влияния толщины слоя изоляционного материала КПД–400 на скорость коррозии огнеупорного бруса при постоянном значении коэффициента теплоотдачи при использовании системы принудительного воздушного охлаждения.....	79
3.2. Влияние расположения ряда сопел воздушного охлаждения относительно зеркала стекломассы на скорость коррозии стеновых брусьев	84
4. КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МЕТОД ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА ФУНКЦИИ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ.....	89
4.1. Оптимизация бокового ограждения стекловаренной печи. Основные понятия и этапы оптимизационного вычислительного эксперимента	89
4.2. Критерии эффективности бокового ограждения стекловаренной печи.....	90
4.3. Критерий эффективности кампании печи	93
4.4. Выбор метода поиска экстремума	94
4.4.1. Независимые переменные математической модели.....	94
4.4.2. Основные принципы комплексной оптимизации установок и оборудования на основе феноменологического эвристико-эволюционного подхода	96
4.4.3. Обобщенная схема реализации феноменологического эвристико – эволюционного подхода при оптимизации бокового ограждения печи	97
4.5. Алгоритм оптимизационной задачи	100
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ НА ЕЕ ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	105
5.1. Режимные, конструктивные параметры печи и теплоизоляционной конструкции бокового ограждения	105
5.2. Влияние теплового режима стекловаренной печи и параметров теплоизоляционной конструкции на критерий эффективности	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	131

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ежегодно производится миллионы тонн стекла, энергоемкость которого существенна, а стойкость огнеупорной футеровки стекловаренных печей, является ключевым показателем эффективности их работы.

Одна из важнейших задач, стоящих перед производителями, это повышение срока кампании ваннных печей, при экономически оправданных тепловых потерях в окружающую среду и условиях безаварийности. Наиболее подвергаемым износу участком огнеупорной футеровки, являются огнеупорные брусья бокового ограждения. Это обусловлено воздействием высоких температур и физико-химической коррозией.

Эффективная работа рассматриваемых печей требует учета множества параметров, таких как эксплуатационные расходы, тепловые потери и многое другое.

В качестве обобщающего критерия, предлагается максимальный валовой доход за кампанию печи, который учитывает наиболее значимые производственные и финансовые показатели.

Авторы надеются, что монография может представлять интерес для специалистов предприятий, эксплуатирующих плавильные реакторы, в том числе стекловаренные печи.

Основное содержание данной монографии составляют материалы диссертационной работы, представленной к защите в ФГБОУ ВО «НИУ «Московский энергетический институт» по специальности 05.14.04 Промышленная теплоэнергетика и совместную работу авторов.

Д.В. Бекназаряном написаны 1, 2, 3 и 4 главы, К.В. Строгоновым написано предисловие, введение и глава 5 написана авторами совместно.

Авторы выражают благодарность всем, кто оказывал помощь в этой работе:

- коллективу кафедры ТТЭТ НТУ «ХПИ» за полученные знания и всестороннее содействие
- коллективу кафедры ЭВТ МЭИ за поддержку
- профессору, д.т.н. Г.Е. Каневцу за методологическую поддержку, консультации и мудрость
- профессору ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», д.т.н. С.К. Попову и и.о. заведующего кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» СГТУ имени Гагарина Ю.А., к.т.н. Н.А. Озерову за конструктивную критику и представленные замечания, устранение которых усилили данную работу доценту, к.т.н. А.Р. Перселкову за добрые наставления.

Авторы,
апрель 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач в современной стекольной промышленности является увеличение эффективности работы наиболее распространенных агрегатов по производству стекломассы – ванн стекловаренных печей непрерывного действия. Первостепенными задачами наряду с экономией топлива и повышения качества вырабатываемой продукции, является продление времени работы между холодными ремонтами (кампания печи).

Разработка системы диагностики и прогнозирования безаварийной работы бокового ограждения печи с учетом применения системы воздушного охлаждения ввиду высокой сложности протекающих тепломассообменных процессов и широкой номенклатуры используемых материалов, требует разработки методического обеспечения и создания прикладных программ, учитывающих конструктивные и режимные особенности работы агрегата. Для стекловаренных печей, наряду с увеличением длительности кампании печи, остро стоит проблема повышения тепловой эффективности.

Значительный вклад в изучение работы бокового ограждения стекловаренных печей, кинетику коррозии огнеупоров расплавами стекол внес Попов О.Н., а также сотрудники Государственного института стекла и его филиалов (ныне АО «Институт стекла») Кучерявый М.Н., Сидоров В.В., Галдина Н.М. Стойкость огнеупоров при варке электровакуумных стекол в пламенных печах непрерывного действия изучена в работах Аганиной А.Т. Исследования температурной зависимости коррозии в расплавах различных стекол приведены в работах Павловского В.К., Соболева Ю.С. (АО «НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»). Вопросам интенсификации технологических процессов, исследованиям работы крупногабаритных стекловаренных печей посвящены работы Будова В.М. Существенный вклад в совершенствование конструкции и тепловых режимов, разработку математических моделей стекловаренных печей внес Дзюзер В.Я. Обширные исследования теплофизических и оптических свойств расплавов тарных и листовых стекол выполнены Племянниковым Н.Н. и Крупой А.А. Несмотря на проведение большого количества исследований, многие из них касались отдельных аспектов улучшения работы пламенных печей (вопросы стойкости огнеупорных материалов в расплавах стекол, методы исследования скорости коррозии, особенностей эксплуатации и режимов работы различных систем принудительного охлаждения бокового ограждения), в то время как на современном этапе необходим комплексный подход к особенностям работы бокового ограждения, который объединит вопросы материального исполнения (применение огнеупорных брусьев и тепловой изоляции), тепловой режим работы

ограждения и режим работы системы принудительного охлаждения для решения вопроса прогнозирования и диагностики состояния такого ограждения.

Основной целью настоящей монографии является описание метода численного моделирования работы бокового ограждения стекловаренной печи с целью прогнозирования и диагностики работы такого ограждения, и исследовать процессы распределения температуры, определять плотность теплового потока для огнеупорных и теплоизоляционных материалов ограждения в двумерной постановке с учетом комплексного воздействия расплава стекломассы, продуктов сгорания топлива, локального принудительного охлаждения огнеупорных брусьев на скорость коррозии огнеупорных брусьев. Поставленная цель достигается путем выполнения анализа методов расчета тепломассообменных процессов в рабочем пространстве плавильных агрегатов ванного типа, теплообменных процессов, протекающих в стекломассе. Кроме того, внесено уточнение в математическую модель процесса коррозии в огнеупорном бруссе. Разработан алгоритм и программа расчета срока службы бокового ограждения ванной стекловаренной печи с учетом применения системы воздушного охлаждения наружной поверхности огнеупорного бруса. Проведен вычислительный эксперимент, с целью изучения влияния изменения конструктивных параметров ограждения и режимных факторов работы стекловаренной печи на скорость коррозии стеновых брусьев и тепловые потери с поверхности бокового ограждения, покрытого многослойной тепловой изоляцией. По итогам проведенных исследований разработана методика выбора оптимального набора толщин и типов материалов теплоизоляционных конструкций стекловаренных печей. Предложен критерий эффективности, который позволяет определить оптимальную теплоизоляционную конструкцию стекловаренной печи, что выражается в максимальном сроке службы агрегата при минимальных тепловых потерях в окружающую среду.

Обобщены результаты исследований и разработаны рекомендации по увеличению срока службы и снижению тепловых потерь через боковые ограждения печи. Разработанный программный комплекс может быть использован на действующих предприятиях стекольной промышленности в качестве альтернативного метода диагностики и прогнозирования толщины огнеупорного бруса и теплового состояния изоляции.

Разработанный критерий эффективности и адаптированный к стекловаренным печам феноменологический эвристико-эволюционный метод оптимизации Г.Е. Каневца может быть использован для подбора оптимальных многокомпонентных ТКСП на печах как вновь проектируемых, так и после холодного ремонта.

Полученные результаты могут быть использованы научными и проектными организациями при проектировании энергоэффективных ограждений стекловаренных печей.

1. КОНСТРУКТИВНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Характеристики высокотемпературных плавильных агрегатов стеклового производства и процесса стекловарения

1.1.1. Классификация и характеристики наиболее распространенных стекловаренных печей

Наиболее высокий КПД до 85% имеют электрические и пламенно-электрические печи. Основными типами стекловаренных печей с электронагревом являются индукционные и печи сопротивления [1]. Индукционные печи используют при варке небольших количеств стекол специального назначения, когда значительные производственные издержки окупаются высокой стоимостью получаемых стеклянных изделий.

Электрические печи сопротивления могут быть выполнены с косвенным или прямым нагревом стекломассы. Электрические печи сопротивления с косвенным нагревом, оснащенные специальными нагревательными элементами, применяют в лабораторных условиях и при малотоннажном производстве свинцовых цветных стекол. Это, как правило, тигельные или горшковые электропечи.

Для варки листового, тарного, сортового, технических стекол применяют электрические печи сопротивления с прямым нагревом, в которых нагревательным сопротивлением является сама получаемая в печи стекломасса.

Стекловаренные печи различных конструкций с прямым электронагревом стекломассы можно разделить на две группы: полностью электрические печи (далее называемые электрическими) и пламенно-электрические.

Электрические стекловаренные печи – это агрегаты, в которых процесс варки стекла происходит под действием электрической энергии, преобразующейся в тепло [2]. При этом варочный бассейн печи обогревается только за счет пропускания электрического тока через стекломассу. Различают два основных вида таких печей: с холодной верхней частью (строением) варочного бассейна (варка стекла под плотным слоем шихты), с горячей верхней частью варочного бассейна (варка стекла в ванне с неплотным слоем шихты).

Печи с холодной верхней частью требуют равномерной по поверхности ванны загрузки шихты плотным слоем. Современный уровень производства позволяет сравнительно легко обеспечить такую загрузку в небольших печах с площадью варочного бассейна до 15÷20 м². Для этой цели применяют специальные автоматические загрузчики шихты и стеклобоя. Так как теплопроводность шихты низкая, даже при относительно тонком слое в 100÷150 мм

шихты эффективно теплоизолирует ванну и температура над ней не превышает 200°С, тогда как температура стекломассы может достигать 1500°С и более.

В больших электрических печах технически очень трудно осуществить равномерное распределение шихты в плотном слое по всей поверхности ванны. С увеличением размеров печи загрузчики шихты, обеспечивающие равномерное плотное покрытие ванны, становятся настолько громоздкими, что часто их размеры превышают размеры самой печи, в связи с чем, в больших печах устанавливают загрузочные устройства, аналогичные применяемым в пламенных ваннных печах. При этом шихта неравномерно распределяется в бассейне. Возможны небольшие открытые участки расплава. Вследствие такой загрузки шихты над ней устанавливается температура 500°С и выше. С целью сокращения потерь тепла в окружающую среду верхняя часть этих печей должна быть достаточно хорошо герметизированной и иметь более эффективную теплоизоляцию, чем у электропечей с холодной верхней частью.

Электрические печи указанных видов классифицируют в зависимости от формы варочного бассейна, его характерных размеров, расположения электродов и их типа, а также фазности применяемого переменного электрического тока. По расположению электродов электрические стекловаренные печи разделяют на печи с однорядным и многорядным расположением электродов, с донными электродами. Конструктивно их делят на печи с варочными бассейнами квадратной, прямоугольной, круглой и многоугольной формы в плане. По виду подводимой электроэнергии выделяют одно-, двух- и трехфазные печи.

Пламенно-электрическими стекловаренными печами называются печи с комбинированным нагревом, в которых часть энергии подводится с пламенем, а часть – с электронагревом стекломассы. Они разделяются на следующие группы: печи, по конструкции аналогичные электрическим стекловаренным печам, но с дополнительным обогревом пламенем – так называемые смешанные печи; печи, по конструкции аналогичные пламенным стекловаренным печам, но с дополнительным электроподогревом стекломассы; печи, в которых тепло продуктов горения и электрическая энергия используются дифференцированно (например, варка – за счет пламенного обогрева, осветление – за счет электроподогрева и т.д.) [3, 4].

Среди стекловаренных печей с пламенно-электрическим нагревом наибольшее распространение получили пламенные стекловаренные печи с дополнительным электроподогревом (ДЭП) стекломассы. Это объясняется следующими преимуществами: возможность увеличения съема стекломассы при существующих размерах пламенной печи без дополнительной реконструкции; возможностью повышения качества стекломассы за счет управления конвекционными потоками или их стабилизации при нарушениях съема стекломассы,

горения топлива и т.д.; снижением затрат энергии на варку 1 т стекла, так как КПД дополнительного электроподогрева составляет $90 \div 100\%$.

При размещении электродов необходимо учитывать, что основная доля выделяемой мощности приходится на приэлектродные слои. Так, исследования [5] показали, что в 10% объема стекломассы выделяется от 39 до 92% всей подводимой мощности при использовании горизонтальных, от 42 до 71% – вертикальных и от 18 до 43% – пластинчатых электродов.

Чаще всего вертикальные электроды размещают в зоне теплового барьера, чтобы обеспечить максимальный эффект ДЭП. При подводе электроэнергии через вертикальные электроды образуется замкнутый цикл потока стекломассы, которая сначала поднимается вверх вдоль электродов, затем в верхней части поворачивается в горизонтальном направлении к стенам печи, опускается вдоль них ко дну и вновь поступает к электродам.

Необходимо отметить, что при ДЭП с помощью донных электродов прогреваются нижние слои стекломассы и увеличивается температура у протока (пережима), что важно, например, при варке цветных стекол [5]. Повышение скорости потоков стекломассы при ДЭП имеет и отрицательные последствия. Снижается долговечность огнеупоров, и, следовательно, продолжительность срока службы печи. Поэтому при установке ДЭП необходимо оптимизировать ввод электроэнергии, что позволяет снизить затраты на варку стекла и повысить долговечность печи.

Таким образом, электрические стекловаренные печи и печи с ДЭП по сравнению с пламенными печами имеют как определенные преимущества, так и недостатки, что необходимо учитывать при выборе энергоносителя.

Среди недостатков могут быть названы такие: сложность комплектации электротехнического оборудования; значительный расход дорогостоящих материалов (в частности электродов); меньшая надежность и долговечность электрических печей вследствие быстрого износа электродов (в случае, если электроды не продвигаются по мере износа), а также огнеупоров из-за повышенной скорости конвективных потоков стекломассы.

Однако электронагрев имеет и ряд преимуществ, среди которых следует отметить возможность регулирования процесса нагрева в широких пределах с высокой степенью равномерности и точности поддержания заданных температур, хорошая управляемость технологическим процессом, компактность конструкций, простота подачи энергии, экологическая чистота производства, лучшие условия труда персонала.

В стекольной промышленности применяют преимущественно ванные печи непрерывного действия. В качестве топлива для этих печей в большинстве случаев используется высококалорийное газообразное топливо – природный газ.

Ванная стекловаренная печь, отапливаемая природным газом, состоит из рабочей камеры и воздухонагревателей (рис. 1.1) [6]. Бассейн образован плоским подом, продольными и поперечными стенками, выложенными из огнеупорных блоков, охлаждаемых снаружи.

Среди них различают два основных типа. Первый тип печей с протоком. Второй тип печей с развитой конвекцией, из которых стекломасса подается на поверхность ванны с расплавленным оловом для изготовления листового стекла флоат-способом.

В печах с протоком разделительные приспособления, располагаемые в стекломассе представляют собой или постоянные элементы конструкции в виде стен, соединенных протоком, или стен с отверстиями. Вторым типом разделительных приспособлений могут быть элементы вводимые в печь, а именно, охлаждаемые водой трубы, кранцы, боты.

В целях устранения кристаллизации в выработочном бассейне и устранения обратного потока стекломассы из него, уменьшают высоту выработочной части. Повышение температуры варки и производительности печей потребовало заглубления протока для улучшения охлаждения стекломассы. При необходимости повышения температуры стекломассы в выработочной части уровень протока поднимают. Иногда за протоками располагают порошки для уменьшения потоков стекломассы. С целью повышения сохранности дна бассейна и предотвращения застывания стекла высота протока иногда бывает выше уровня дна бассейна.

Кладка протока бассейна подвержена значительному изнашиванию. Поэтому ее выполняют из фасонного высококачественного циркономуллитового или другого огнестойкого материала наименее подверженного вертикальной ячеистой коррозии, в результате которой пузырьки растворенных газов, содержащиеся в стекломассе, проникая в микротрещины верхней горизонтальной поверхности протока совершают вращательно-поступательные движения. Огнеупорный материал под воздействием такого движения начинает интенсивно разрушаться, а продукты разрушения выносятся из зоны контакта движущейся стекломассой.

Ванны вмещают от 50 до 500 т стекломассы. Наибольшие размеры имеют печи для консервной тары и бутылочного стекла – площадь их варочной части доходит до 120÷150 м². Меньшую площадь варочной части (50÷100 м²) имеют печи для производства сортового и некоторых видов технических стекол. Эти печи имеют выработочную часть малых размеров (по площади и глубине), к которой примыкают фидеры или оборотные ванны.

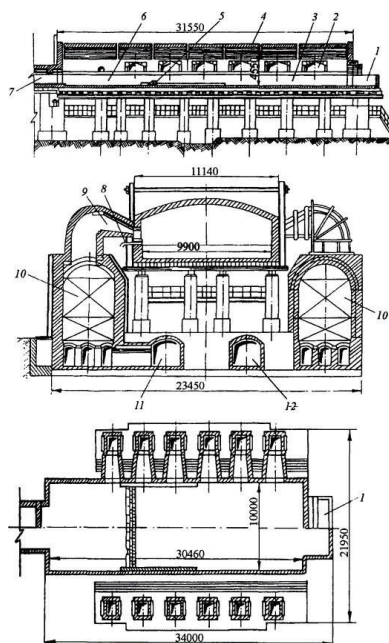


Рисунок 1.1 – Ванная регенеративная печь с поперечным направлением пламени:

- 1 – загрузочный карман; 2 – влеты горелок; 3 – варочная часть; 4 – свод;
 5 – порог; 6 – студочная часть; 7 –выработочный канал; 8 – подвод топлива; 9 – подвод воздуха; 10 – регенераторы; 11 – дымовой боров;
 12 – канал для подачи воздуха

Все рассмотренные печи являются регенеративными печами с поперечным направлением пламени. При выработке стекла для тарной, сортовой, парфюмерной и аптекарской посуды механизированными и ручными методами, применяют еще печи небольших и средних размеров площадью 10÷50 м². Эти печи бывают и с подковообразным пламенем, а при отоплении высококалорийным топливом могут быть еще и рекуперативными.

Основными элементами ванн печей является под, стены бассейна–ванны, стены газового пространства, главный свод, воздухонагреватели (регенераторы или рекуператоры). Рабочая камера подразделяется на бассейн с варочной и выработочной частями, разделенными сверху массивной разделительной стенкой. Пламенное пространство состоит из двух зон – варочной и выработочной, отделяемых между собой разделительной стенкой. В печах непрерывного действия в области стекломассы газового пространства имеются приспособления, разделяющие зоны варки, освещения, студки и выработки.

Бассейн ванной печи представляет собой резервуар, наполненный стекломассой. Он располагается обычно на самостоятельном фундаменте. В местах, подверженных наиболее сильному разъеданию стекломассой, применяют наружное воздушное охлаждение, системы водяного и испарительного охлаждения. Для кладки дна стен и бассейна в местах изменения его конфигурации применяют брусья специальных фасонов и размеров. Особое значение имеет применение больших «угловых» брусьев при переходе к загрузочным карманам.

В работе [7] предлагается конфигурация дна печи с двойным уклоном от боковых стен к продольной оси печи. Такое решение вызвано тем, что при сопряжении стен и дна ванны под прямым углом тепловые потери в местах сопряжения оказываются намного большими, чем в отдалении от них. Это приводит к резкому снижению температуры в углах бассейна и способствует формированию интенсивных конвекционных потоков стекломассы, которые в основном не благоприятно влияют на процесс варки. Дно и стенки бассейна ванных печей выкладывают насухо. Обычно дно шамотное, а стены частично или полностью сооружают из более стойких огнеупоров (мулитового, циркономулитового, каолинового, кварцевого и др.). Для уменьшения разъедания кладки бассейна ее выполняют из больших брусьев. Дно бассейна толщиной 300 мм komponуют в основном из брусьев 300, 400 и 1000 мм.

Брус своей длинной стороной располагают по продольной оси печи. Для кладки стен в основном применяют брус толщиной 300 мм и меньше, длиной 400 мм и высотой 500 мм. Толщина бруса 300 мм отвечает толщине стены. Для уменьшения длины горизонтальных швов используются брусья большей высоты. В рабочей (варочной) и охладительной частях печи толщина стен бассейна составляет 200÷300 мм. При варке низкочелюстных стекол используют плавленные кварцевые брусья размером 100×250×750 (1000) мм.

В больших ванных печах стенки и кладка свода выполняются независимо друг от друга (рис. 1.2) [8, 9]. Обычно ширина пламенного пространства на 200÷400 мм шире бассейна, что облегчает условия использования металлических опор стен печи. Такая конструкция дает возможность независимо ремонтировать отдельные части печи. Особенно это касается участка бассейна печи, который подвергается наибольшему износу.

Главный свод печи выкладывают несколькими секциями, которые могут иметь длину до 5÷7 м. Для распора свода используются поперечные связки, которые крепятся на колоннах обвязки печи. Во избежание прогара поперечные связки на своде печи не располагают над специальными швами в огнеупорной кладке, компенсирующими температурные деформации огнеупор-

ных изделий при работе печи (температурные швы), которые перекрывают ди-насовым кирпичом. Толщина главного свода колеблется в пределах от 230 до 400 мм в зависимости от длины пролета, которая может составлять 4÷8 м.

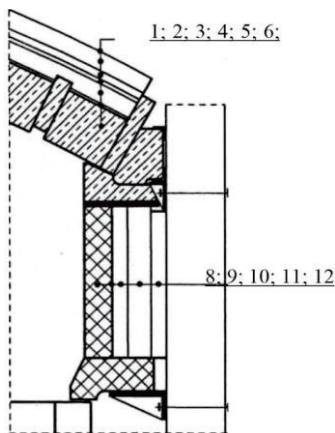


Рисунок 1.2 – Фрагмент поперечного сечения теплоизолированного рабочего пространства ванной печи:

- 1 – динас марки ДСУ–400 мм; 2 – мастика STELLAMUR GLS (зерно $0\div 0,3$ мм) – 10 мм; 3 – LEGRAL 55/05 – 114 мм; 4 – смесь STELLIT GH (зерно $0\div 1$ мм) – 30 мм; 5 – муллитокремниземистый войлок МКРВ–200 – 60 мм; 6 – кирпич пенодиатомитовый КПД–400 (здесь и далее по тексту КПД–400, КПД–400И, КПД–500, КПД–500И – марки кирпича пенодиатомитового) – 114 мм; 7 – мастика STELLAMUR GLS – 5 мм; 8 – AZS–33, NC – 200 мм; 9 – мастика RESIMUR ZM 362 (зерно $0\div 0,5$ мм) – 5 мм; 10 – легковес муллитокорундовый $L = 30\div 114$ мм; 11 – легковес муллитовый $L = 26\div 230$ мм; 12 – кирпич пенодиатомитовый КПД–400÷124 мм

При повышенном температурном режиме толщину свода печи увеличивают. При большом пролете свода для повышения прочности применяют свод с ребрами на внешней поверхности. В таком ребристом своде одну четверть или треть его длины выкладывают параллельными рядами кирпичей, высота которых на $65\div 100$ мм превышает высоту промежуточных рядов из кирпича нормальных размеров.

С целью уменьшения тепловых потерь свода печи с $10\div 15\%$ до $2\div 3\%$ его дополнительно теплоизолируют на участках, где кладка сильно изношена. Подъем свода в печах с поперечным пламенем составляет $1/8\div 1/9$ размера про-

лета, а в печах с торцевыми горелками – $1/7 \div 1/8$ размера пролета. Для предотвращения разрушения огнеупора под воздействием высоких температур в зоне пламенного пространства (разгара) «пят» свода печи и для их усиления у «пят» кладут огнеупорные многомерные кирпичи, которые на $100 \div 200$ мм выше нормальных кирпичей [10].

В современных ваннных печах шихту и бой загружают через широкий выступ бассейна. Для загрузки шихты сплошным слоем или грядами применяют механические загрузчики шихты. Загрузчики подают шихту по всей ширине варочной части печи. Они представляют собой металлические плиты, которые совершают поступательно-вращательные движения под бункером с шихтой, насыпая шихту слоем $30 \div 50$ мм.

Подачу газа в ваннные печи осуществляют главным образом шахтными и иногда галерейными горелками (рис. 1.3) [7]. Ваннные печи могут иметь факел различной формы. Так, например, в рабочем пространстве печи продукты сгорания могут двигаться в поперечном, подковообразном, продольном направлениях по отношению к направлению движения стекломассы.

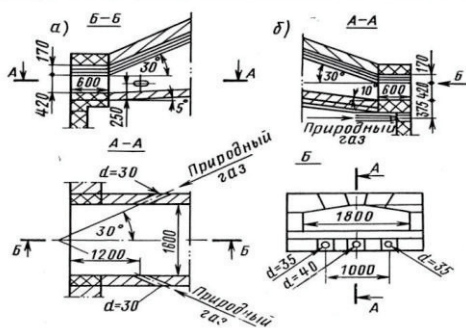


Рисунок 1.3 – Схемы горелочных устройств стекловаренных печей:
а – с боковым подводом топлива; б – с нижним подводом топлива

В ваннных печах больших размеров газы движутся перпендикулярно оси печи. В печах малых размеров обычно движение газов подковообразное, что позволяет удлинить факел и улучшить условия сжигания топлива. Рекуперативные ваннные печи имеют небольшие размеры. Газы в них движутся или в продольном направлении, или подковообразно.

В регенеративных печах применяют, чаще всего, поперечное и подковообразное направление движения газов, а в рекуперативных – продольное и комбинированное (рис. 1.4) [11]. В регенеративных или рекуперативных ван-

ных печах малой и средней производительности горелки чаще всего располагают с торца печи, а газы движутся подковообразно. Это удлиняет факел, позволяет улучшить сгорание топлива и использовать тепло отходящих газов. В средних и крупных ваннных печах обычно применяют поперечное направление газов и горелки располагают на продольных сторонах печи, торцевая стенка имеет садочное окно для загрузки шихты и две-четыре горелки для регулирования температуры. Такое расположение горелок позволяет регулировать распределение температур, давлений и состава газовой среды по длине печи.

В ваннных печах непрерывного действия все стадии процесса стекловарения протекают в определенной последовательности одновременно в различных частях бассейна печи. Смесь шихты и стеклобоя, непрерывно загружаемая в одном конце печи, постепенно проходит зоны бассейна с различными температурными условиями и превращается в однородную гомогенную стекломассу, которая вырабатывается в противоположном конце печи.

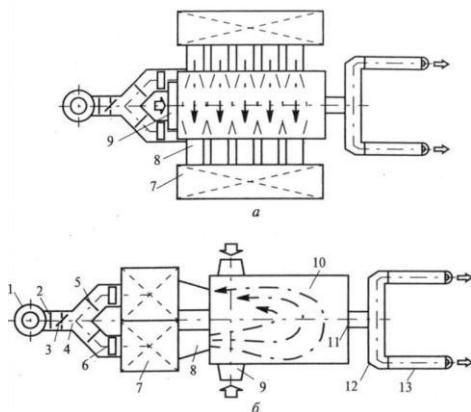


Рисунок 1.4 – Схема ванной регенеративной стеклотарной печи с поперечным (а) и подковообразным (б) направлением движения пламени: 1 – дымовая труба; 2, 3 – отсечной и поворотный шиберы; 4 – дымовые каналы; 5, 6 – подстроечный и переводной шиберы; 7 – регенератор; 8 – горелочное устройство; 9 – загрузочный карман; 10 – варочная часть печи; 11 – проток; 12 – выработочный канал; 13 – канал питателя.

В каждой зоне необходимо поддерживать заданный температурный режим на уровне $1430 \div 1650^{\circ}\text{C}$. Возможность установления определенного температурного режима в ваннных печах непрерывного действия предусматривается конструкцией их рабочей камеры. Для выделения отдельных зон с

различными температурными режимами газовое пространство рабочей камеры разделяют приспособлениями из огнеупорных материалов различной конструкции. Регулирование режима варки стекломассы улучшается при разделении газового пространства рабочей камеры печи перегородками, шиберами или сниженными арками. Поддержанию необходимого температурного режима по длине бассейна печи способствуют и устанавливаемые в стекломассе огнеупорные разделительные приспособления [12].

Скорость газов во влете горелки влияет на форму и длину факела пламени. При высокой скорости газов образуется длинный факел, приводящий к быстрому разрушению экрана, отделяющего выработочную часть от варочной, и к повышению температуры в выработочной части печи. Небольшие скорости газов могут привести к «короткому замыканию» факела, т.е. пламя на выходе из горелки может попасть в другую горелку, сжигая стенки горелки и насадку регенератора. Рекомендуемая скорость газов на входе в горелку должна составлять $10 \div 14$ м/с.

Ширина бассейна печи с подковообразным пламенем составляет $3 \div 4$ м, а его длина достигает 15 м. Соотношение длины и ширины в этих печах приближается к $3/4$. Расстояние между верхним краем входа газов и сводом печи должно быть не менее 300 мм. Площадь варочной части малых печей колеблется в пределах $10 \div 50$ м² [13].

В малых печах без протока для выработки бутылочного и сортового стекла площадь зеркала охлаждающей и выработочной частей составляет $40 \div 50\%$ площади зеркала варочного бассейна. Для подогрева воздуха используют рекуператоры или регенераторы.

Показатели работы некоторых типов стекловаренных печей приведены в работе [14/15]. Теплотехнические аспекты промышленного производства стекла в агрегатах ванного типа непрерывного действия будут рассмотрены в следующих разделах данной работы.

Отметим, что несмотря на интенсификацию технологии варки стекла, совершенствование конструкций и режимов работы стекловаренных печей, удельные затраты тепловой энергии для производства отдельных видов стекол могут составлять от 7,5 до 30 ГДж на тонну стеклоизделий [15], однако на современном этапе такие затраты, для массово выпускаемой продукции, составляют порядка $5,0 \div 6,0$ ГДж на тонну. Подобная энергоемкость стекольного производства в России несколько выше общемировых показателей. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости проведения работ по энергосбережению применительно к регенеративным печам ванного типа, которые останутся основным типом агрегатов для промышленного производства большинства видов стекла на ближайшие десятилетия.

1.2. Применение огнеупорных материалов в ваннных стекловаренных печах

1.2.1. Требования к футеровке и теплоизоляции варочного бассейна

Основным конструктивным элементом плавильных высокотемпературных агрегатов является ограждающая поверхность, отделяющая зону технологического процесса от окружающей среды. Требования к конструкции печных ограждений определяются спецификой работы тепловых агрегатов.

На протяжении десятилетий рабочее пространство стекловаренной печи сохраняет свою классическую форму – прямоугольного параллелепипеда с арочным сводом. В то же время происходит непрерывная эволюция структуры печных ограждений, затрагивающая как горячую, так и холодную футеровку. Особенностью горячей футеровки является то, что температура ее внутренней поверхности приближается к эффективной температуре рабочего пространства печи. Предельным случаем горячего ограждения является футеровка, которая обладает столь высоким термическим сопротивлением, что тепловые потери через нее отсутствуют. Практически этот случай не достижим, но из него вытекает основное требование к холодной футеровке – обеспечить, в пределах разумных размеров, максимально возможное термическое сопротивление кладки. Конкретизация этого требования предполагает задание предельно допустимой температуры на наружной поверхности кладки или теплового потока в окружающую среду. Внешняя оболочка печных ограждений выполняется в виде многослойной стенки, выбор материалов для которой производится с учетом температуры их длительного применения, химической совместимости и требований к уровню тепловых потерь.

В работе [15] рассмотрены исследования на коррозионную стойкость кварцевых огнеупоров. В результате выявлено, что наибольшая стойкость кварцевых огнеупоров проявляется при варке стекол с низким содержанием щелочей ΣR_2O 2÷6%.

Определяющими условиями здесь являются особенности тепловой работы и технологического процесса. При конструировании кладки варочной части современных стекловаренных печей, предназначенных для производства силикатных стекол массового применения, необходимо учитывать [7]:

- непрерывный характер технологического процесса и продолжительность планового межремонтного периода, который в настоящее время принимается не менее 7÷10 лет;

- температурные условия эксплуатации кладки: для зоны пламенного пространства температура кладки может достигать 1580÷1600°C; для зоны технологического процесса – 1450÷1550°C;

– агрессивное воздействие газовой среды, содержащей щелочные компоненты и расплавы стекла, на огнеупоры рабочего пространства и ванны, а также влияние продуктов разрушения огнеупоров на качество стекла;

– необходимость минимизации тепловых потерь в окружающую среду, доля которых в структуре теплового баланса варочной части печи не должна превышать 5÷8% от ее тепловой мощности;

– технологичность монтажа кладки – применение заводской стендовой сборки крупных конструктивных элементов, обеспечивающей сокращение времени строительства печей до 1,5÷2 месяцев;

– снижение стоимости печи за счет применения в соответствующих зонах наиболее подходящих огнеупорных материалов по теплофизическим, физико-химическим и эксплуатационным свойствам (рациональная раскладка).

Обобщая вышеизложенное, можно отметить, что кладка печи выполняет две основные функции – создание условий для осуществления технологического процесса и минимизацию потерь теплоты в окружающую среду.

Отсюда вытекает необходимость разделения материалов, используемых для сооружения варочной части печи на две основные группы. Первая – огнеупоры, составляющие внутреннюю оболочку печных ограждений (футеровка). Вторая – материалы, имеющие максимально возможное термическое сопротивление (тепловая изоляция).

Внешняя оболочка печных ограждений, как правило, выполняется в виде многослойной стенки, выбор материалов для которой производится с учетом температуры их применения, химической совместимости и заданных требований к уровню тепловых потерь.

Таким образом, важнейшими свойствами огнеупорных материалов, используемых при строительстве варочной части стекловаренных печей, являются температура применения и физико-химические характеристики, влияющие на их стойкость к воздействию агрессивной среды. Теплопроводность и другие теплофизические параметры огнеупоров носят информационный характер и учитываются при расчете, и конструировании многослойной кладки. Для материалов второй группы, используемых для тепловой изоляции огнеупоров, важнейшей характеристикой является температурная зависимость теплопроводности. В случае применения многослойной изоляции количество слоев зависит от температуры футеровки. Поскольку температурное поле в рабочем пространстве печи и варочном бассейне чрезвычайно неоднородно, то при проектировании тепловой изоляции печи можно в пределах одного крупного конструктивного элемента использовать различное сочетание материалов.

В современных стекловаренных печах используется широкий перечень огнеупорных материалов, применяемых для сооружения футеровки. Он включает в себя электроплавленные бадделеитокорундовые изделия и фасонный ствольный динас.

Дно ванны варочного бассейна относится к числу наиболее ответственных элементов конструкции стекловаренной печи. Материалы, используемые для кладки дна ванны, должны обеспечить не только заданный уровень температуры придонного слоя расплава, но и физическую безопасность бассейна при его многолетней эксплуатации. Реализация этих условий предопределяет применение многослойной конструкции дна, в которой назначение каждого материала обусловлено его характеристиками.

Анализ структуры кладки дна ванны [16], представленной в таблице 1.1, показывает, что для печей с высоким удельным съемом стекломассы с единицы поверхности бассейна, принципиальное значение имеет высокая коррозионная стойкость бассейна. Актуальность проблемы физической целостности ванны продиктована высокими температурами стекломассы и возможностью попадания в нее примесей металлических материалов и немагнитных металлов, содержащихся в стеклобое. Европейские нормативные требования к содержанию этих примесей в стеклобое (свинец и алюминий, соответственно, не более 5,2 и 5,0 г на тонну стеклобоя) на отечественных заводах, как правило, не выдерживаются. В этой связи защита дна не ограничивается бадделеитокорундовой плиткой и герметизирующим слое мертеля (водный раствор с добавлением не менее 20% технической ортофосфорной кислоты). В качестве третьего защитного слоя используют высокоглиноземистое или Zr-Si (400×400×100 мм) покрытие.

С этой целью также можно использовать огнеупор МЛС-62 с малым коэффициентом теплопроводности, что позволит увеличить термическое сопротивление кладки в варочной зоне бассейна (табл. 1.1).

Поскольку теплоизоляционные материалы имеют сравнительно низкую механическую прочность, то физическая нагрузка от стекломассы и защитных слоев кладки воспринимается донным брусом, который имеет высокий коэффициент теплопроводности. Попытка совмещения в донном брусе таких функций, как восприятие нагрузки и качеств теплоизолятора за счет увеличения толщины или количества рядов донного бруса оказалась неэффективной.

При этом донные брусья с ребрами жесткости раскладываются специально таким образом, чтобы они снимали физические нагрузки с нижних слоев кладки. Размеры (в плане) этих ребер жесткости незначительны, чтобы оказывать существенное влияния на теплопередачу и потери теплоты через дно ванны.

Таблица 1.1 – Структура кладки дна варочного бассейна

Зона загрузки (суммарная толщина не более 1150 мм)		Зона варки (суммарная толщина не более 1150 мм)		Зона освещения (суммарная толщина не более 1550 мм)	
Марка материала	Толщина, мм	Марка материала	Толщина, мм	Марка материала	Толщина, мм
Футеровка		Футеровка		Футеровка	
AZS–33, FC	250	AZS–33, FC	250	AZS–33, FC	250
AZS 05L (мертель)	25	AZS 05L (мертель)	25	AZS 05L (мертель)	25
МЛС–62	100	МЛС–62	100	МЛС–62	100
ШСУ–40	200	ШСУ–40	200	ШСУ–40	200
Теплоизоляция		Теплоизоляция		Теплоизоляция	
ШЛ–0,9	130	ШЛ–0,9	195	ШЛ–0,9	195
КПД–500 И	130	КПД–400 И	65	КПД–400 И	65

Когда необходимость перечисленных слоев кладки предварительно определена, тогда осуществляется выбор для нее теплоизоляционных материалов по температуре в зоне контакта огнеупорного бруса и теплоизоляционного материала. Эта температура должна быть меньше температуры длительной эксплуатации теплоизоляционного материала. Получение необходимой температуры в зонах контакта теплоизоляционных материалов предполагает выполнение расчетов теплопередачи через дно ванны.

Следует отметить, что при выборе теплоизоляционных материалов, безопасность и надежность кладки в условиях длительной эксплуатации представляется более важным аспектом по сравнению с некоторым увеличением потерь тепла в случае применения теплоизоляционных материалов, не приводящих к перегреву огнеупоров дна ванны.

Хорошая теплоизоляция дна ванны приводит к существенному выравниванию температуры стекла по глубине ванны. Для стекловаренных печей с удельной производительностью по стеклу до 2 т/(м²сут) допускается градиент температуры 150°С/м. При хорошей теплоизоляции этот градиент уменьшается более чем в полтора раза и не превышает 90°С/м. Вместе с тем, расчет стационарной теплопроводности не дает полного представления о температурном поле в объеме расплава. Применение ряда конструктивных средств интенсификации конвективных потоков способствует еще большему выравниванию

нию температур в объеме расплава. В результате этого вся внутренняя поверхность боковых стенок ванны подвергается интенсивному воздействию высокотемпературного расплава стекла.

1.2.2. Огнеупорные материалы главного свода печи

Использование стекольного динаса ограничивается только сводом рабочего пространства. Тем не менее, проблема качества стекольного динаса сохраняет свою актуальность, поскольку свод стекловаренной печи является одной из наиболее ответственных частей ее конструкции (приложение А) [17, 18]. Его стойкость, наряду со стойкостью бокового ограждения [19], во многом определяет продолжительность работы печей, которая имеет особое значение для определения межремонтных периодов.

Требования к качеству стекольного динаса и номенклатуре его типоразмеров определяются условиями его использования в стекловаренной печи: максимальная температура 1600°C; обязательная тепловая изоляция; воздействие щелочной газовой среды; большая ширина пролета арочного свода (8÷11 м). При выборе динасовых изделий всегда основное внимание обращалось на максимальную температуру эксплуатации этих изделий, но этого было недостаточно. Оказалось, что для применения этих изделий в стекловаренных печах высокой производительности необходимо учитывать еще другие их характеристики (см. приложение А).

В реальных условиях эксплуатации стекловаренных печей средняя температура свода, как правило, находится в диапазоне 1570÷1580°C. При этом, в печах с подковообразным направлением пламени температура отдельных участков свода может достигать значений, превышающих 1580°C. В этой связи более обоснованным является использование в своде динаса марки ДСК, близкого по свойствам к качественным аналогам зарубежных производителей. Сравнение с маркой DSS показывает, что эксплуатационное преимущество последней заключается лишь в более высокой температуре начала деформации, что позволяет применять ее до температуры 1600°C. В целом, марки динаса характеризуются высокой прочностью на сжатие, что повышает надежность эксплуатации арочных сводов с большой шириной пролета, а также с небольшим содержанием оксида алюминия.

Высокое содержание в динасе Al_2O_3 , при взаимодействии его со щелочной газовой средой, приводит к образованию большого количества жидкой фазы, приводящей к разрушению огнеупора. Важность для качества динаса контроля в нем содержания Al_2O_3 подтверждается присутствием этого параметра в зарубежной нормативно-технической документации.

Стойкость динасового свода в значительной степени определяется газоплотностью кладки. При неплотной кладке наблюдается диффузия паров щелочей через швы. По мере проникновения газов в более холодную область огнеупора происходит их конденсация. Последствием взаимодействия стекло-массы с огнеупорным изделием является образование в нем свищей и каверн, в результате чего возникают сквозные прогары свода. Наряду с этим тепловая изоляция некачественно выполненной кладки свода может привести к преждевременному его разрушению. Отсюда вытекают повышенные требования к геометрии изделий, толщине кладочных швов и герметизации наружной поверхности свода после первичного разогрева печи.

Остановимся на особенностях кладки сводов с большой шириной пролета. Для этих целей применяется фасонный динас. Арка свода печи, как правило, набирается из клиновых и прямых кирпичей с одним замковым рядом. При этом размеры замков определяются по факту схождения кладки к замковому ряду, а его изготовление, ведется растеской или распилкой большего по размеру изделия.

Понятно, что применение нескольких типоразмеров изделий приводит к тому, что нижняя дуга арки будет представлять собой ребристую поверхность, склонную к интенсивной коррозии, разбивка клина прямыми изделиями при большой ширине пролета создает угрозу физической стойкости свода, особенно при его первичном разогреве (выводке) и последующем тепловом изолировании. Строго говоря, свод стекловаренной печи следует рассматривать как объект индивидуального проектирования, целью которого является использование в кладке только клиновых кирпичей. Более того, представляется целесообразной стендовая сборка арки свода с имитацией кладочных швов и установкой замкового ряда.

Как отмечалось выше, разрушение главного свода печи начинается по швам динасовой кладки. Отсюда понятен интерес к качеству растворов для соединения огнеупорных изделий (мертелей), используемых для приготовления раствора. Химический состав мертелей должен строго соответствовать материалу огнеупора, а по наиболее важным компонентам должны выполняться особые требования. Это, прежде всего, касается содержания SiO_2 , Fe_2O_3 и Al_2O_3 . Если в огнеупоре доля оксида кремния SiO_2 равна $96,0 \div 96,2\%$, то для его кладки недопустимо использовать мертель с содержанием оксида кремния $90 \div 94\%$.

Аналогичный подход необходим и к оценке содержания оксида железа Fe_2O_3 , оксида алюминия Al_2O_3 , которые оказывают отрицательное влияние на стойкость кладки. Таким образом, для приготовления кладочного раствора следует использовать обогащенный динасовый мертель, в котором содержание оксида кремния не должно быть меньше, а оксида железа больше, чем их

содержание в огнеупоре. Однозначно не рекомендуется использовать мертель, получаемый из бывшего в употреблении огнеупора. Для повышения коррозионной стойкости швов в раствор следует добавлять дополнительно к норме еще 20% технической ортофосфорной кислоты сорока пятипроцентной концентрации.

Известно, что швы так же, как и кирпичи являются важным элементом огнеупорной кладки. Связующий шов динасового свода – это шов с временно подвижной связью. Поэтому его роль не ограничивается только связующей функцией. Такие швы следует рассматривать как компенсаторы усилия сжатия, которому подвергаются кирпичи при первичном нагреве кладки. При этом, размер зерна мертеля должен соответствовать толщине шва. Если толщина кладочного шва принята большей или равной 2 мм, то верхняя граница крупности зерна мертеля не может быть равной 2 мм. Учитывая тенденцию к уменьшению толщины швов, следует ограничить крупность зерна мертеля величиной 0,8 мм.

1.2.3. Коррозионная стойкость огнеупорных материалов в основных элементах стекловаренных печей

Однородность стекла, получаемого в ваннах печах, зависит от качества огнеупоров ограждения печи и условий их службы. Растворение огнеупорного материала в расплавленных стеклах ведет к образованию пограничных слоев толщиной 10 мм и более. Этот процесс определяется химическими реакциями между материалом огнеупора и расплавом, в результате которых образуются более легкоплавкие, чем сам огнеупор, соединения, растворяющиеся в стекломассе. Пограничный слой неоднороден по своему химическому и минеральному составу. Он может значительно отличаться от основного стекла по плотности.

Под действием гравитационных сил этот слой стекает с поверхности огнеупора бокового ограждения, способствуя интенсификации коррозии, так как в контактном слое стекломассы уменьшается концентрация продуктов разрушения огнеупора. Стекающие пограничные слои накапливаются на дне печи, часто являясь причиной появления пороков стекла. Образование придонных слоев, состоящих из продуктов коррозии огнеупоров, происходит также из-за разрушения дна печи. Таким образом, наиболее масштабным разрушением от физико-химического взаимодействия с расплавом стекломассы подвергается боковое ограждение печи, как часть конструкции печи, которая работает в зоне максимальных температур.

Применение высокостойких огнеупорных изделий в основных элементах конструкции варочной части стекловаренной печи во многом обусловлено

необходимостью обеспечения высокой коррозионной стойкости к воздействию расплава стекла и высокотемпературной газовой среды.

На коррозию огнеупорных изделий в стекловаренной печи влияют следующие факторы, действующие одновременно и в комплексе [10, 20 – 28]:

- качество огнеупора (химический и минеральный составы, структура, свойства);
- конструкция стекловаренной печи;
- характеристика тепловой изоляции;
- производительность печи;
- вид топлива и его распределение по объему печи;
- температурно-временные условия варки;
- интенсивность обмена стекломассы в печи (зависит от удельного сьема, конвекционных потоков, наличии дополнительного электроподогрева, барботажа);
- стабильность технологического процесса;
- окислительно-восстановительные условия варки;
- тип сырьевых материалов и наличие в их составе примесей;
- окислительно-восстановительный потенциал сырьевых материалов;
- состав шихты и ее окислительно-восстановительный потенциал;
- соотношение шихта-стекольный бой;
- концентрация и тип вспомогательных сырьевых материалов;
- летучесть компонентов стекла;
- химический состав, кислотно-основной характер и окислительно-восстановительный потенциал стекла;

Особое значение в процессе коррозии огнеупоров имеет химический состав стекла, его кислотно-основной характер и окислительно-восстановительный потенциал.

Как было отмечено выше, в состав стекол входит большое количество химических элементов, в том числе редкоземельные, тяжелые элементы, галогениды и газообразные компоненты, внедряющиеся в структуру стекла. В связи с этим, разнообразие стекол значительно больше, чем ассортимент огнеупорных материалов, пригодных для качественного стекловарения, хотя основной объем промышленного производства стекла приходится на листовое и тарное, химические составы которых близки (табл. 1.2).

Стеклоустойчивость цирконийсодержащих огнеупоров для кладки боковых стен и пода печи изучалась авторами [23, 29, 30]. Огнеупоры данного типа относятся к классу кислых, так как SiO_2 и ZrO_2 обладают кислотными свойствами. Поэтому наиболее устойчив циркониевый огнеупор в бесщелочных и малощелочных стеклах.

По данным [31] на промышленной линии флоат-стекла установлено, что повышение температуры стекломассы с 1550 до 1600°С при удельных съемах 1500÷2000 кг/(м²·сут) увеличивает скорость достижения минимальной остаточной толщины стенового огнеупорного бруса на 30÷35%, в то время как увеличение съема с 1500 до 2000 кг/(м²·сут) при температуре варки 1550÷1600°С – на 7,9%.

Коррозия огнеупора в агрессивном расплаве многокомпонентной стекломассы (листовое, тарное) заключается в образовании реакционных зон с последовательным возрастанием количества расплава в объеме огнеупора, что приводит к его разрушению [32]. Кинетику реакционного взаимодействия в основном определяет встречная диффузия компонентов огнеупора и расплава [33].

Зависимость скорости коррозии K от температуры является экспоненциальной, т. е. подчиняется уравнению Аррениуса [18, 36]:

$$K = K_0 e^{-E/RT},$$

где K_0 – предэкспоненциальный множитель;

R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);

T – температура, К;

E – энергия активации (расчетное значение), кДж/моль.

Таблица 1.2 – Химические составы листового и тарных стекол

Группа стекол	Массовое содержание, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O (или Na ₂ O)	Fe ₂ O ₃ , не бо- лее	SO ₃ , не бо- лее
Флоат-стекло	72,4	1,4	9,2	3,4	13,3	0,15	0,4
Тарные стекла							
Бесцветное БТ–1	72,0	2,4	11,0	–	14,0	0,1	0,5
Полубелое ПТ–1	71,4	2,5	11,0	–	14,2	0,5	0,4
Зеленое ЗТ–1	70,3	2,2	11,0	–	14,3	0,8	0,3
Коричневое КТ–1	71,1	2,8	11,0	–	14,3	0,5	0,3

Чем выше коррозионная стойкость огнеупора, тем больше энергия активации. По данным [34] для цирконий содержащих образцов при температуре 1400÷1550°С в течение 120 ч в статических условиях получены значения приведенные в таблице 1.3. Таким образом, энергия активации составляет для различных составов стекол от 200 до 400 кДж/моль. Такие значения соответствуют изменению скорости коррозии в 1,5÷2 раза при изменении температуры с шагом в 50°С в диапазоне температур 1300÷1600°С [10, 35].

В соответствии с приведенными в таблице 1.3 данными наиболее агрессивными компонентами расплава стекломассы являются оксиды B_2O_3 , CaO , BaO , PbO , Na_2O . Такие стекла используются для оптических, химико–лабораторных, медицинских изделий.

Таблица 1.3 – Расчетная энергия активации E процесса коррозии для различных составов стекол

Стекло системы	E , кДж/моль
$Na_2O - CaO - SiO_2$	344÷427
$BaO-SiO_2$	247÷344
$PbO-SiO_2$	344÷390
$B_2O_3-SiO_2$	243÷255
$CaO-Al_2O_3-SiO_2$	201÷293

На ряду с этим, исследование зависимости между количеством и составом стекловидной фазы в бакоровых огнеупорах показало, что увеличение содержания стекловидной фазы от 8,5 до 31% снижает их стеклоустойчивость до 30%. В тоже время присутствие в стекловидной фазе двуокиси циркония (более 5% по массе) повышает ее вязкость и, соответственно, увеличивает коррозионную стойкость огнеупора [36].

Согласно [37] коррозия бакура–33 в боросиликатном стекле за 2 месяца работы стекловаренной печи составила 110 мм, а кампания при варке таких стекол составляет 4÷8 месяцев. Следовательно, боросиликатные расплавы отличаются повышенной агрессивностью к цирконий содержащим огнеупорам.

По данным [38] агрессивность некоторых боросиликатных, а также фосфатных стекол к цирконий содержащим огнеупорам снижается, если массовое содержание Na_2O в расплаве не превышает 11%.

Таким образом, в случае варки агрессивных стекол более устойчивыми оказываются корундовые огнеупоры [38 – 40].

Исследование по разработке коррозионностойких плавнелитых хромкорундовых огнеупоров тройной системы $Al_2O_3-Cr_2O_3-SiO_2$ для верхнего строения печи показали, что по комплексу свойств, а также с учетом технологических особенностей и экономического фактора выявлена область оптимальных составов, ограниченная содержанием (по массе) 65÷75% Al_2O_3 , 15÷20% Cr_2O_3 , 10÷15% SiO_2 [41].

Условия работы высокопроизводительных стекловаренных печей предъявляют жесткие требования к качеству огнеупорных изделий. Так применение бадделеитокорундовых изделий не ограничивается варочным бассейном. Они используются в воздушных каналах, в горелочных устройствах, в

каналах через которые стекломасса подается на формующие машины (выработочных каналах) и в других конструктивных элементах печи. В процессе эксплуатации печи износ ее различных частей не равномерный. Поэтому следует усиливать такие конструктивные элементы печи, которые подвергаются наибольшему воздействию агрессивных сред. Для этого необходимы различные огнеупорные и теплоизоляционные изделия (приложение Б), позволяющие уменьшить износ печи и продлить время ее эксплуатации.

Поэтому при рассмотрении свойств огнеупорных изделий следует остановиться на трех аспектах их применения: коррозионной стойкости к расплаву стекла и склонности к образованию пороков, рациональной раскладки в конструкции печи и тепловой изоляции бадделеитокорундовых изделий.

Стекомасса имеет определенный набор пороков различного происхождения: камни, кристаллические, стекловидные и газовые включения. Производственный опыт показывает, что около 15% этих пороков происходит от огнеупорных изделий, что связано с разрушением огнеупорного материала и попаданием его частиц в расплав стекломассы. Склонность к образованию пороков огнеупорного происхождения зависит от технологии производства этих изделий и условий их эксплуатации. Независимо от зоны применения (газовая среда или расплав стекла) на общие характеристики огнеупорного изделия большое влияние оказывает уровень окисления огнеупора. Слабая или плохо контролируемая степень окисления электроплавленного бадделеитокорунда заметно снижает его коррозионную стойкость, а высокое содержание примесей оксидов железа и титана усиливает последствия некачественного окисления.

При контакте со стеклом неравномерно или плохо окисленное огнеупорное изделие склонно к выделению пузырей, вызывающих его активную коррозию на границе раздела трех фаз (огнеупорное изделие – стекломасса – продукты сгорания). Ускоренная коррозия огнеупорного изделия в контактной зоне способствует увеличению выделения в стекло газообразных, стекловидных и кристаллических пороков. Снижения вязкости стекловидной фазы еще более усиливает этот процесс. В рабочем пространстве печи некачественное окисление способствует повышенному выделению на поверхности кладки стекловидной фазы. Генерируемые продукты стекают в стекломассу. Сложный химический состав этих продуктов затрудняет их растворение в стекломассе, и они в виде пороков остаются в стекле. На основе этого можно сделать вывод – в кладке стекловаренной печи необходимо использовать только оксидированные изделия.

Коррозионная стойкость бадделеитокорундовых изделий зависит и от качества внутренней структуры блоков. Структура блока (текстура), определяет размеры и регулярность кристаллов, форму кристаллического каркаса и

уровень плотности блока [42]. Известно, что, во-первых, неоднородная кристаллическая структура и ее низкая плотность способствуют снижению коррозионной устойчивости огнеупорного изделия. Во-вторых, от кристаллической структуры зависит размер и расположение усадочной раковины. Для блоков, имеющих усадочную раковину, ее расположение должно находиться вне зоны максимального износа огнеупорного изделия.

Состояние поверхности огнеупорных изделий и плотность их кладки непосредственно влияют на их стойкости к коррозии. Сквозные трещины, поверхностные дефекты (паутина, микротрещины, сколы, поверхностные царапины) и неплотные швы являются очагами ускоренной коррозии. Серьезную опасность для применения огнеупорного изделия представляют трещины, образующиеся в изделии при запуске печи.

Из-за наличия капиллярного эффекта стекломасса проникает в такие тончайшие трещины и пограничные плоскости, которые кажутся полностью совмещенными. Это способствует расширению трещин и приводит к полному растрескиванию изделия.

Образование трещин при первичном нагреве неразрывно связано с остаточными внутренними напряжениями в изделии. Сам процесс изготовления электроплавленных огнеупоров (литье–охлаждение) генерирует внутренние напряжения внутри застывшего и охлажденного блока. Минимизация поля внутренних напряжений является важнейшей задачей в производстве электроплавленных изделий. Только в этом случае резкое опускание внутренних напряжений не приведет к растрескиванию огнеупорных изделий. Для этого необходимо строго соблюдать технологию производства изделия на всех стадиях его изготовления. Особенно важно контролировать процесс охлаждения, связанный со снятием внутренних напряжений, присущих стекловидной фазе в бадделеитокорундовых изделиях. Как было отмечено выше, для усиления мест повышенного износа печи необходимо располагать полной гаммой огнеупорных материалов.

Рациональная раскладка электроплавленных бадделеитокорундовых изделий в кладке печи предусматривает достижение двух взаимосвязанных целей: обеспечение плановой работоспособности печи и сведение к минимуму затрат на приобретение огнеупорных изделий. Решение этой задачи включает в себя выбор изделий с различным химическим и кристаллографическим содержанием и рациональную раскладку огнеупорных и теплоизоляционных изделий (рис. 1.5 [43]).

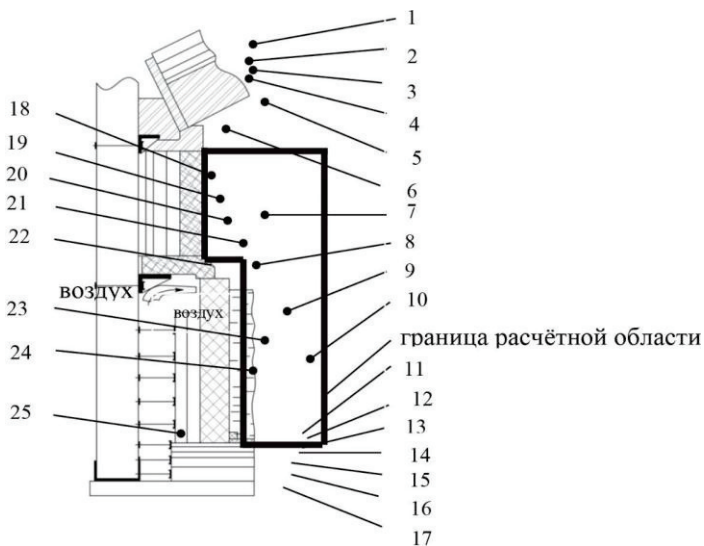


Рисунок 1.5 – Структура стеновой кладки боковых стен бассейна варочной зоны стекловаренной печи с системой воздушного охлаждения:

- 1÷4 – теплоизоляция главного свода; 5, 6 – стекольный динас (главный свод, пятовый кирпич); 7, 8 – электроплавленный огнеупор AZS–36 (41) (брус пламенного пространства 200 мм); 9 – электроплавленный огнеупор AZS–36 (41) (огнеупорный брус варочного пространства 250 мм); 10 – расплав стекломассы (толщина пристеночного слоя 50 мм); 11, 12 – электроплавленный огнеупор AZS–33 (усиление углового стыка, брусок и плитка 120 мм); 13 – цирконово-муллитовый мертель (зерно 0÷3 мм); 14 – плитка цирконовая; 15 – плитка муллито-кремнеземистая 100 мм; 16 – брус алюмосиликатный; 17 – тепловая изоляция; 18 ÷ 22 – многослойная теплоизоляция пламенного пространства; 23, 24 – многослойная изоляция варочного пространства; 25 – элемент каркаса

Химический состав бадделеитокорундовых изделий, содержащих 33% ZrO_2 , хорошо известен. Кристаллы, сформированные эвтектикой бадделеит–корунд и плотно связанные стекловидной фазой, обладают при эксплуатации, высокой коррозионной устойчивостью к расплавам стекол.

Блоки, выполненные из этого материала, успешно эксплуатируются в зоне газового пространства. Варочным участкам ванны с температурой поверхности стекломассы 1350÷1500°C и встроенным в ванну конструктивным элементам, требуются высокоплотные огнеупорные изделия с содержанием

ZrO₂ 33÷41%. Оптимальный выбор электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров позволяет достаточно заметно снизить финансовые затраты на строительство печи.

Необходимо отметить, что рациональная раскладка огнеупорных изделий может быть оправдана только при условии, что производитель этих изделий гарантирует постоянство качества и точное воспроизведение химического и кристаллографического состава выпускаемой продукции.

Рациональная раскладка огнеупоров должна базироваться на четко сформулированных условиях их эксплуатации. Основными из них являются: химический состав стекла; удельный съем стекломассы; использование дополнительного электроподогрева; продолжительность эксплуатации печи и возможность применения эффективной тепловой изоляции.

Конструктивно толщина боковых стен рабочего пространства ограничена размером 570÷600 мм. Огнеупорный слой кладки (200 мм) выполняется электроплавленным бадделеитокорундовым огнеупором с 33% содержанием ZrO₂. Средняя плотность брусьев с нормальной усадочной раковинной составляет 3,45 т/м³. Существующие конструкции боковой стены предусматривают установку четырех слоев изоляции. При суммарном термическом сопротивлении стены 1,67 (м²·°C)/Вт и температуре ее наружной поверхности $t_{нар}=103,2^{\circ}\text{C}$ плотность теплового потока в окружающую среду составляет $q_{нар}=900,4 \text{ Вт/м}^2$.

1.3. Особенности применения и условия работы тепловой изоляции в высокотемпературных агрегатах

Систематическое повышение стоимости углеводородного топлива заставляет стеклопроизводителей пересмотреть свое отношение к затратам тепловой энергии на реализацию технологического процесса. Становится экономически неоправданной длительная эксплуатация стекловаренной печи с высоким удельным расходом теплоты. Значение теплоты, превышающее 5 МДж на 1 кг сваренной стекломассы, переводит производство большинства видов стекла в критическую экономическую область. Известно, что возможность достижения высокой производительности стекловаренной печи находится в прямой зависимости от уровня тепловых потерь через кладку в окружающую среду.

Высокий коэффициент теплопроводности электроплавленных бадделеитокорундовых и динасовых огнеупоров предполагает их обязательную тепловую изоляцию (приложение В, табл. 1.4), эффективность которой может быть задана температурой наружной поверхности или удельным тепловым потоком через кладку.

Предъявляя высокие требования к качеству динаса и мертеля, следует обращать внимание на рациональную эксплуатацию свода печи. Одним из основных способов повышения срока службы кладки свода, является его тепло-вая изоляция, позитивная роль которой проявляется в трех случаях.

Во-первых, в тщательной герметизация внешней поверхности кладки, выполняемая до установки изоляции.

Во-вторых, в снижении градиента температуры по толщине огнеупорного кирпича. Так, для неизолированного свода, толщиной 400 мм при внутренней температуре 1590°C этот градиент составляет 3,30°C/мм. При эффективной тепловой изоляции ($R=0,99 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$) температурный градиент уменьшается до величины 0,58°C/мм.

В-третьих, в уменьшении тепловых потерь в окружающую среду, что позволяет снизить температуру варки и уменьшить риск локального перегрева кладки.

Рассмотрим случай, когда огнеупорный кирпич марки ДСК изолирован динасовым легковесом ДЛ 1,0 толщиной 114 мм, на который уложен слой МКРВ–200 толщиной 80 мм [7]. В результате наружная температура свода уменьшается с 268°C (неизолированный свод) до 115°C. Если ограничиться слоем ДЛ 1,0, то наружная температура снизится до 196°C. При установке ДЛ 1,0 на ребро ($S=230 \text{ мм}$) термическое сопротивление возрастает до 0,54 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$, а температура наружной поверхности уменьшается до 159°C. Отметим, что добавление к слою ДЛ 1,0 еще слоя МКРВ–200 толщиной 80 мм позволяет снизить наружную температуру до 103°C, так как термическое сопротивление $R=1,22 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ тепловой изоляции в этом случае увеличивается. Из этого примера следует, что увеличение толщины динасового легковеса не позволяет добиться существенного повышения термического сопротивления кладки без применения теплоизоляционных материалов с малым коэффициентом теплопроводности.

Для сравнительной оценки различных вариантов тепловой изоляции наиболее целесообразным является сопоставление стоимости 1 м² изоляционных конструкций; в данном случае учитываются толщины изоляционного слоя, практически принимаемые в соответствии с товарной толщиной изоляционных изделий, из которых выполнена конструкция.

Иногда при сравнительной экономической оценке изоляционных конструкций предлагается учитывать сроки их службы, расходы на ремонт и частичное вторичное использование изоляционного материала после демонтажа. Эти данные могут иметь неодинаковые значения для разных изоляционных конструкций. Согласно этому способу сравнительной оценки наиболее

экономичной окажется та конструкция, у которой наименьшей является следующая величина (для трубопроводов – руб./ $(\text{год}\cdot\text{м})$, для плоских и малоизогнутых поверхностей – руб./ $(\text{год}\cdot\text{м}^2)$):

$$\rho = \frac{S_0 - \frac{S_m \cdot n}{100} + \frac{S_c \cdot m}{100}}{\tau}, \quad (1.1)$$

где S_0 – стоимость всей изоляционной конструкции с учетом стоимости монтажа, руб./м для трубопроводов и руб./ м^2 для плоских и малоизогнутых поверхностей;

S_m – стоимость изоляционного материала в изоляционной конструкции, руб./м для трубопроводов и руб./ м^2 для плоских и малоизогнутых поверхностей;

S_c – стоимость всей изоляционной конструкции, руб./м для трубопроводов и руб./ м^2 для плоских и малоизогнутых поверхностей;

τ – срок службы изоляции, лет;

n – величина вторичного использования материала, процентов от стоимости;

m – величина, учитывающая затраты на ремонт изоляционной конструкции за весь срок ее службы, процентов от стоимости.

Величина ρ в выражении (1.1) алгебраически наиболее точно приводит к одинаковым условиям стоимость сравниваемых изоляционных конструкций. Однако практическое применение формулы (1.1) оказывается затруднительным, поскольку для величин τ , n и m не установлены достаточно обоснованные значения, а имеющиеся в литературе сведения противоречивы.

Срок службы изоляции τ зависит от многих факторов: от механической прочности изоляционного материала, из которого состоит изоляционная конструкция, от способов крепления и качества монтажа изоляционной конструкции n , наконец, от условий эксплуатации. Существенное влияние на срок службы изоляционной конструкции оказывают вид и качество покровного слоя. Так, изоляционные конструкции с покрытием из листового алюминия и из оцинкованной или хорошо окрашиваемой кровельной стали являются более долговечными, чем конструкции, имеющие штукатурный покровный слой. Часто срок службы изоляции определяется сроками ремонта оборудования, во время которого изоляция частично или полностью разрушается.

Следует все же считать, что наибольший срок службы имеют мастичные изоляционные конструкции в силу их монолитности. Меньший срок службы имеют изоляционные конструкции из штучных изделий, крепление которых осуществляется с помощью проволоки. Такое крепление под действием меха-

нических воздействий, явления коррозии проволоки и крипа при высоких температурах со временем ослабевает и изоляционный слой разрушается. Сроки службы оберточной и набивной изоляционных конструкций следует считать совпадающими со сроками службы изоляционных конструкций из штучных изделий.

В зависимости от рода изоляционного материала, способов крепления изоляционной конструкции, вида покровного слоя и условий эксплуатации срок службы изоляции горячих поверхностей можно оценить в следующих пределах [44]:

- а) мастичные изоляционные конструкции – $10 \div 15$ лет;
- б) изоляционные конструкции из штучных изделий, набивные и оберточные – $5 \div 10$ лет.

Для изоляционных конструкций, установленных на вибрирующих объектах и под открытым небом, срок службы следует считать наименьшим.

Расходы на ремонт изоляции m обычно оцениваются как доля первоначальных затрат на устройство изоляции. Эти расходы принимаются в пределах $10 \div 30\%$ первоначальных затрат [23].

Использование изоляционного материала после демонтажа изоляционной конструкции (так называемое вторичное использование) m выражается в процентах стоимости собственно изоляционного материала, заложенного в конструкцию. Очевидно, что для разных видов теплоизоляционных материалов и изделий процент обратного использования может иметь разное значение, зависящее как от свойств самого материала, так и от условий его эксплуатации. Наибольший процент обратного использования имеют жесткие изделия ($40 \div 60\%$ и более).

Таблица 1.4 – Расчетная зависимость удельной теплоемкости c изоляционных материалов от температуры

№ п/п	Изоляционный материал	c , кДж/(кг·°С)
1	Минеральная вата	$0,8 + 0,0005 \cdot t$
2	Диатомовые изделия	$0,8 + 0,0003 \cdot t$
3	Перлит	$0,88 + 0,00042 \cdot t$
4	Вермикулит	$0,74 + 0,00038 \cdot t$
5	Перлитобетонные, перлитцементные изделия	$0,86 + 0,00046 \cdot t$
6	Известково-кремнеземистые изделия, вулканит	$0,88 + 0,00055 \cdot t$

Некоторые теплоизоляционные материалы, например заливной пенобетон, вообще не могут быть использованы вторично.

1.3.1. Методы охлаждения стеновых брусьев варочного бассейна

Современные требования к интенсификации процессов стекловарения приводят к необходимости повышения температуры варки стекломассы, теплового изолирования основных элементов печей, что влечет за собой повышение температуры в рабочем пространстве печи и сокращает сроки службы огнеупорных брусьев варочного бассейна.

Уменьшение длительности кампании печи приводит к значительным капитальным затратам при холодном ремонте, а также влечет за собой прекращение выпуска продукции, что снижает экономические показатели стеклового завода.

Базовым способом продления стойкости огнеупоров является локальное охлаждение стеновых брусьев печи на линии зеркала стекломассы. Ряд технических решений, освещенных в работах [45 – 49], позволяет реализовать охлаждение этих элементов стекловаренных печей.

На предприятиях стекольной промышленности применяют три способа охлаждения стеновых брусьев – испарительное, водяное, воздушное.

Наиболее эффективным, с точки зрения снижения температуры поверхности огнеупорных брусьев, является испарительное охлаждение. В работах [50, 51] приведены данные об использовании названного способа охлаждения на ряде предприятий России и Украины. Так, на Запорожском стекольном заводе при участии Института использования газа АН УССР была рекомендована конструкция охлаждаемых элементов, изготовленная из плоских коробов толщиной 10 мм. Барабан-сепаратор изготовлен из стали толщиной 10 мм длиной 5 м при диаметре 1,5 м. Паропроизводительность установки составила 80÷500 кг/ч. Внедрение СИО (системы испарительного охлаждения) позволило продлить межремонтный срок до 180 суток, что в три раза превышает длительность кампании без данной системы.

Водяное охлаждение элементов печей [52] применяется в производственной практике, однако не получило широкого распространения в силу ряда причин. Во-первых, наличие в технической воде солей временной жесткости вызывает на охлаждаемых поверхностях образование слоя накипи, наличие которого существенно снижает интенсивность теплопередачи. Таким образом применение для этих целей технической воды не позволяет нагревать ее до температуры выше 45°C из условий недопустимости накипеобразования. Во-вторых, водяное охлаждение требует значительных расходов воды, прокладки сложных коммуникаций, строительства дополнительных сооружений. В-третьих, возникают трудности с использованием отводимого низкопотенциального тепла. Вышеизложенные факторы заставляют предприятия отказываться от использования систем водяного охлаждения.

Воздушное охлаждение получило наибольшее распространение на стекловых заводах России и стран СНГ [45, 46, 53] ввиду относительной простоты такого рода систем, принцип работы которых заключается в подаче вентиляторного воздуха на охлаждаемую поверхность через щелевидные сопла или специальные каналы. Как правило, обдуву подвергается наружная поверхность стен на линии зеркала стекломассы. Средний удельный объемный расход воздуха на 1 м^2 охлаждаемой поверхности в начале кампании составляет $V_{\text{возд}}=0,9 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, а в конце кампании в случае сильного коррозионного износа боковых стен $V_{\text{возд}}=1,2\div 2,0 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. При этом мощность приводных электродвигателей составляет от 60 до 180 кВт.

Существуют технические решения, позволяющие отводить воздух, нагретый вследствие взаимодействия с высокотемпературной поверхностью огнеупорного бруса, в систему воздухообеспечения горелочных устройств [54].

Применение воздушного охлаждения стен варочного бассейна стекловаренных печей позволяет продлить срок службы стеновых огнеупорных изделий, а, следовательно, общую длительность кампании печи. Однако, применение систем данного вида не приводит к существенному увеличению кампании печи и не дает значительного снижения наружной поверхности стеновых брусьев, температура которых достигает $180\div 200^\circ\text{C}$. Кроме того, как правило, нагретый воздух поступает в помещение цеха, ухудшая условия труда персонала. Также остается угроза прорыва расплава стекломассы при полном разрушении стеновых брусьев.

Следует отметить, что применение систем воздушного охлаждения не создает значительных градиентов температур по сечению огнеупора, наличие которых может вызвать преждевременное разрушение стенового ограждения [23].

Тем не менее, применение системы воздушного охлаждения на сегодняшний день являются наиболее распространенным способом снижения температуры огнеупорных брусьев и как следствие, уменьшения скорости коррозионного износа этих элементов кладки варочного бассейна.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДЕНИЙ ВАРОЧНОГО БАССЕЙНА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

2.1. Выбор темы, постановка цели и задач научного исследования

Сложность процессов теплообмена в современных стекловаренных печах и ограниченные возможности экспериментального исследования теплового состояния огнеупорных изделий при этих процессах обуславливают необходимость применения методов математического моделирования. При этом достоверность вычислительного эксперимента с использованием полученных математических моделей должна подтверждаться данными экспериментальных физических исследований, проводимых на стекловаренных печах или на их моделях.

Рассматривая варочный бассейн печи, можно выделить ряд зон огнеупоров, период службы которых определяет длительность работы всей стекловаренной печи, а именно: боковое ограждение печи в зоне варки; влеты горелок; огнеупорные изделия в районе протока стекломассы.

Коррозионным процессам подвержены все поверхности, соприкасающиеся с расплавом стекломассы. Определяющим параметром при расчете скорости коррозии является температура расплава. Очевидно, что огнеупорные изделия в зоне варки корродируют быстрее всего. Помимо этого, наличие воздушного охлаждения на уровне зеркала стекломассы усложняет прогнозирование теплового и геометрического состояния огнеупорного бруса.

Все названные факторы обуславливают выбор в качестве объекта исследования боковое ограждение бассейна стекловаренной печи как наиболее подверженное разрушению под влиянием высоких температур и физико-химического взаимодействия с расплавом стекла.

Случай одномерного распространения фронта коррозии в огнеупорном стеновом бруске на уровне зеркала стекломассы с учетом различных режимов работы системы воздушного охлаждения рассмотрен в [55 – 57]. В развитие этого исследования изучено движение двумерного фронта коррозии стенового бруска варочного бассейна [23, 24, 41, 58]. Приведенные работы экспериментальные, благодаря которым возможно создать математическую модель варочного бассейна, которая позволит проводить расчеты теплового состояния и коррозионной стойкости ограждения в соответствии с режимными параметрами.

Расчет температурных полей в огнеупорном ограждении выполняется методом конечных элементов (МКЭ) [59]. Данный метод позволяет любую непрерывную величину аппроксимировать дискретной моделью, которая стро-

ится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. При построении дискретной модели поступают следующим образом:

- в рассматриваемой области фиксируется конечное число точек (эти точки называются узлами);

- значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена;

- область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

Среди преимуществ МКЭ, благодаря которым этот метод используется в настоящей работе, можно назвать следующие:

- свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми, это позволяет применить метод к телам, составленным из нескольких материалов;

- криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью криволинейных элементов, таким образом, методом можно пользоваться для областей со сложной геометрией границы;

- возможен учет теплофизических свойств материалов в зависимости от температуры.

Конечноэлементная (КЭ) сетка, которая состоит из треугольных элементов накладывается на модель, и в первом приближении, является регулярной (рис. 2.1). То есть длина ребра всех элементов разбиения одинакова. В последующих приближениях граница соприкосновения огнеупорного материала с расплавом стекломассы становится криволинейной и на площади с криволинейными границами накладывается сетка с элементами, имеющими произвольную длину ребра.

Количество тепла, подводимого к телу или теряемого им, может быть вычислено, если известно распределение температуры. Температурное поле, кроме того, влияет на распределение термических напряжений. Термические напряжения имеют место в каждом теле, в котором существуют градиенты температуры и которое не может свободно расширяться во всех направлениях.

Уравнение теплопроводности в сплошной среде описывает случай стационарного теплообмена в твердом теле или системе твердых тел и имеет вид

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + q_v = 0, \quad (2.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности в направлении оси x, y, z , Вт/(м°C);

q_v – мощностью внутренних источников теплоты, Вт/м³;

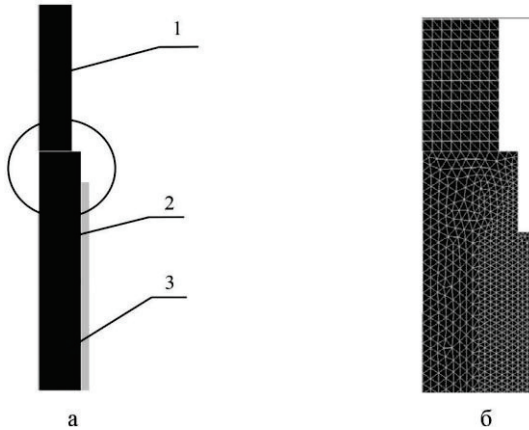


Рисунок 2.1 – Фрагмент поперечного расчетного сечения бокового ограждения ванны печи в начале кампании: а – конфигурация бокового ограждения в начале кампании печи; б – КЭ сетка на уровне зеркала стекломассы;

- 1 – огнеупорный брус зоны пламенного пространства (бакор–33);
- 2 – пристенный слой расплава стекломассы;
- 3 – огнеупорный брус варочной зоны (бакор–41)

С этим уравнением связывают различные типы граничных условий. Если известно распределение температуры на поверхности тела для каждого элемента во времени, то

$$t_c = f(x, y, z, \tau), \quad (2.2)$$

Если на границе тела происходит конвективный теплообмен, то задается температура окружающей среды $t_{ж}$, температура поверхности тела $t_{жс}$ и коэффициент теплоотдачи α , то есть

$$q = \alpha(t_c - t_{ж}), \quad (2.3)$$

В случае, когда приходится определять тепловое взаимодействие между твердыми телами или между твердым телом и окружающей средой приходится решать сопряженную задачу. При решении таких задач должны выполняться условия равенства температур и тепловых потоков по обе стороны границы раздела:

$$t_1(x, y, z) = t_2(x, y, z), \quad (2.4)$$

где t_1, t_2 – температуры соприкасающихся сред, °С;
 x, y, z – координаты поверхности раздела сред.

2.2. Особенности процессов теплообмена в стекловаренных печах. Задание граничных условий

2.2.1. Теплообмен в газовом пространстве варочного бассейна

Для проведения исследования теплового состояния и скорости коррозионного износа бокового ограждения создана геометрическая модель, воссоздающая элементы бокового ограждения печи (рис. 2.2). При этом были введены некоторые упрощения, облегчающие проведение вычислительного эксперимента и не оказывающие значительного влияния на точность вычислений.

Граничные условия и характер теплообмена для рассматриваемой геометрической схемы имеют некоторые особенности:

- по внутренней поверхности огнеупорного бруса в зоне пламенного пространства и наружной поверхности огнеупорного бруса по всей ее высоте задаются граничные условия третьего рода;

- на наружной поверхности ограждения в зоне работы системы принудительного воздушного охлаждения, коэффициент теплоотдачи изменяется в диапазоне $200 \div 360 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$;

- вне зоны принудительного охлаждения коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции изменяется в диапазоне $18 \div 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$;

- по глубине расплава стекломассы задается изменение температуры, обусловленный современными технологическими требованиями, то есть условия теплообмена выражаются граничными условиями первого рода. Перепад температур между зеркалом стекломассы и подом печи колеблется в диапазоне $90 \div 150\text{°C}$;

- тепловые потери через нижний торец стенового бруса печи равны нулю (идеальная тепловая изоляция);

- тепловые потери через «пятовый» кирпич приняты в диапазоне $4200 \div 4500 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что соответствует показателям современных печей;

- излучение факела пламени рассматривается как излучение с поверхности тела в соответствии с законом Ламберта;

- процесс передачи тепла в стекломассе – радиационно–кондуктивный;

- пристенный слой охлажденной стекломассы толщиной 5 мм, является дополнительным термическим сопротивлением, теплофизические свойства которого зависят от температуры;

- по мере разъедания стенового огнеупорного бруса, образовавшаяся в нем полость заполняется расплавом стекла;

- перепад температуры от зеркала стекломассы до уровня пода поддерживается постоянным.

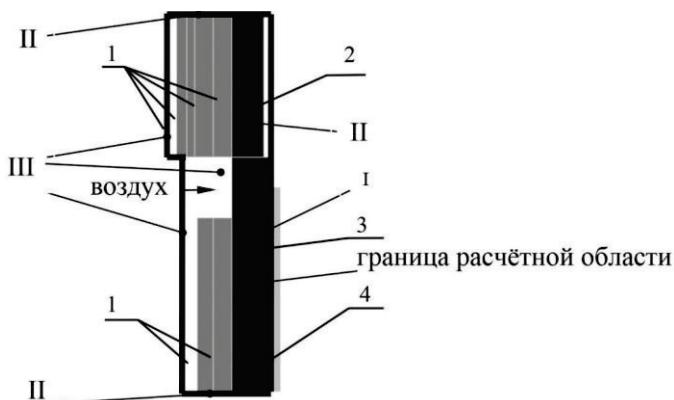


Рисунок 2.2 – Геометрическая модель сечения бокового ограждения ванной печи при наличии теплоизоляционной конструкции:

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 – пристеночный слой расплава стекломассы; I – зона контакта расплав стекломассы огнеупорный материал (граничные условия первого рода); II – зоны контакта огнеупорный брус – пятовый кирпич и огнеупорный брус под печи (граничные условия второго рода); III – зона контакта продукты сгорания – огнеупор и огнеупор – окружающая среда (граничные условия третьего рода)

Для упрощения расчетов лучистого теплообмена в стеклоплавильных печах обычно принималось допущение о том, что распределение температур и концентраций компонентов продуктов сгорания газообразного топлива по сечению газового потока является равномерным. В действительности температура по высоте печного пространства отличается, и это имеет важное значения для изучения условий теплообмена в печи. Причины возникновения неравномерности температуры по высоте печного пространства различны. Они связаны с особенностями горения топлива, особенностями теплообмена и движения продуктов сгорания (газов) внутри печного пространства. Так как высота печи зачастую больше толщины факела пламени, то в верхней части объема над факелом имеются застойные зоны и обратное движение газов по направлению к корню факела. В качестве оптимальной рекомендуется степень черноты факела пламени $0,5 \div 0,6$ [60].

Наряду с трехатомными газами в пламенном пространстве стекловаренной печи имеются взвешенные твердые частицы углерода и шихтовых мате-

риалов, попадающие в газовый поток при загрузке в печь шихты. Поэтому излучение в печи имеет свойства, промежуточные между селективным излучением трехатомных газов и серым излучением облака твердых частиц.

В отличие от излучения непрозрачных твердых тел и частиц, излучение газов характеризуется крайней нерегулярной зависимостью от длины волны [61]. При этом поглощение или испускание излучения газом, которое имеет место лишь на отдельных участках спектра (полосах поглощения) и в ближней инфракрасной области (0,7÷2,5 мкм) [62], обусловлено переходами между вращательными уровнями молекул.

Наибольший вклад в излучение газообразных продуктов сгорания органических топлив вносят трехатомные газы CO_2 и H_2O . Центры основных полос поглощения указанных газов расположены на длинах волн, мкм: CO_2 – 15,0; 4,26; 2,70 и H_2O – 6,27; 2,7; 1,88; 1,38.

Следует отметить, что при температурах, которые имеют место в печах, основной перенос энергии излучения происходит в области от 0,9 до 10 мкм. Поэтому вклад полосы CO_2 с центром 4,26 мкм, за которым следует вклад полосы на длине волны 2,70 мкм, обусловлен совместным излучением углекислого газа и водяного пара. Вследствие значительной ширины (от $\lambda < 5$ мкм до $\lambda > 8$ мкм) полоса H_2O с центром 6,27 мкм также вносит заметный вклад в суммарный перенос излучения.

3.1.1. Теплообмен в объеме стекломассы

Стекло, как и продукты сгорания, также является селективным поглотителем лучевой энергии, и имеет, так называемое «окно прозрачности», которое приходится приблизительно на интервал 0,4...4,5 мкм. В этом «окне прозрачности» существует два спектральных участка. Первый – с относительно слабым поглощением ($K_\lambda = 0,1...1,0 \text{ см}^{-1}$) приходится на длину волн от 0,4 мкм до 2,7 мкм. Второй – с умеренным поглощением ($K_\lambda = 2...5 \text{ см}^{-1}$) приходится на длину волн от 2,7 мкм до 4,5 мкм [62]. Для еще больших длин волн стекло – практически непрозрачный материал.

Таким образом, для расчета теплообмена в стекломассе необходимо определить спектральный состав излучения, которое попадает на зеркало стекломассы. Та его часть, которая приходится на длину волн первого спектрального участка, может распространяться на существенную глубину стекла и осуществлять термическое действие во всем объеме стекломассы. Излучение второго спектрального участка тоже произведет похожее термическое действие, хотя и в меньшей мере. Излучение, которое находится за пределами «окна прозрачности», вызывает только поверхностный нагрев.

Современная теория излучения газов базируется на интегральных величинах. Например, степень черноты вычисляется по номограммам и позволяет корректно вычислять теплопередачу от пламени к стенам пламенного пространства печи лишь на непрозрачный материал. С точки зрения последствий термического действия излучения, почти безразлично каким является спектральное распределение интенсивности излучения, падающего на материал, который можно представить с серым телом.

Для стекла с селективными радиационными характеристиками использование этого подхода может привести к ошибкам вычисления теплового излучения.

Принцип вычисления лучистого теплообмена в зоне горения внутри стекловаренных печей заключается в том, что рассматриваемый замкнутый объем горения реально состоит из трех тел, которые находятся в состоянии радиационного равновесия. Такими телами в нашем случае являются огнеупорные стены пламенного пространства, зеркало стекломассы, которые образуют замкнутую полость, и продукты сгорания (газ), равномерно заполняющий эту полость.

Допускается, что каждое такое тело по всей своей протяженности имеет приблизительно постоянную температуру и радиационные характеристики (степени черноты). Считается, что их поверхности, в том числе и зеркало стекломассы, поверхностно поглощают и излучают теплоту, а газы – объемно.

Каждые поверхностно излучающее теплоту огнеупорные стенки и зеркало стекломассы (поверхностные излучатели) выпускают некоторые потоки теплоты. Эти потоки состоят из двух принципиальных составляющих. Первая составляющая – собственное (первичное) излучение, которое определяется температурой тела, степенью черноты и площадью его поверхности. Вторая составляющая – излучение, которое поступает от двух других тел, падает на эту поверхность и частично ею отражается. Это имеет место, если степень черноты такой поверхности меньше единицы. По большей части, для огнеупорных стен и зеркала стекломассы значения степени черноты $\varepsilon = 0,8 \div 0,9$.

Например, зеркало стекломассы излучает собственный тепловой поток, который определяется его температурой и степенью черноты, и отраженный тепловой поток, если $\varepsilon < 1$. Отраженный поток имеет три источника: продукты сгорания топлива, огнеупорные стены и стекломасса. От газов тепло поступает и непосредственно на зеркало стекломассы и на огнеупорные стены. Огнеупорные стенки отражают часть теплоты снова на зеркало стекломассы. Поверхность стенок частично «видит» сама себя (замыкается на себя). Стекло-масса сама себя не «видит», поэтому ее излучение вернется к ней только после отражения от огнеупорных стен.

Каждый тепловой поток, который преодолевает газовое пространство, частично ослабляется в нем, как в поглощающей среде.

Количество последовательных отражений может быть любым. Итоговые значения лучистых тепловых потоков могут быть представлены как члены сходящегося ряда. При достаточно больших их значениях такие ряды становятся быстро сходящимися. Поэтому достаточно учитывать только первые члены ряда.

С помощью аналогичных рассуждений можно проследить природу эффективного излучения огнеупорных стен огневого пространства печи. Но для газов эффективное излучение равняется собственному, и отражение в них отсутствует.

Каждое рассмотренное тело не только испускает излучение, но и получает эффективное излучение других тел, которые оно «видит». Это излучение поступает также ослабленное в газовом слое.

Система из этих тел не является адиабатической, поэтому при составлении теплового баланса излучения огнеупорных стен и зеркала стекломассы поступление теплоты будет всегда превышать потери. Только для продуктов сгорания будем иметь обратный баланс. Результирующий поток, который пересекает поверхность боковой стенки или зеркало стекломассы, определяется как разница между поступлением и потерями теплоты.

В приведенной системе из трех тел наивысшую температуры имеет газ ($1600 \div 1750^\circ\text{C}$). Самую низкую – зеркало стекломассы ($1400 \div 1550^\circ\text{C}$). Стенки рабочего пространства печи имеют промежуточные значения температур ($1450 \div 1600^\circ\text{C}$). Поэтому для зеркала стекломассы источником тепловой энергии являются газы и стенки пламенного пространства печи, которые всегда имеют большие температуры.

Определяющими параметрами такого радиационного теплообмена являются температуры всех тел, их степень черноты, а также протяженность их в пространстве и коэффициенты взаимного облучения этих тел. Степень черноты газов вычисляется с помощью номограмм как функция их давления, температуры и габаритов пламенного пространства.

Результирующий тепловой поток, который достигает зеркала стекломассы, обеспечивает необходимое ее нагревание на всех уровнях. Сквозь стекломассу тепло передается совместно излучением и теплопроводностью. Радиационный тепловой поток, падающий на огнеупорные стенки рабочего пространства печи, а также тепловой поток, достигший дна бассейна, передается теплопроводностью через ограждение в окружающую среду. Таким образом, в общем тепловом балансе печи составляющая суммарных потерь теплоты определяется процессами лучистого теплообмена и теплопроводности.

Методика расчетов лучистого теплообмена в рабочем пространстве ванной печи заключается в составлении тепловых балансов для системы вышепеченных трех тел пламенного пространства печи. В расчетах задаются температуры тел, а также их степени черноты. Для стенок огневого пространства и зеркала стекломассы они принимаются, а для газов – вычисляются. Также определяются пространственно-геометрические параметры.

Решение уравнений этой системы позволяет найти функциональную зависимость между тремя температурами тел, тремя степенями их черноты и комбинациями коэффициентов взаимного излучения. Задача решается по следующей схеме: вычисляется температура газов, при которой с учетом других параметров температура зеркала будет иметь необходимое значение. Из системы могут быть получены уравнения, которые позволят вычислить плотность суммарного радиационного потока, который будет направлен на зеркало стекломассы.

Такой подход имеет определенные недостатки. Они являются следствием того, что стекло является объемным и селективным поглотителем и излучателем лучистой энергии. Первичное поглощение радиационного потока от газов и стенок пламенного пространства печи будет происходить не только на поверхности, но и по глубине слоя стекломассы. Аналогично этому, обратный радиационный поток от стекломассы будет брать свое начало не только с ее поверхности, но и из глубинных слоев стекломассы.

Предлагается сформулировать математическую модель для комплекса из газа пламенного пространства и стекломассы. Составляющие этого комплекса являются объемным селективным поглотителем и излучателем лучистой энергии. В одномерной постановке задачи исследуемая система должна условно ограничиваться сверху огнеупорной стенкой свода пламенного пространства, а снизу – огнеупорным донным брусом. Такой подход будет достаточно корректным, поскольку протяженность всей системы в горизонтальных направлениях значительно больше, чем в вертикальном направлении.

В рамках этого раздела может быть определен только радиационный поток, который из пламенного пространства действует на зеркало стекломассы. Этот тепловой поток является первичным, причем, излучается газом и стенками. В зависимости от спектрального состава стекломассы он будет или задерживаться в поверхностном слое или проникать на глубину стекломассы.

Обратный поток от стекломассы на данной стадии не может быть определен. Он будет брать свое начало на различных глубинах стекломассы и, даже, с поверхности бруса на дне стекловарочного бассейна. Для расчета таких потоков необходима информация о температурном поле в толще стекломассы. Затем предусматривается расчет температурного поля в слое стекломассы вместе с донным брусом.

Как уже отмечалось выше, доля радиационных потоков газа и огнеупорных стенок на слой стекломассы с ее высокой селективностью поглощающей способности будут зависеть от спектрального интервала инфракрасного излучения стекломассы.

Спектр излучения стенок, которые считаются «серыми», по закону Планка хотя и является сплошным, но является очень неравномерным по длинам волн. Дополнительное селективное излучение газов еще больше усложняет расчеты радиационного теплообмена. Для учета этих обстоятельств предлагается «ступенчатая» аппроксимация. Суть ее заключается в том, что весь спектр «окна прозрачности» стекломассы разделяется на определенное количество участков, в пределах которых монохроматический коэффициент поглощения с достаточной точностью может быть принят постоянным. Кроме того, определяется еще один участок, который не приходится на «окно прозрачности», но в котором излучение имеет место.

С помощью соответствующих интегрирований определяются суммарные потоки (от стенок и газа), которые приходятся на определенные участки. Их значения будут считаться как выходные данные для модели температурного поля стекломассы.

Излучение, которое распространяется в полупрозрачной среде может поглощаться, переизлучаться и рассеиваться. При хорошо проваренной и осветленной стекломассе явление рассеивания может быть исключено из расчетов лучистого теплообмена.

Коэффициент эффективной теплопроводности в стекломассе может быть рассчитан, как сумма кондуктивной и радиационной составляющих [60]

$$\lambda_{эф} = \lambda_k + \lambda_{рад}, \quad (2.5)$$

где коэффициент кондуктивной теплопроводности (λ_k) рассчитывается по аддитивной зависимости с учетом химического состава стекла, а коэффициент радиационной теплопроводности ($\lambda_{рад}$) определяется из формулы [63]

$$\lambda_{рад} = 0,1298 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2. \quad (2.6)$$

где t – температура стекломассы, °C;

Кондуктивная и радиационная составляющие теплопроводности определяются химическим составом стекла и температурой. В количественном соотношении λ_k в несколько раз меньше $\lambda_{рад}$. Например, при температуре 1500°C $\lambda_k = 1,16$, а $\lambda_{рад} = 12,59$ Вт/(м°C). Для обесцвеченного стекла наблюдается еще большее различие этих величин. Эмпирические зависимости для коэффициентов радиационной теплопроводности стекла получены аппроксимацией табличных данных, приведенных в работе [64]. Например, расчет эффективного коэффици-

ента теплопроводности для оптически плотной зеленой стекломассы усредненного состава, зеленого, коричневого и бесцветного стекла можно проводить по следующей зависимостям, соответственно Вт/(м°С) [62, 65]:

$$\lambda_{\text{эф}_\lambda\text{,сп}} = 31,1 - 47,5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 23,93 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (2.7)$$

$$\lambda_{\text{эф}_\lambda\text{,зр}} = 0,1298 - 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (2.8)$$

$$\lambda_{\text{эф}_\lambda\text{,к}} = 19,997 - 52,1 \cdot 10^{-3} \cdot t + 40 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (2.9)$$

$$\lambda_{\text{эф}_\lambda\text{,б}} = 46,679 - 165 \cdot 10^{-3} \cdot t + 173,1 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (2.10)$$

Расчет теплоемкости расплава стекломассы может быть выполнен с использованием выражения [43]:

$$c_{\text{ст}} = \frac{46,679}{0,00146 \cdot t_{\text{ст}}} \cdot \left(\sum_{i=1} [p_i \cdot (a_i \cdot t + C_i)] \right) \quad (2.11)$$

где $t_{\text{ст}}$ – температура стекломассы, °С;

p_i – содержание отдельных оксидов в стекле, в долях;

a_i, C_i – безразмерные расчетные коэффициенты (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Расчетные коэффициенты (безразмерные) для определения теплоемкости расплава стекломассы

Расчетные коэффициенты	Типы оксидов						
	SiO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
$a_i \cdot 10^4$	4,68	4,53	4,10	5,14	8,29	4,45	8,30
C_i	0,1657	0,1765	0,1709	0,2142	0,2229	0,1756	0,1890

Имея расчетные зависимости эффективного коэффициента теплопроводности и теплоемкости стекломассы в зависимости от температуры, представляется возможным более точно определять эти параметры по сравнению с данными [66].

3.1.2. Теплообмен в стеновом брусе

Тепловое сопротивление стенового бруса определяется с учетом зависимости теплопроводности материала от температуры, которая описывается линейной зависимостью [67]:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + b_1 (t - t_0)), \quad (2.12)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при температуре t_0 , Вт/(м°С);

b_1 – безразмерная постоянная, определяемая экспериментально;

t – текущая температура материала, °С;

t_0 – температура материала, при которой определена величина λ_0 , °С, что для плоской однослойной стенки определяет выражение для эквивалентного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + b_1 \frac{t_b + t_n}{2} \right), \quad (2.13)$$

где t_b – внутренняя температура стенки, °С;

t_n – наружная температура стенки, °С.

Рассмотрим постановку двумерной задачи теплопроводности, возникающую при расчете симметричного нагрева длинной прямоугольной заготовки [68]. В этом случае можно считать, что температурное поле изменяется лишь в плоскости, перпендикулярной оси заготовки.

Введем в этой плоскости систему координат Oxy и обозначим через δ_x половину ширины заготовки, а через δ_y обозначим половину ее высоты.

Граничные условия при $x=0$ и $y=0$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0, \quad 0 < x < \delta_x, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad 0 < y < \delta_y, \quad (2.15)$$

На поверхности будем считать заданным граничное условие 3-го рода при постоянном значении температуры окружающей среды $t_{\text{возд}}$ и коэффициента теплоотдачи (как при естественной, так и вынужденной конвекции) $\alpha_{\text{возд}}$ при $x=\delta_x$ и $y=\delta_y$.

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_{\text{возд}} (t - t_{\text{возд}}), \quad 0 < x < \delta_x, \quad (2.16)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\text{возд}} (t - t_{\text{возд}}), \quad 0 < y < \delta_y, \quad (2.17)$$

Полагая, что в начальный момент времени тепло является равномерно прогретым до температуры $t_{\text{нач}}$, запишем начальное условие

$$t(x, y, 0) = t_{\text{нач}}, \quad 0 \leq x \leq \delta_x, \quad 0 \leq y \leq \delta_y, \quad (2.18)$$

Точное решение линейной двумерной задачи теплопроводности может быть найдено путем перемножения представленных в безразмерном виде решений соответствующих одномерных задач.

На поверхности огнеупорного бруса или теплоизоляционных панелей, не подверженных принудительному обдуву, имеет место процесс переноса тепла естественной конвекцией. При этом коэффициент теплоотдачи склады-

вается из конвективной и лучистой составляющих. Зависимость коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции может быть определена по экспериментальной зависимости [69]:

$$\alpha = 6,23 + 0,055 \cdot t_n, \quad (2.19)$$

где t_n – температура поверхности кладки вертикальных стен, °С.

3.1.3. Теплообмен при натекании плоской турбулентной струи, формируемой системой принудительного воздушного охлаждения, на огнеупорный брус, расположенный нормально к ее оси

Необходимость охлаждения наружной поверхности огнеупорных брусьев бокового ограждения на линии зеркала стекломассы обусловлена высоким уровнем температур и интенсивным процессом коррозии огнеупорных брусьев в этой зоне.

Наиболее распространенным способом охлаждения стеновых брусьев является принудительное воздушное охлаждение, которое осуществляется подачей вентиляторного воздуха, как правило, через щелевидные сопла на поверхность огнеупорного бруса. Сопла размещают вдоль линии зеркала стекломассы по всей длине варочного бассейна под прямым углом к поверхности ограждения с минимальными расстояниями друг относительно друга. Расстояние от соплового аппарата системы охлаждения до стенового бруса изменяется в диапазоне 50÷100 мм.

Рассмотрим особенности теплообмена при натекании плоской струи воздуха на поверхность, расположенную нормально относительно оси струи. Воспользовавшись гипотезой, согласно которой влияние свободной турбулентности натекающего потока на теплоотдачу в пристенном пограничном слое можно учесть, введя в уравнение пограничного слоя коэффициент, учитывающий дополнительную вязкость. Согласно этой гипотезе, свободная турбулентность увеличивает вязкость в пристеночном пограничном слое. В работе [70] для коэффициента ε_σ , учитывающего дополнительную вязкость, предложена следующая зависимость:

$$\varepsilon_\sigma = k\varepsilon_y \bar{w}_y y, \quad (2.20)$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально;

y – расстояние от поверхности пластины до среза сопла, м;

ε_y – степень турбулентности, обусловленная продольной составляющей струйного потока, % (см. рис. 2.3) [71];

\bar{w}_y – осредненное значение скорости потока на оси струи (ось y совпадает с направлением потока), м/с;

Принимаем допущение, что коэффициенты, учитывающие дополнительную вязкость ε_σ и дополнительную теплопроводность ε_q , равны между собой, то есть $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_q = \varepsilon$.

Тогда система уравнений пограничного слоя, возникающего на пластине при натекании на нее турбулентной плоской струи, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 w_x \frac{\partial w}{\partial x} + w_y \frac{\partial w}{\partial y} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (v + \varepsilon) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
 \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} &= 0 \\
 w_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} &= (a + \varepsilon) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

где ϑ – разность температур между температурой охлаждающего воздуха и температурой наружной поверхности огнеупорного бруса избыточная температура по отношению к какой-либо температуре, характерной для рассматриваемого процесса, °С.

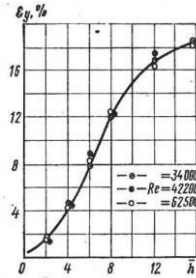


Рисунок. 2.3 – Изменение степени турбулентности ε_y вдоль плоской изотермической струи воздуха

Введем ряд обозначений: $\eta = y \sqrt{\frac{u_1}{\nu}}$ – безразмерная координата,

$w_x = f'(\eta)u_1$, $w_y = f(\eta) \sqrt{\nu u_1}$, $\theta = \frac{T_w - T(\eta)}{T_w - T_\infty}$ – безразмерная температура.

$$b = k \varepsilon_y w_1 \sqrt{\frac{1}{u_1 \nu}} \tag{2.22}$$

где u_1 – постоянная величина, которую можно рассматривать как градиент скорости, 1/с;

k – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;

w_1 – скорость на внешней кромке пограничного слоя, м/с;

w_x и w_y – составляющие скорости, м/с;

T_w – температура стенки, К;

$T(\eta)$ – температура потока как функция безразмерной координаты, К;
 T_∞ – температура набегающего потока, К;
 $(T_w - T_\infty)$ – избыточная температура набегающего потока, К;
Тогда система уравнений примет вид:

$$f^2 - f''(f+b) = (1+b\eta)f$$

$$\theta'' + \frac{\theta'(f+b)}{b\eta + \frac{1}{Pr}} = 0 \quad (2.24)$$

Граничные условия к системе уравнений (2.18) можно представить в форме

$$\text{при } \eta=0, f=0, f'=0, \theta=0$$

$$\text{при } \eta \rightarrow \infty, f'=1, \theta=1 \quad (2.24)$$

Решение системы уравнений (2.23) с граничными условиями (2.24) получено для случая $Pr=0,7$ (в диапазоне температур воздуха, подаваемого в систему принудительного охлаждения (от 10 до 60° С), значения критерия Прандтля отклоняются от указанного значения на 0,5–0,7%) имеет вид

$$Nu = Re^{0,5} (0,5+0,164b_0) \quad (2.25)$$

где $Nu = \frac{ab_0}{\lambda}$, $Re = \frac{u b_0^2}{\nu}$

b_0 – ширина щели соплового аппарата, м;

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м°С).

Для условий натекания плоской струи на преграду получены экспериментально следующие зависимости для u_1 [71]:

$$\text{при } 2 < \bar{h} \leq 7, u_1 = \frac{w_0}{b_0} \bar{h}^{-0,12}$$

$$\text{при } 7 < \bar{h} \leq 14, u_1 = \frac{w_0}{b_0} \bar{h}^{-1,4}, \quad (2.26)$$

где $\bar{h} = \frac{y}{b_0}$ – безразмерное расстояние от среза сопла до преграды;

y – расстояние от поверхности пластины, м;

b_0 – ширина щели соплового аппарата;

w_0 – скорость потока на срезе сопла, м/с;

Путем сравнения коэффициентов теплоотдачи, найденных экспериментально в критической точке и вычисленных по формуле (2.25), получена величина $k=0,11$ для формулы (2.20).

Формулы для определения коэффициента теплоотдачи при натекании плоской турбулентной струи для условий применения воздуха в системе охлаждения для которого критерий Прандтля $Pr=0,7$, на пластину, расположенную нормально к направлению скорости потока, с учетом влияния свободной турбулентности, получены путем совмещения уравнений (2.22), (2.25) и (2.26) имеют вид:

для диапазона изменения критерия Рейнольдса [71]

$$1,8 \cdot 10^4 < Re_0 \leq 5 \cdot 10^4 \text{ и } k=0,11$$

$$\text{при } 2 < \underline{h} \leq 7, \quad Nu = 0,5 \cdot \frac{Re_0^{0,5}}{h^{0,06}} \left(1 + 3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot \underline{h}^{-0,06} \cdot Re_0^{0,5} \varepsilon_y \right),$$

$$\text{при } 7 < \underline{h} \leq 14, \quad Nu = 1,9 \cdot \frac{Re_0^{0,5}}{h^{0,7}} \left(1 + 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \underline{h}^{-0,2} \cdot Re_0^{0,5} \varepsilon_y \right); \quad (2.27)$$

для диапазона изменения критерия Рейнольдса

$$5 \cdot 10^4 < Re_0 \leq 9 \cdot 10^4 \text{ и } k = 0,095$$

$$\text{при } \underline{h} \leq 7, \quad Nu = 0,5 \cdot \frac{Re_0^{0,5}}{h^{0,06}} \left(1 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot \underline{h}^{0,06} \cdot Re_0^{0,5} \varepsilon_y \right)$$

$$\text{при } 7 < \underline{h} \leq 12, \quad Nu = 1,9 \cdot \frac{Re_0^{0,5}}{h^{0,7}} \left(1 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \underline{h}^{0,2} \cdot Re_0^{0,5} \varepsilon_y \right) \quad (2.28)$$

Критерий Рейнольдса, входящий в формулы (2.23) и (2.24), вычислен по параметрам на срезе сопла $Re_0 = \frac{w_0 b_0}{\nu}$.

По рекомендациям [71] коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции от наружной поверхности огнеупорного бруса или теплоизоляционных панелей в окружающую среду равен сумме коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением, и может быть рассчитан по уравнению:

$$\alpha_k + \alpha_l = 2,56 \cdot \left(\frac{t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}}}{t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}}} \right)^{0,25} + \frac{4,65}{t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}}} \left(\left| \left(\frac{t_{\text{нар}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right| \right)^{0,25}, \quad (2.29)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, Вт/(м²°С);

α_l – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²°С);

$t_{\text{нар}}$ – температура наружной поверхности огнеупорного бруса или теплоизоляционной панели, °С;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Повышение коррозионной стойкости огнеупорного бруса может быть осуществлено путем использования системы принудительного воздушного охлаждения [72]. Подача воздуха на наружную поверхность огнеупорного бруса зачастую осуществляется через плоские сопла, установленные на расстоянии 50 мм от охлаждаемой поверхности. Для этих условий коэффициент

теплоотдачи, обеспечиваемый системой принудительного воздушного охлаждения $\alpha_{\text{прин}} = \alpha_k$ рассчитывается по формуле [73]

$$\alpha_{\text{прин}} = 0,131 \cdot \left(\frac{\lambda}{2b_0} \right) \text{Re}^{0,73} \text{Pr}^{0,47} \left(\frac{s}{2b_0} \right)^{-0,3}, \quad (2.30)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м°C); s – расстояние между соплами, м.

Приведенные уравнения (2.28 – 2.30) могут быть применены для расчета коэффициентов теплоотдачи при натекании плоской воздушной струи, сформированной сопловым аппаратом заданных геометрических размеров, на стеновой брус стекловаренной печи под углом 90° к его поверхности.

В работе [74] изложены результаты исследований по выбору рациональных скоростей обдува, экономическое обоснование различных режимов принудительного воздушного охлаждения, а также предпочтительная толщина баковоровых плиток (БК-33), применяемых для горячего ремонта бокового ограждения стекловаренной печи.

3.2. Моделирование процесса коррозии огнеупорных брусьев варочного бассейна

3.2.1. Механизмы коррозионного износа огнеупорных изделий

Коррозия огнеупорных изделий расплавами силикатных стекол, определяет срок службы стекловаренных печей. Она является процессом гетерогенного взаимодействия, подчиняющегося закономерностям диффузионной кинетики.

Процесс разъедания стекломассой огнеупорного изделия в стене варочного бассейна на уровне зеркала стекломассы происходит на границе раздела трех фаз (рис. 2.4). При характерной для стекловаренной печи плотностной конвекции расплава в наибольшей степени используют статические коррозионные испытания. Кинетику поверхностной коррозии огнеупорного изделия в этих условиях можно рассчитать по уравнению

$$(\Delta\delta)^2 = K_y \tau, \quad (2.31)$$

где $\Delta\delta$ – усредненная толщина корродированного слоя огнеупора, мм; τ – время взаимодействия, сут; K – константа скорости коррозии, мм/сут.

Разъедание брусьев узкого канала, по которому движется стекломасса из зоны охлаждения на выработочные механизмы (протока) и другие конструк-

тивные элементы кладки стекловаренных печей, нижняя горизонтальная поверхность которых контактирует со стекломассой, определяется вертикальной ячейистой коррозией.

Принципиальная схема коррозии в стенке варочного бассейна на границе распределения трех фаз показана на рисунке 2.4 на примере взаимодействия глиноземистого огнеупорного изделия с расплавом натрийкалийсиликатного (листового, тарного) стекла [75].

Миграция щелочных компонентов в огнеупорах из расплава, который характеризуется позитивным мениском на контакте со стеной бассейна, способствует образованию слоя стекломассы, обедненного щелочными компонентами, и реакционного слоя продуктов взаимодействия. В результате снижения концентрации щелочных компонентов и увеличения концентрации Al_2O_3 поверхностное натяжение расплава в образующихся слоях увеличивается, что способствует их подъему выше уровня (поверхности) стекломассы (см. рис. 2.4, а). Когда масса накопившегося расплава становится достаточно большой, тогда он срывается в виде капли, обнажая новые поверхности огнеупора для взаимодействия со свежей стекломассой (см. рис. 2.4, б).

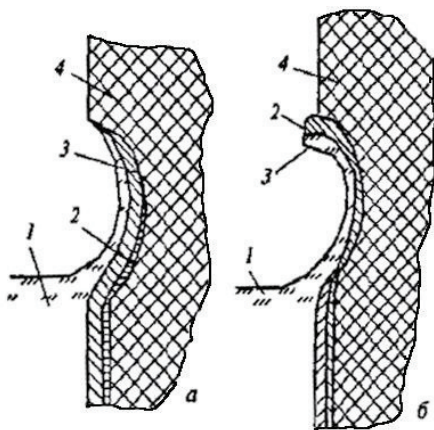


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема процесса коррозии на уровне зеркала стекломассы: а) начальный период; б) отрыв капли стекла, обогащенного продуктами коррозии:

1 – стекломасса; 2 – реакционный контактный слой; 3 – стекло, обогащенное продуктами коррозии; 4 – огнеупорное изделие

При этом, реакционный слой, который образуется на поверхности стенки ниже уровня стекломассы, обогащается продуктами взаимодействия и

препятствует активной коррозии этого участка стенки. Напротив, непрерывная миграция щелочных компонентов из расплава в обнаженные поверхностные слои огнеупора на уровне стекломассы способствует активному протеканию коррозии. Взаимодействием этих процессов объясняется появлением характерного профиля коррозии огнеупорного изделия в стенке варочного бассейна на границе раздела трех фаз.

Коррозия огнеупорного изделия в стенке варочного бассейна на уровне зеркала стекломассы в большинстве случаев определяет длительность эксплуатации стекловарной печи. Участок стенки бассейна на уровне зеркала стекломассы обычно выполняют из наиболее стеклостойких огнеупоров. При изготовлении большинства промышленных стекол (листовых, тарных, сортовых, и др.) используют плавнелитые огнеупоры, которые содержат более 80% химически стойких окислов оксида циркония и алюминия. Такие огнеупоры не являются капиллярно-пористыми материалами, что определяет их высокую коррозионную стойкость в контакте с расплавами стекла.

Расхождение в стойкости огнеупоров по отношению к расплавам с щелочными катионами объясняется с позиций формирования приконтактного слоя стекла. Коррозионная стойкость огнеупоров определяется не вязкостью расплава, а степенью влияния продуктов коррозии на вязкость контактного стекла. На поверхности огнеупорного изделия формируется высоковязкий пограничный слой, который тормозит диффузию компонентов стекла и продуктов их взаимодействия. Следовательно, величина градиента вязкости между исходным расплавом и формирующимся пограничным слоем является одним из основных факторов, которые определяют скорость коррозии огнеупорного изделия силикатным расплавом.

Вертикальная ячеистая коррозия является особым видом износа огнеупоров в стекловаренных печах. Этому износу в основном подвержены горизонтальные, обращенные вниз поверхности огнеупорных брусьев протоков, бакоровая выстилка дна в случае попадания под нее стекломассы, противосвильные мосты, горизонтальные швы в стенках бассейна и др. Механизм коррозии связан с наличием газовых пузырьков, возникающих на поверхности контакта огнеупорного изделия с расплавом стекла. Газовый пузырек может быть захвачен стекломассой и направлен в пору или трещину поверхности огнеупорного изделия. Пузырек вследствие местного изменения поверхностного натяжения его пленки, а также под действием гравитационных сил в зоне контакта с огнеупорным изделием совершает вращательные и возвратно-поступательные движения, непрерывно направляя в зону контакта свежую обогащенную щелочами стекломассу.

Скорость коррозии огнеупорного изделия в результате действия расплава стекла является основным критерием выбора его материала. Основываясь

на результатах статических испытаний [57], были получены величины скорости поверхностной коррозии и сделан вывод, что важнейшим фактором, определяющим скорость коррозии в огнеупоре, является температура взаимодействующего с ним расплава стекла.

Константу скорости поверхностной коррозии огнеупоров K_y можно определить согласно закону Аррениуса, $\text{мм}^2/\text{сут}$:

$$\ln K_y = A - \frac{B}{T} \quad (2.32)$$

где A, B – экспериментальные коэффициенты, определяющие параметр K_y ;

T – температура на границе контакта огнеупорное изделие-стекломасса, K ;

В табл. 2.2 представлены коэффициенты кинетических уравнений Аррениуса для огнеупоров наиболее часто применяющихся при строительстве ванн печей, а также энергия активации, необходимая для начала коррозионного взаимодействия стекломасса – огнеупорный брус [58].

Основываясь на зависимостях (2.31, 2.32) можно сделать вывод, что параметром, определяющим константу K_y , является температура на границе контакта стекломасса–огнеупорное изделие, которая фактически является температурой стекломассы.

Таблица 2.2 – Экспериментальные коэффициенты и энергия активации процесса коррозии огнеупоров расплавом тарного стекла на границе раздела трех фаз в диапазоне температур от 1325 до 1525°C

Вид огнеупора	A	B	E, кДж/моль
Спеченный муллитовый	45,680	75520	628,0
Коршвит	36,058	60998	507,2
Бакор–33	42,045	73008	607,1
Бакор–41	47,760	84240	700,5
Огнеупоры на основе SnO_2	48,790	89856	747,2
ХАЦ–30	52,180	96877	805,6

Величину коррозии (в мм) можно рассчитывать по уравнению [58]:

$$\delta\Delta = \sqrt{K_y \cdot \tau} \quad (2.33)$$

где K_y – константа скорости поверхностной коррозии огнеупоров, задаваемая для каждого материала в отдельности, $\text{мм}^2/\text{сут}$; τ – время взаимодействия со стекломассой, сут.

Коэффициенты кинетических уравнений, а также теплофизические свойства стекломассы применимы к расплавам стекол, имеющих следующий диапазон химического состава основных компонентов стекольной матрицы [62]: SiO_2 – от 60% до 77%; Na_2O – от 14% до 16%; CaO – от 6% до 15%.

Следовательно, приведенные коэффициенты могут быть применены для расчета теплофизических свойств расплавов широкой номенклатуры тарных и листовых стекол.

3.2.2. Определение зависимости скорости процесса разрушения от температуры стекломассы

При построении алгоритма расчета температурного состояния за основу взята разработанная автором математическая модель теплообмена в боковом ограждении варочного бассейна стекловаренной печи, позволяющая учитывать разнородные граничные условия и изменения теплофизических свойств используемых материалов в зависимости от температуры [13]. Структурно алгоритм состоит из ряда блоков, позволяющих реализовать математическую модель (рис. 2.5) [76]. В блоке 1 алгоритма (далее по тексту Б1) выполняется задание теплофизических свойств огнеупорных, теплоизоляционных материалов и стекломассы.

Заданными являются также геометрические параметры модели (Б2), а именно общая высота и толщина сечения огнеупорной стенки, глубина бассейна, заполненного расплавом, толщины охлажденного 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 блоке (Б4). На каждой итерации расчета, 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.

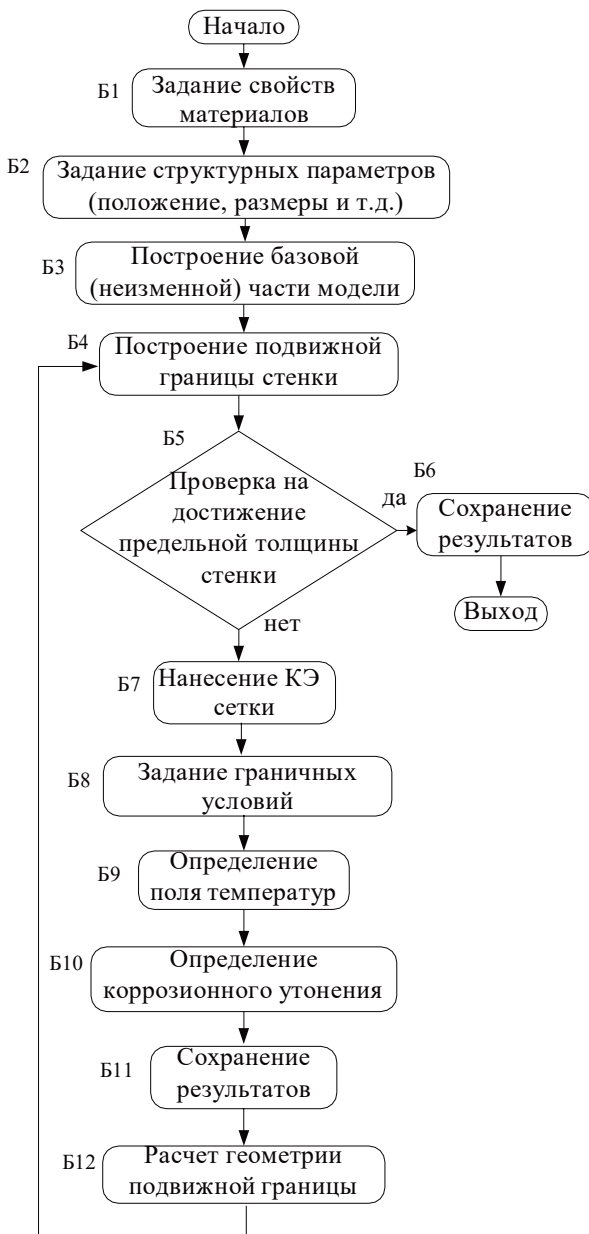


Рисунок 2.5 – Структура алгоритма расчета температурного поля и срока работы стенового огнеупорного бруса продольного ограждения ванной стекловаренной печи

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 одной степенью свободы в каждом узле.

Сетка имеет сгущение в области ожидаемой коррозии. Также закладывается возможность варьировать густотой сетки задавая ее характеристики в параметрической форме (Б7). Изначально, исходя из формы бокового ограждения, выбрано равномерное разбиение геометрической модели. При изменении конфигурации огнеупорного бруса под воздействием коррозионных процессов с прямолинейной 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 блоке (Б8).

Далее выполняется определение теплового состояния ограждения, а именно поля температур бокового ограждения (Б9). Расчет величины коррозии огнеупорного материала (Б10) основывается на полученных данных о распределении температур по толщине модели, при этом используется уравнение (2.30).

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

На (рис. 2.6 а) показано начальное состояние модели. Сама по себе модель состоит из трех отдельных, физически различных областей: огнеупорная стенка (I), зона пламенного пространства (II) и пристеночный слой расплава стекломассы (III).

Наибольший практический интерес представляет часть алгоритма, которая посвящена подвижной части модели и реализации процедуры перемещения данной части конструкции в процессе коррозии [76]. Далее рассмотрим эту часть алгоритма более подробно. 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 разби-

вается на $(N-1)$ отрезок конечной длины. При таком подходе геометрия подвижной границы (корродирующей стенки) будет описываться N точками, определяющими концы данных отрезков (рис. 2.7).

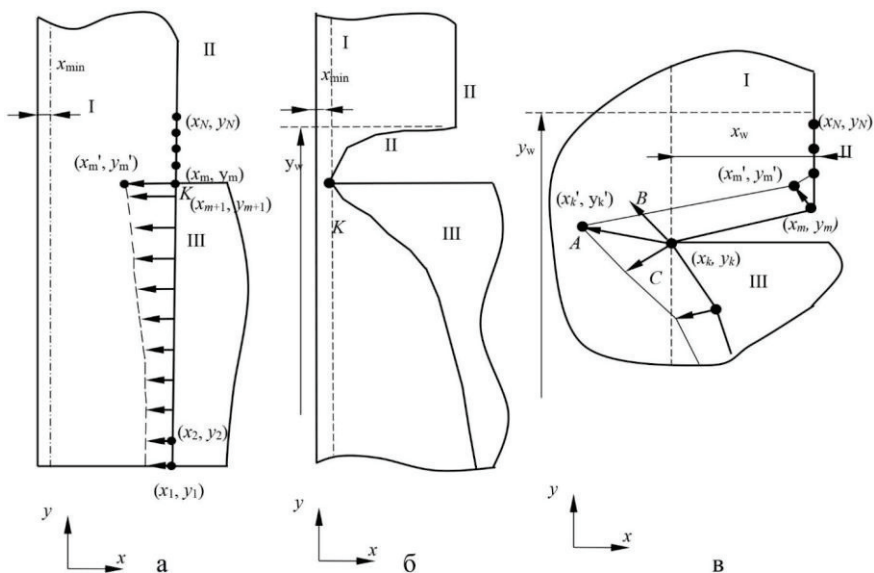


Рисунок 2.6 – Зона ячеистой коррозии при изменении геометрии огнеупорного бруса: а) исходная конфигурация огнеупорного бруса б) конфигурация огнеупорного бруса в момент вовлечения новой точки в процесс вертикальной ячеистой коррозии; в) фрагмент огнеупорного бруса варочной зоны в момент достижения минимально допустимой толщины огнеупорного бруса;

I – огнеупорный брус; II – зона пламенного пространства; III – пристеночный слой стекломассы; К – точка раздела трех фаз (огнеупорный брус – стекломасса – пламенное пространство); А, В, С – результирующий вектор точки раздела трех фаз и векторы узловых точек для их перемещения в новое положение; сплошная жирная линия – конфигурация огнеупорного бруса; пунктирная линия – расчетная конфигурация бруса в зоне контакта со стекломассой; штрих пунктирная линия – минимально–допустимое значение толщины огнеупорного бруса

Наиболее интенсивно коррозия будет протекать в районе раздела трех фаз (К), так как для этой зоны характерна максимальная температура расплава и его агрессивное физико-химическое воздействие на огнеупорную стенку. Действительно, в районе раздела трех 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.

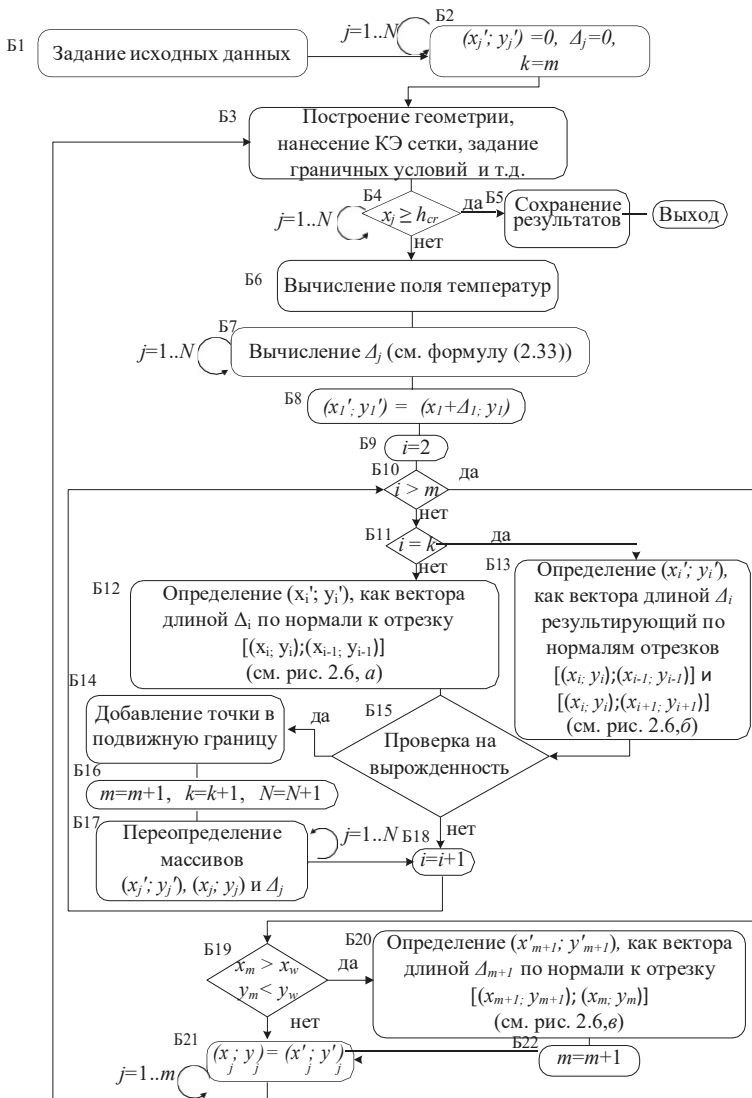


Рисунок 2.7 – Структура алгоритма расчета величины коррозии и построения подвижной границы

Более того, наличие описанной «подвижности» способно приводить к взаимодействию расплава с огнеупором выше точки раздела трех фаз, что обусловлено наличием сил поверхностного натяжения (рис. 2.6 б). Данный факт имеет экспериментальное подтверждение [75, 77] 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 зона выше точки «К», имеющая участок, наклоненный 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 также химическими и структурными свойствами огнеупорного материала стенки, которые являются эмпирически определенными параметрами [78, 79]. В данной работе эти величины считаются заданными. Общее количество подвижных точек N , m – количество подвижных точек задействованных в процессе коррозии, k – номер точки раздела трех фаз, x_{min} – минимальная толщина огнеупорного бруса, обеспечивающая безаварийную работу печи, Δ_i – величина коррозии для каждой точки аппроксимации, рассчитываемой индивидуально в зависимости от температуры по уравнению (2.34), (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 рисунке 2.7.

Формально процедура определения геометрии границы происходит отдельно для каждой точки кусочно-представленной границы (рис. 2.6 а). То есть в каждый момент времени происходит КЭ расчет температурного поля и значения температуры в точках (x_i, y_i) . По вычисленным значениям температуры выполняется расчет суточной величины коррозии Δ_i , по уравнению (2.33) после чего происходит определение новых координат точки (x'_i, y'_i) , как вектора длиной Δ_i по нормали к отрезку, которому принадлежит данная точка.

Некоторые характерные особенности данный алгоритм имеет для вычисления скорости коррозии в районе раздела трех 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, учитывается возникновение явления вертикальной ячеистой коррозии выше зеркала стекломассы.

Так, при достижении точкой «К» величины x_w , задаваемой таким образом, чтобы характер границы огнеупора в зоне ячеистой коррозии над зеркалом стекломассы носил параболический характер [80], в расчет 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 Δ_j обнулены, количество подвижных точек совпадает с номером точки на разделе трех фаз. Далее происходит построение геометрической модели, нанесение конечноэлементной сетки, наложение граничных условий (Б3) в соответствии с исходными данными (Б1). Если координата любой из подвижных точек достигает значения x_{min} (Б4), происходит сохранение результатов расчета в виде таблиц температур по сечению огнеупора, величин Δ_i в заключительный момент времени, графическое представление конфигурации огнеупорного бруса и распределение температуры по толщине огнеупорного материала и тепловой изоляции и далее завершение работы программы (Б5). В случае, если значение x_{min} не достигнуто, рассчитываются температуры по толщине ограждения (Б6) и величины Δ_i для каждой узловой подвижной точки (Б7).

Рассчитываем координаты точки (x'_1, y'_1) , которая получается прибавлением Δ_1 к координате x_1 (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 трех фаз значения x_w . При этом значение x_w уменьшается на заданную в исходных данных величину, переписывается и используется в последующих расчетах, пока координата x_k точки раздела трех фаз не достигнет «нового» значения x_w , после чего данная процедура повторяется. Если координата точки, вовлеченной 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 Δ_{m+1} по нормали по отношению к отрезку $[(x_{m+1}, y_{m+1}); (x_m, y_m)]$.

Далее происходит увеличение количества точек, вовлеченных 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 блоку построения геометрии наложению конечноэлементной сетки и граничных условий (Б3).

Если условие (Б10) не выполняется, то осуществляется проверка, является ли текущая точка границей раздела трех фаз $i=k$ (Б11). Если условие выполняется, значит рассматривается точка раздела трех 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 $y_{II}=y_{i-1}$; $x_I=x_{i-1}$, $y_{II}=y_i$; $x_{II}=x_i$, далее рассчитываем коэффициент $k = \frac{y_{II} - y_I}{x_{II} - x_I}$ и определяем координаты $x_i' = \frac{k\Delta_{II}}{\sqrt{k^2 + 1}} + x_i$ 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') расчетных точек с номерами от 1 до m , за исключением рассматриваемой точки раздела трех фаз.

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 Δ_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 счетчик 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 счетчики 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 Δ_i температур в подвижных точках и т.д. (Б17). Далее переходим к (Б18) и после увеличения счетчика i переходим к (Б10).

Созданный алгоритм реализован в виде программы (Бекназарян Д.В. Прогнозирование и диагностика состояния тепловой изоляции плавильных агрегатов: дис. кандидата техн. наук: 05.14.048 «Промышленная теплоэнергетика»: защищена 26.05.2022. – 343 с.), в котором температурное поле поперечного сечения бокового ограждения бассейна было получено с использованием метода конечных элементов. Твердотельная геометрическая модель разбивалась на равносторонние треугольные конечные элементы (КЭ) (рис. 2.1), 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 разбиения определена с помощью вычислительного эксперимента, исходя из условия отличия температуры точки раздела твердой жидкой и газообразной фаз (огнеупор–расплав стекломассы–продукты сгорания топлива) в пределах трех процентов для модели с большим размером элемента от модели с меньшим размером элемента. Данные по результатам расчетов приведены в таблице 2.3 и на рис. 2.8, 2.9. В таблице 2.3 содержатся данные, характеризующие влияние длины ребра элемента на температуру границы раздела огнеупор–стекломасса, в частности точки раздела трех фаз в конце кампании печи и данные о длительности службы огнеупорного бруса.

Таблица 2.3 – Зависимость температуры огнеупорного бруса и длительности кампании печи от размеров КЭ

Длина ребра КЭ, мм	Температура точки раздела трех фаз, °С	Длительность кампании печи, сут
25	1204,00	1322
22,5	1104,60	1967
18	1090,85	2818
15	1094,07	2891

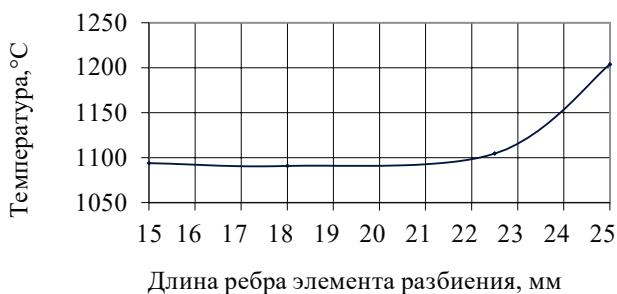


Рисунок 2.8 – Зависимость температуры точки раздела трех фаз от длины ребра КЭ

Так, при использовании КЭ с длиной ребра 22,5 и 18 мм отличие температур точки раздела трех фаз и длительность кампании печи составляет, соответственно, 1,24% и 30,20%. Как видно, расчет температуры выполняется с достаточной точностью, однако полученное отличие температур дает не

удовлетворительные результаты при расчете длительности кампании печи. Этот факт требует уменьшения длины ребра КЭ до 15 мм, что приводит к снижению отличия по температуре точки раздела трех фаз и длительности кампании, соответственно, до 0,29% и 2,53%.

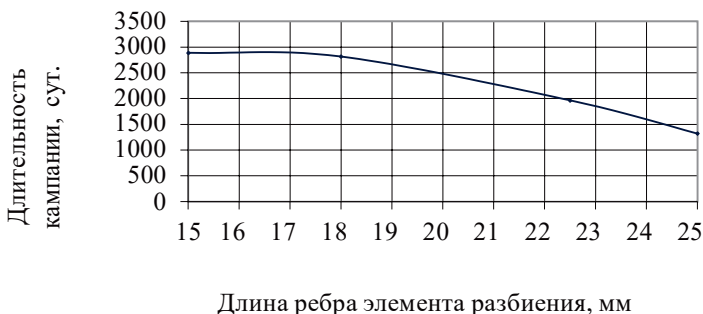


Рисунок 2.9 – Зависимость длительности кампании печи от длины ребра элемента разбиения

Таким образом, использование КЭ с длиной ребра 15 мм позволяет получать результаты о температурном состоянии ограждения и длительности кампании печи с достаточной для научных расчетов точностью.

3.3. Оценка адекватности математической модели. Расчет теплового состояния огнеупорного бруса варочного бассейна

Оценка адекватности математической модели реальному теплофизическому процессу и точности результатов численного эксперимента (который выполнялся с помощью универсальной программной системы ANSYS Multiphysics) проводится путем сравнения результатов вычислений с данными теплофизических экспериментов на моделях и реальных объектах. Для выполнения такого рода сравнения нами выбрана высокопроизводительная пламенная стекловаренная печь с поперечным направлением пламени общей площадью 690 м² [81 – 83].

Анализ условий работы огнеупорных изделий этой печи по результатам исследований ее состояния показал, что причиной, вызвавшей необходимость ее остановку на холодный ремонт, прежде всего, является неудовлетворительное состояние верхнего ряда стенок бассейна в варочной зоне на торцевой или боковой стене, в которой находится окно для загрузки шихтовых материалов и арка загрузочного кармана. После выпуска стекломассы и остановка печи было проверено общее состояние огнеупорной кладки и замерена остаточная

толщина стеновых бакоровых брусьев. Внешний осмотр кладки печи показал, что наиболее сильно разъедены огнеупорные брусья из материала бакор–33 в районе четвертой и пятой пар горелок. Их остаточная толщина на уровне зеркала стекломассы составляла $15 \div 40$ мм и на глубине 600 мм – $80 \div 100$ мм [79]. При этом на протяжении всего времени эксплуатации печи бакоровые огнеупорные брусья стенового ограждения бассейна охлаждались с помощью воздуха, который обдувает наружную поверхность через щелевидные сопла, расположенные на уровне зеркала стекломассы.

Решение тестовой задачи, демонстрирующей эквивалентность вычислительного эксперимента натурному процессу, требует задания на модели геометрических и граничных условий, аналогичных реальным условиям работы печи. Исходные данные для решения тестовой задачи приведены в табл. 2.4.

Высота зоны обдува принята 200 мм. Сопловой аппарат зоны обдува в виде цепочки плоских сопел расположен на уровне зеркала стекломассы. В первые тридцать месяцев эксплуатации печи средний объемный расход воздуха для охлаждения стеновых брусьев на один погонный метр охлаждаемой поверхности при избыточном давлении 800 Па составлял $0,9$ ($\text{м}^3/\text{с}$)/м. Это обеспечивало коэффициент теплопередачи 250 Вт/($\text{м}^2\text{°C}$). Затем с увеличением объемного расхода воздуха на погонный метр охлаждаемой поверхности до $1,2$ ($\text{м}^3/\text{с}$)/м значение коэффициента теплоотдачи выросло и составило 300 Вт/($\text{м}^2\text{°C}$).

Участки наружной поверхности ограждения, не подверженные принудительному обдуву, охлаждаются посредством естественной конвекции воздуха с температурой 30°C .

Таблица 2.4 – Исходные данные для расчета

Геометрические параметры, мм		Условия теплообмена	
Высота продольной стены	2550	Температура продуктов сгорания, °C	1535
Толщина продольной стены	250	Температура воздуха, °C	30
Остаточная толщина огнеупорного бруса на линии зеркала стекломассы в момент останова печи	30	Коэффициент теплоотдачи, Вт/($\text{м}^2\text{°C}$): – по газовой стороне	147– 200
Высота зоны обдува	200	– по воздушной стороне	30
Высота расположения соплового аппарата	1350	Температура стекломассы: – на уровне зеркала, °C	1450
Толщина охлажденного пристенного слоя стекломассы	50	– на уровне пода, °C	1050

Коэффициент теплоотдачи при взаимодействии расплава стекломассы с поверхностью ограждения складывается из конвективной и лучистой составляющих

$$\alpha_{\text{ест}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}. \quad (2.34)$$

Предполагается, что объем расплава стекломассы настолько велик, что свободное движение, возникающее у других огнеупорных элементов, расположенных в этом объеме, не сказывается на рассматриваемом течении.

Принимаем, что с торцов стенового бруса, покрытых идеальной тепловой изоляцией, тепловой поток равен нулю.

Температура газового пространства принимается равной 1535°C и температура поверхностного слоя стекломассы равной 1450°C . Перепад температуры по глубине бассейна составляет 400°C . Толщина охлажденного слоя стекломассы, примыкающего к огнеупорному брусу, равна 50 мм.

В рассматриваемом случае коэффициент теплопроводности огнеупорного материала λ линейно зависит от температуры. Характер зависимости коэффициента теплопроводности расплава стекломассы от температуры носит нелинейный характер (рис. 2.10). При температуре $1535 - 1595^{\circ}\text{C}$ продуктов сгорания в пламенном пространстве печи лучистая составляющая теплоотдачи много больше конвективной составляющей, поэтому в уравнении (2.34) коэффициентом конвективной теплоотдачи можно пренебречь.

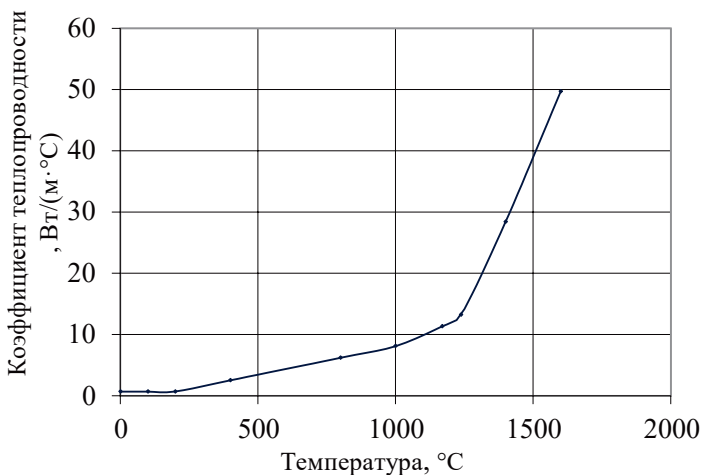


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициент теплопроводности расплава тарного стекла от температуры

Теплофизические свойства стенового бруса соответствуют свойствам огнеупорного материала бакор–33. Свойства стекломассы взяты по данным [62].

Для сопоставления результатов вычислительного и натурального эксперимента в качестве исходных данных были приняты условия теплообмена и геометрические параметры агрегата, для которого была замерена толщина стенового огнеупорного бруса в процессе кампании печи.

Коэффициенты кинетических уравнений Аррениуса для огнеупорного материала бакор–33: $A=42,045$; $B=73008,066$. Коэффициент теплопроводности $\lambda=4,07+2,6867 \cdot 10^{-4} \cdot t$ Вт/(м²·°С). Плотность огнеупорного материала $\rho=2700$ кг/м³. Зависимость теплоемкости бакора–33 от температуры представлена на рис. 2.11.

Теплоемкость расплава стекла $c=669,2$ Дж/кг·°С; плотность расплава стекла $\rho=2590$ кг/м³.

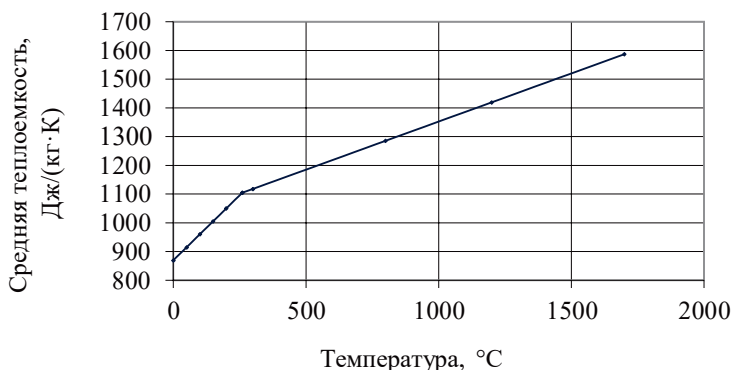


Рисунок 2.11 – Зависимость теплоемкости огнеупорного материала бакор–33 от температуры

В результате расчетов было получено распределение температуры по толщине огнеупорного бруса в зависимости от граничных условий. Далее из уравнения (2.33), для узловых точек по глубине стекломассы определялась скорость коррозии огнеупора в зависимости от температуры стенки на границе огнеупорное изделие – расплав стекломассы.

Длительность кампании печи, полученная расчетным способом (табл. 2.5) составила 1651 сутки, тогда как по данным натурального эксперимента эта величина составила 54 месяца, то есть 1643 суток. Как видно, разница между расчетными и экспериментальными данными равна восьми суткам, что в процентном выражении составляет 0,51%.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что на заключительном этапе работы печи, в (1467 и 1651) сутки отличие расчетных данных от экспериментальных по остаточной толщине огнеупора составило:

на уровне зеркала стекломассы – 32,27% (19 мм) и 10,98% (4,68 мм);
 на глубине 400 мм от зеркала стекломассы – 14,49% (32,79 мм) и 0,405%
 (0,772 мм).

Таблица 2.5 – Динамика изменения толщины огнеупорного бруса

Расстояние от зеркала стекломассы, мм	Толщина огнеупора, мм		Толщина огнеупора, мм	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
	День 1467		День 1651	
0	39,33	58,33	37,96	42,64
50	93,53	56,55	91,74	41,67
100	101,9	68,45	99,92	53,57
150	123,83	116,07	121,26	74,40
200	136,81	125	133,80	89,29
250	149,27	119,05	145,88	101,19
300	161,83	179,76	158,15	148,81
350	174,57	207,14	170,76	181,55
400	193,4	226,19	189,7	190,48

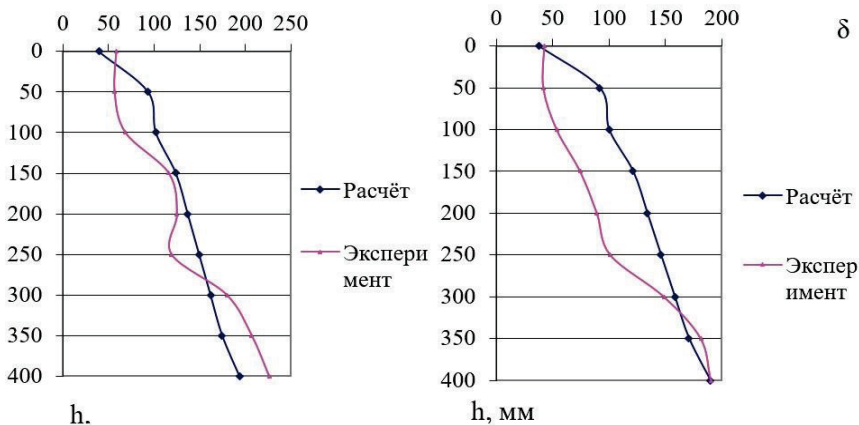


Рисунок 2.12 – Толщина огнеупорного материала на протяжении кампании печи на глубинах до 400 мм от зеркала стекломассы: а – после 1467 дней работы; б – после 1651 дня;

I – огнеупорный брус; II – расплав стекломассы

Как видно из рисунка 2.12, толщина огнеупорных брусьев из бакора–33 по данным эксперимента [79] на глубине 50÷150 мм выше, чем на уровне стекломассы. Это, по-видимому, связано с наличием в крупногабаритных печах с шириной бассейна 10 м мощных поперечных конвективных потоков расплава стекломассы.

Вследствие того, что при составлении математической модели конвективные токи стекломассы не были учтены, в данных на рисунке 2.12 имеет место расхождение экспериментальных и расчетных данных.

Однако учитывая, что остаточная толщина огнеупорного бруса бассейна в рассматриваемом сечении составляет от 20 мм до 42 мм, расхождение данных вычислений и эксперимента (среднего значения) на линии зеркала стекломассы составляет 18,3% (6,95 мм) [79]. Полученный результат соответствует допустимой величине погрешности при расчетах, проводимых по эмпирическим зависимостям.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ СТЕНОВЫХ БРУСЬЕВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

3.1. Влияние изменения режимных параметров системы охлаждения и типов изоляционных материалов, применяемых в стеновом ограждении печи

В данной главе представлены результаты численного эксперимента, проведенного при использовании программы, описанной в разделе 2 и написанного для универсальной программной системы ANSYS Multiphysics. Управляющий макрос программного комплекса по определению длительности работы бокового ограждения стекловаренной печи приведен в (Бекназарян Д.В. Прогнозирование и диагностика состояния тепловой изоляции плавильных агрегатов: дис. кандидата техн. наук: 05.14.048 «Промышленная теплоэнергетика»: защищена 26.05.2022. – 343 с.). Исследование периода стойкости стенового бруса и теплового состояния системы в целом проведены при изменении параметров принудительного воздушного охлаждения элементов ограждения варочного бассейна стекловаренной печи на уровне зеркала расплава стекломассы. За основу взяты геометрические параметры и типы огнеупорных и теплоизоляционных материалов, используемые в современных печах.

Цель исследования заключается в определении температурного поля огнеупорного бруса бокового ограждения ванной печи и нахождении длительности работы огнеупорных материалов при наложении многослойной изоляции. При этом были учтены теплофизические свойства теплоизоляционных материалов, допустимая температура из длительной эксплуатации, контактное взаимодействие огнеупорных и теплоизоляционных материалов и ограничения, определяемые конструкцией печи. Для стен варочного бассейна использован материал бакор-41, кладка рабочего пространства выполнена из бакора-33 толщиной до 250 мм и 200 мм, соответственно. Максимальная суммарная толщина теплоизоляционных панелей – 350 мм, минимальная толщина – 50 мм, максимальная температура внутренней поверхности стены (или стекломассы в месте контакта со стеной) 1400 и 1550 °С.

Периодом стойкости стенового бруса называется время работы огнеупорных изделий до момента достижения заданной минимальной толщины стенового бруса в любой точке по глубине ванны.

Тепловая экономичность печей находится в определенной зависимости от их удельной производительности. При прочих равных условиях, повышение удельного съема стекломассы приводит к сокращению удельных затрат тепла на ее производство. Повышение удельной производительности печей становится

возможным, если в зону технологического процесса удастся предать необходимое количество тепловой энергии и обеспечить время пребывания новых порций расплава в варочном бассейне, требуемое для завершения всего комплекса физико-химических реакций стекловарения. Достигнутые на сегодняшний день предельные температуры огнеупорной кладки рабочего пространства, равные 1580–1600 °С, в определенной мере лимитируют дальнейшее повышение удельного съема. В то же время, как показывают результаты численного моделирования внутреннего теплообмена и гидродинамики расплава, совершенствование конструкции варочного бассейна без интенсификации внешнего теплообмена позволяет достичь значительного прироста производительности печи с сохранением требуемого качества стекломассы на выработке [84]. Один из аспектов этой задачи заключается в минимизации тепловых потерь через кладку варочного бассейна. Тем самым при прочих равных условиях достигается снижение технологически обоснованного температурного уровня в ванне, что позволяет уменьшить общую тепловую нагрузку печи.

Особенностью конструирования тепловой изоляции боковых стен ванны является необходимость применения многослойной кладки [85, 86]. В высокотемпературной части бассейна в качестве первого слоя может быть использован корундовый легковес КЛ–1,1. В этом случае в качестве наружного слоя становится возможным (по температуре) применение пенодиатомитового материала. На практическом уровне выполнение теплоизоляции стен может подразделяться на два типа. В нижней части ванны (около 1/3 ее высоты) тепловая изоляция устанавливается в виде сплошной кладки. Для герметизации швов в бакоровой кладке между внешней поверхностью брусьев и первым слоем изоляции выполняется монолитная заливка мертелем толщиной не менее 5 мм с обязательным добавлением технической ортофосфорной кислоты. Верхняя часть бассейна предполагает установку дискретной изоляции. Швы примыкания брусьев остаются открытыми. Ширина не изолируемой поверхности, как правило, принимается равной 50 мм. Если кладка дна ведется «насухо», то изоляция боковых стен предполагает применение мертелей.

3.1.1. Моделирование режимов работы печи в различных температурных диапазонах

Выполнено исследование и установлен характер распределения температур по сечению теплоизоляционных панелей и огнеупорного бруса, а также срок службы бакоровых брусьев варочной зоны в случае изменения перепада температуры по глубине ванны от зеркала стекломассы до уровня пода. Этот параметр во многом зависит от эффективности теплоизоляции донных брусьев печи. Моделирование было проведено при значениях разницы температур

между зеркалом стекломассы и подом, характерной для современных агрегатов $\Delta t_{ст}$ (150 °С, 130 °С, 110 °С, 90 °С) [86]. Геометрические параметры расчетной модели и тепловые граничные условия приведены в таблице 3.1. Типы материалов и геометрические характеристики теплоизоляционных панелей рабочего пространства и зоны варки приведены в таблице 3.2.

Общий вид конфигурации температурного поля в боковом ограждении варочного бассейна печи и собственно поперечное сечение стенового бруса с теплоизоляционными панелями представлены на рисунке 3.1 [87] (здесь и далее, кроме рисунков с распределением температуры по сечению ограждения, различные оттенки введены для удобства различения отдельных материалов и читаемости рисунков).

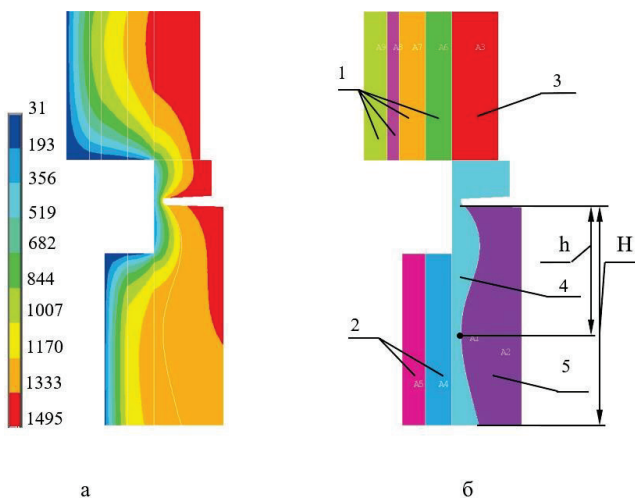


Рисунок 3.1 – Фрагмент поперечного сечения бокового ограждения ванной стекловаренной печи в конце кампании: а – распределение температуры по сечению ограждения, °С; б – конфигурация бокового ограждения;

1 – теплоизоляционные панели зоны пламенного пространства; 2 – теплоизоляционные панели варочной зоны; 3 – огнеупорный брус зоны пламенного пространства (бакор–33); 4 – огнеупорный брус варочной зоны (бакор–41); 5 – расплав стекломассы; h – глубина 500÷650 от линии зеркала стекломассы (опасное сечение); H – полная глубина бассейна (1350 мм)

В качестве разницы температур между зеркалом стекломассы и уровнем пода взято минимальное значение из приведенного выше ряда. Как видно (рис. 3.2), коррозионные процессы в варочной зоне на глубинах 500÷650 мм протекают со скоростью, превышающей скорость на уровне зеркала стекломассы. Основным фактором, вызывающим данный эффект, является наличие

хорошей теплоизоляции бруса варочной зоны, что приводит к общему повышению температуры огнеупора.

Таким образом, интенсивность охлаждения, обеспечивающая уровень коэффициента теплоотдачи на поверхности огнеупорного $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$ является достаточной, так как дальнейшее увеличение коэффициента теплоотдачи будет приводить к замедлению коррозии на линии зеркала стекломассы, однако на скорость коррозии огнеупорного бруса в зоне теплоизоляционных панелей это влияния не оказывает.

Таблица 3.1 – Исходные данные для моделирования длительности кампании печи

Геометрические параметры ограждения	Значения, мм	Условия теплообмена	Значения
Высота	2100	Температура продуктов сгорания, °C	1575
		Температура расплава стекломассы, °C	1550
Толщина – зона варки – зона пламенного пространства	250 200	Температура воздуха, °C	30
минимальная остаточная толщина огнеупорного бруса в момент останова печи	40	коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$: по газовой стороне по воздушной стороне: – естественная конвекция – принудительное охлаждение	147–200
высота зоны обдува	200		30 100–300
высота расположения соплового аппарата	1350	температура стекломассы на уровне зеркала, °C	1500
толщина охлажденного пристенного слоя расплава стекломассы	50	температура стекломассы на уровне пода (четыре варианта), °C	1350; 1370; 1390; 1410;

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при наличии теплоизоляционных панелей в зоне варочного пространства фактором, лимитирующим длительность кампании, является скорость коррозии огнеупорного бруса на глубинах 500÷650 мм от уровня стекломассы.

Теплоизоляция зоны пламенного и варочного пространства выполнялась с использованием материалов: КЛ–1,1; ШЛ–0,9; ШЛ–0,4; КПД–400 и КЛ–1,1; КПД–400, соответственно.

В результате численного эксперимента получены данные о температурном состоянии огнеупорных брусьев и теплоизоляционных панелей, длительности кампании печи, плотности тепловых потоков по сечению огнеупорных брусьев на уровне зеркала стекломассы, плотности тепловых потоков по высоте теплоизоляционных панелей пламенного пространства, а также на глубине до 400 мм от зеркала стекломассы с шагом 100 мм.

Таблица 3.2 – Параметры теплоизоляционных панелей рабочей и варочной зоны

№ п/п	Марка теплоизоляционного материала	Толщина, м	Высота, м
Зона рабочего пространства			
1	КЛ–1,1	0,114	1,150
2	ШЛ–0,9	0,114	
3	ШЛ–0,4	0,065	
4	КПД–400	0,100	
Зона варочного пространства			
1	КЛ–1,1	0,114	1,150
2	КПД–400	0,100	

Конфигурация огнеупорного бруса варочной части бассейна в зависимости от перепада температуры по глубине бассейна представлена на рисунке 3.2. Для анализа взяты два крайних значения из рассматриваемого ряда $\Delta t_{ст}$. В случае перепада температур равного 150° и 90° С, минимальная толщина огнеупорного материала находится на глубине 536 мм и 616 мм соответственно. При этом на линии зеркала стекломассы толщина огнеупора составляет 48,17 и 57,20 мм. Таким образом, высокий уровень теплоизоляции варочного пространства приводит к увеличению скорости коррозии и сокращению длительности кампании печи. Снижения скорости коррозии можно добиться общим понижением температуры пламенного пространства и варки стекломассы, уменьшением толщины теплоизоляционных панелей для локального

снижения температуры огнеупорного бруса варочного пространства в зонах максимальных температур, а именно в зоне варки и осветления стекломассы, установкой в зоне максимальной скорости коррозии дополнительного локального воздушного охлаждения [58].

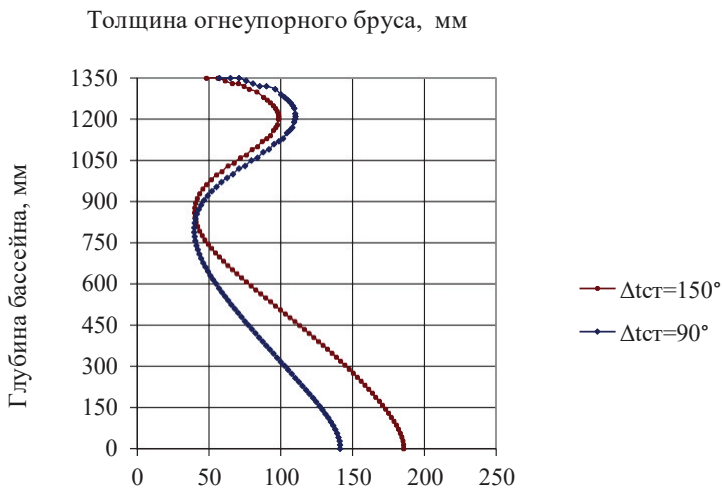


Рисунок 3.2 – Толщины огнеупорного бруса варочного бассейна по глубине бассейна в конце кампании печи в зависимости от величины перепада температуры $\Delta t_{ст}$

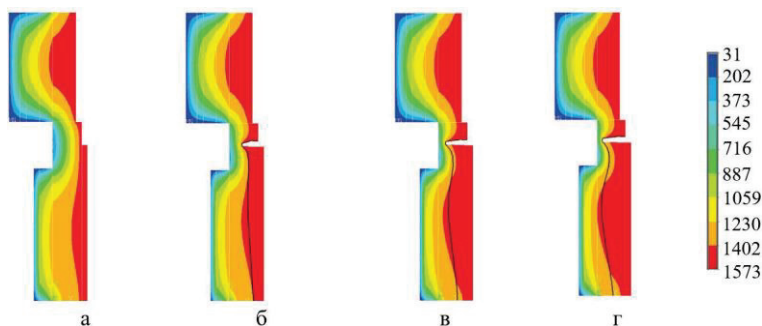


Рисунок 3.3 – Динамика коррозии огнеупорного бруса в зоне варки (граница огнеупора обозначена сплошной жирной линией) и распределение температуры по сечению бокового ограждения на различных этапах с момента пуска печи, °С: а – исходная конфигурация; б – 153 дня; в – 306 суток; г – 417 суток (останов печи)

Температурное поле в продольном сечении ограждения и конфигурация огнеупорного бруса на различных этапах работы печи представлены на рисунке 3.3. Как видно коррозия огнеупора при перепаде температур по глубине бассейна 90°C на линии зеркала стекломассы и на глубине бассейна $500\text{--}650$ мм носят сходный характер.

На рисунке 3.4 представлена зависимость длительности кампании печи от температуры зеркала стекломассы.

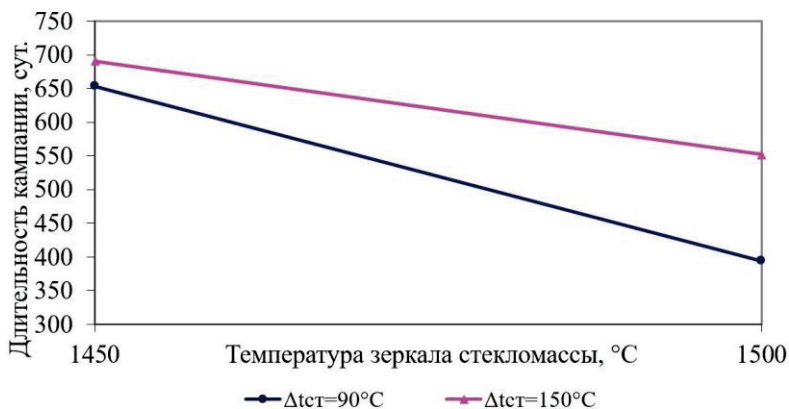


Рисунок 3.4 – Зависимость длительности кампании печи от температуры зеркала стекломассы

Изменение температуры зеркала стекломассы наблюдается при движении расплава от участка загрузки шихты к зоне выработки. Так, диапазон изменения температуры стекломассы выбран в пределах $1450\div 1500^{\circ}\text{C}$. Значение температуры пламенного пространства равным $t_{п.п.}=1575^{\circ}\text{C}$ при перепаде температур по глубине бассейна от $\Delta t_{ст}=90^{\circ}\text{C}$ до $\Delta t_{ст}=150^{\circ}\text{C}$.

Наибольший уровень температур зоны пламенного пространства, а следовательно, и температуры зеркала стекломассы при минимальном перепаде температуры по глубине варочного бассейна, провоцирует максимальную скорость коррозии огнеупорного бруса, что приводит к необходимости проводить дальнейшие исследования с использованием следующих температур: температура пламенного пространства $t_{п.п.}=1575^{\circ}\text{C}$, зеркала стекломассы $t_{з.р.}=1500^{\circ}\text{C}$, перепада температуры по глубине бассейна $\Delta t_{ст.} = 90^{\circ}\text{C}$.

В огнеупорном бруске наблюдается линейное распределение температур (рис. 3.5). Перепад температуры по толщине огнеупора в начале кампании составляет 1317°C , в конце кампании – 837°C при толщинах 250 и $57,2$ мм соот-

ответственно. Столь резкое изменение температуры при малых толщинах огнеупорного материала в конце кампании вызывает значительные термические напряжения в огнеупорном брусе, что в свою очередь может привести к преждевременному разрушению огнеупора еще до достижения заданной минимальной толщины. Однако в рамках данной работы воздействие термомеханических напряжений на условия работы огнеупорных брусьев не рассматривалось.

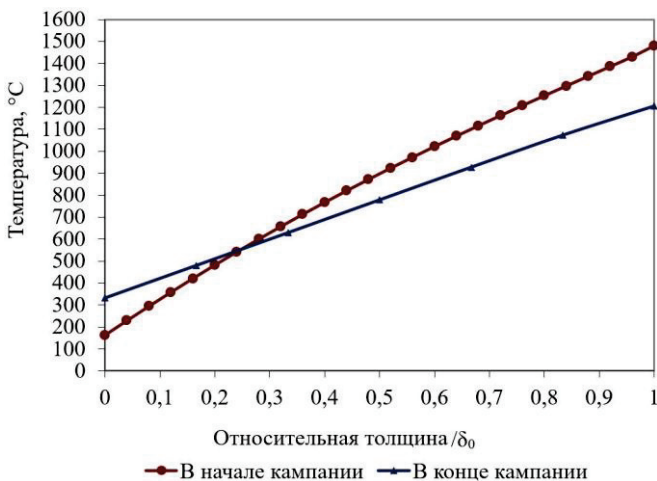


Рисунок 3.5 – Распределение температуры по толщине огнеупорного бруса в начале и конце кампании печи

3.1.2. Исследование влияния толщины слоя изоляционного материала КПД–400 на скорость коррозии огнеупорного бруса при постоянном значении коэффициента теплоотдачи при использовании системы принудительного воздушного охлаждения

Результаты расчета скорости коррозии в разделе 3.1.1 показали, что интенсивность коррозии в зоне теплоизоляционных панелей варочной зоны может быть выше, чем на линии зеркала стекломассы. Таким образом, наиболее очевидным решением, при сохранении исходного уровня температур в пламенном и варочном пространстве является общее снижение температуры внутренней поверхности огнеупорного бруса за счет уменьшения толщины теплоизоляционной панели.

При помощи разработанной программы в программном комплексе ANSYS Mulitphysics проведен вычислительный эксперимент при уменьшении толщины слоя материала КПД–400 от 100 до 50 мм, для различных режимов

работы системы охлаждения. Также рассмотрен случай выполнения изоляции в один слой только с использованием материала КЛ–1,1.

Скорость воздуха при истечении из сопел системы принудительного воздушного охлаждения оказывает определяющее влияние на интенсивность теплообмена в зоне обдува, что в свою очередь сказывается на скорости коррозии огнеупорного материала. Это требует диагностики работы стенового бруса на различных режимах эксплуатации системы воздушного охлаждения.

Для исследования влияния скорости истечения воздуха было задано изменение коэффициента теплоотдачи в зоне обдува при прочих постоянных параметрах системы.

Зависимость длительности кампании от толщины слоя теплоизоляционного материала КПД–400. При этом рассмотрены три варианта интенсивности теплообмена при использовании системы принудительного воздушного охлаждения. Значения коэффициента теплоотдачи изменяются в диапазоне от 100 до 300 Вт/(м²°С) с шагом 100 Вт/(м²°С), что соответствует реальным показателям (рис. 3.6). В этом случае, характер кривых, описывающих зависимость длительности кампании печи от толщины теплоизоляционных панелей, имеют стремительно убывающий эквидистантный характер при увеличении толщины теплоизоляционного слоя.

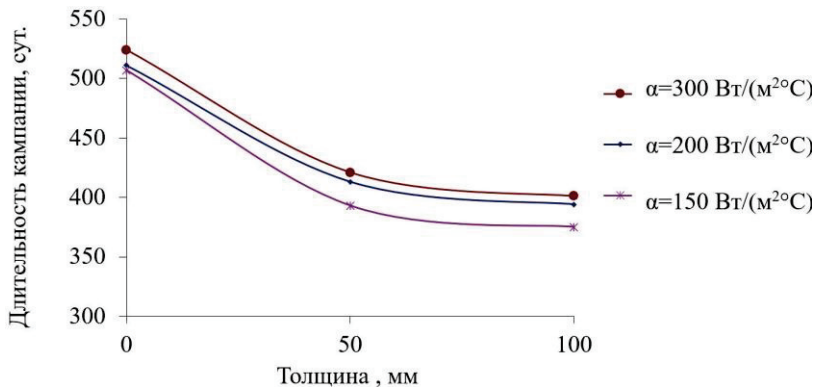


Рисунок 3.6 – Длительность кампании печи в зависимости от толщины теплоизоляционной панели из материала КПД–400 при различных коэффициентах теплоотдачи на линии зеркала стекломассы

Это объясняется общим повышением температуры огнеупорного бруса по глубине бассейна и, следовательно, повышением скорости коррозии в опасных сечениях на глубинах 500÷600 мм от уровня зеркала стекломассы, которая

может быть сопоставима и даже превышать скорость коррозии на линии зеркала стекломассы (рис. 3.2). При этом, наблюдаемая разница в значениях длительности кампании при снижении коэффициента теплоотдачи от 300 до 200 Вт/(м²С), составляет, в среднем, 2,04% во всем диапазоне изменения толщины теплоизоляционного материала КПД–400.

При уменьшении коэффициента теплоотдачи до 100 Вт/(м²С) наблюдается резкое снижение длительности кампании печи до 363 суток, которое носит линейный характер. Это связано с тем, что из-за недостаточного охлаждения, скорость коррозии на линии зеркала стекломассы значительно превышает скорость коррозии в опасных сечениях на глубинах 500÷600 мм, и является определяющей при расчете срока службы.

Так, длительность кампании печи в случае применения слоя материала КПД–400 толщиной 50 или 100 мм и коэффициенте теплоотдачи 100 Вт/(м²С) по сравнению с аналогичными толщинами, и при коэффициенте теплоотдачи 200 Вт/(м²С) отличается на 12,11% и 7,86% соответственно. Использование в качестве теплоизоляционного материала только КЛ–1,1 при коэффициенте теплоотдачи 200 Вт/(м²С) увеличивает длительность кампании на 28,57% (по результатам вычислительного эксперимента).

Следовательно, режим обдува с коэффициентами теплоотдачи 300 и 100 Вт/(м²С) являются нецелесообразными в первом случае с точки зрения затрат на обеспечение высокого уровня коэффициента теплоотдачи в зоне обдува, во втором случае – с точки зрения длительности работы огнеупорного бруса.

Поэтому более детально изучим вариант, при котором уровень коэффициента теплоотдачи в зоне обдува составляет 200 Вт/(м²С).

На рисунках 3.7 и 3.8 представлено распределение температуры и удельной плотности теплового потока по высоте теплоизоляционной панели варочного пространства. Как видно, присутствие материала КПД–400 значительно снижает температурный уровень наружной поверхности, а также удельные плотности теплового потока.

Снижение максимального уровня температуры при увеличении толщины материала КПД–400 от 0 до 100 мм лежит в диапазоне от 433,74 до 139,55° С.

Значения плотности теплового потока снижаются от 6018 Вт/м² до 1563 Вт/м². Таким образом, снижение температуры происходит на 67,8%, а удельной плотности теплового потока – на 74%.

На рисунке 3.9 показано изменение скорости коррозии огнеупорного бруса на протяжении кампании печи в опасных сечениях огнеупорного бруса, а именно на линии зеркала стекломассы и на глубине 650 мм от уровня стекла в случае применения материала КПД–400 толщиной 50 мм.

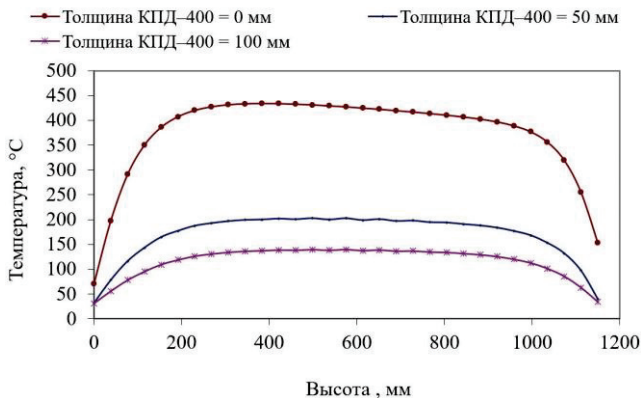


Рисунок 3.7 – Температура внешней поверхности теплоизоляционной панели зоны варочного пространства в конце кампании печи

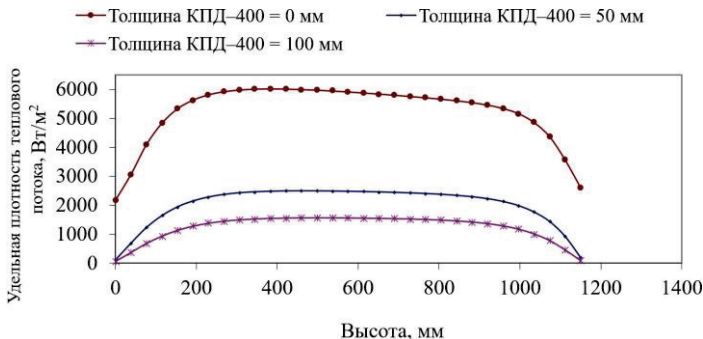


Рисунок 3.8 – Удельная плотность теплового потока на внешней поверхности теплоизоляционной панели зоны варочного пространства в конце кампании печи

Так под воздействием принудительного охлаждения скорость коррозии на линии зеркала стекломассы в начале и конце кампании отличается на 92,9% (0,864 мм/сут и 0,062 мм/сут); на глубине 650 мм отличие в скорости коррозии составило 30,9% (0,603 мм/сут и 0,417 мм/сут). При этом последние 100 дней работы печи характеризуются константным значением скорости коррозии на линии зеркала стекломассы. Этот эффект достигается за счет понижения температуры внутренней поверхности огнеупорного бруса под воздействием принудительного воздушного охлаждения вследствие его малой толщины на заключительном этапе работы. Отдельный интерес вызывает изучение скорости коррозии на протяжении кампании печи в случае использования материала КПД-400 различной толщины. На рисунке 3.10 представлена зависимость

длительности кампании печи от скорости коррозии на глубине 500÷650 мм от линии зеркала стекломассы.

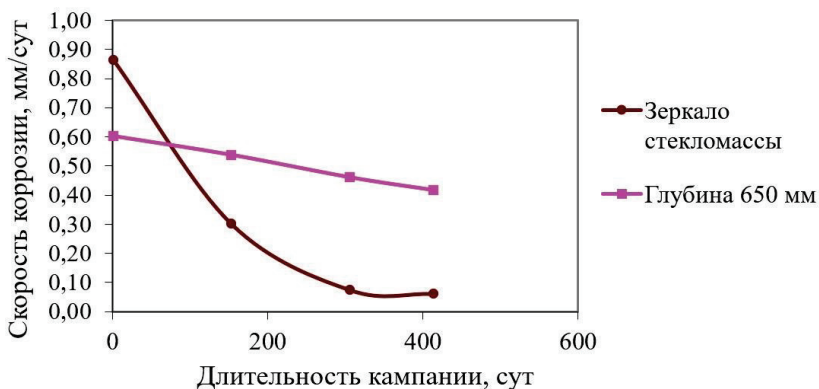


Рисунок 3.9 – Скорость коррозии на протяжении кампании печи

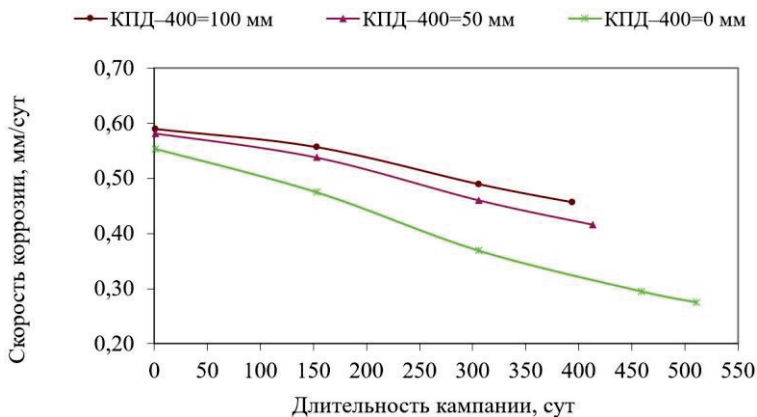


Рисунок 3.10 – Скорость коррозии на глубине 650 мм от зеркала стекломассы при изменении толщины материала КПД-400

Рассмотрим влияние толщины теплоизоляционного слоя материала КПД – 400 на скорость коррозии в начале и конце кампании печи. Исходным вариантом будем считать двухслойную теплоизоляционную панель варочного пространства с толщиной материала КПД-400 равную 100 мм. Уменьшение толщины слоя КПД-400 до 50 мм приводит к снижению скорости коррозии на 1,2% и 5,9% в начале и конце кампании соответственно. В случае отсутствия

материала КПД–400 наблюдается уменьшение скорости коррозии на 8,1% и 30,0% в начале и конце процесса работы печи.

Рассмотренные характеристики процесса коррозионного износа огнеупорных материалов на различных уровнях по глубине стекломассы позволяют оценивать влияние толщины теплоизоляционной панели на длительность кампании, а также создают основу для разработки эвристических правил при оптимизационных расчетах параметров бокового ограждения.

3.2. Влияние расположения ряда сопел воздушного охлаждения относительно зеркала стекломассы на скорость коррозии стеновых брусьев

Под действием принудительного охлаждения локальная температура огнеупорного бруса, следовательно и скорость коррозии бруса снижается. Проведено исследование для определения влияния положения соплового аппарата системы принудительного охлаждения на скорость коррозии огнеупорных брусьев варочного бассейна и, как следствие, на длительность кампании печи.

На рисунке 3.11 представлена зависимость длительности кампании печи от высоты расположения соплового аппарата относительно зеркала стекломассы.

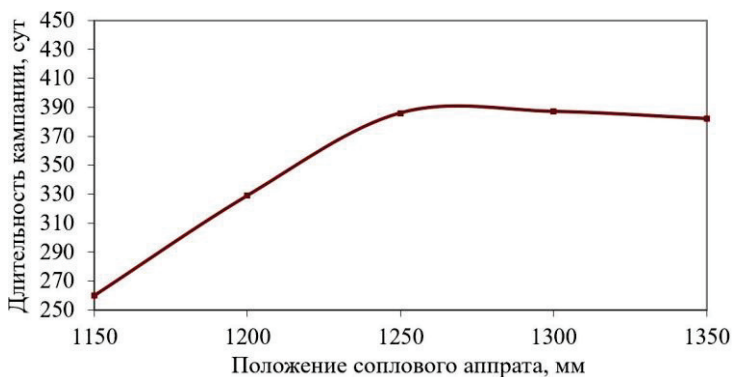


Рисунок 3.11 – Зависимость периода стойкости огнеупорного бруса от высоты расположения соплового аппарата относительно зеркала стекломассы

Перемещение соплового аппарата осуществлялось вниз от линии зеркала стекломассы с шагом 50 мм до отметки 1150 мм. По сравнению с исходным вариантом длительность кампании при размещении соплового аппарата на высоте 1250 мм незначительно увеличивается. Это связано с тем, что интенсивность обдува все еще достаточно велика, но в тоже время происходит

некоторое снижение температуры стенового бруса. Дальнейшее понижение уровня соплового аппарата приводит к резкому увеличению скорости коррозии на линии зеркала стекломассы.

Значения величины скорости коррозии на линии зеркала стекломассы и на глубинах 500÷650 мм от уровня стекломассы в конце кампании печи в зависимости от положения соплового аппарата системы принудительного охлаждения представлены на рисунке 3.12. По сравнению с исходным вариантом скорость коррозии в первом случае увеличивается на 15,4%, а во втором случае – на 63,6%. На глубине 650 мм от уровня стекломассы скорость коррозии снижается на 0,003 мм/сут. Затем при смещении соплового аппарата на отметку 1150 мм скорость коррозии возрастает на 0,055 мм/сут, что составляет 0,8% и 11,7% соответственно.

Сравнение скорости коррозии на линии зеркала стекломассы и на глубине 500÷650 мм на протяжении кампании печи представлены на рисунке 3.13. Рассмотрены случаи расположения соплового аппарата на высоте 1250 и 1150 мм как наиболее отличающиеся по длительности кампании.

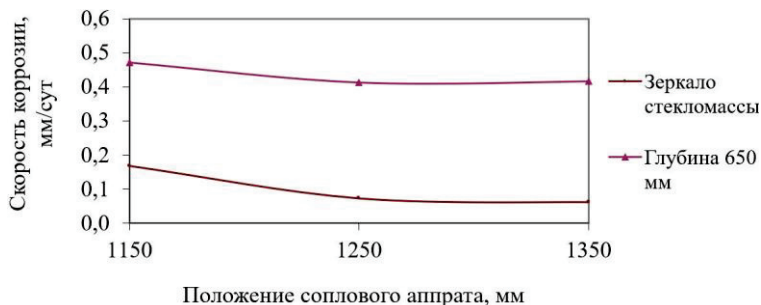


Рисунок 3.12 – Скорость коррозии огнеупорного бруса в конце кампании печи на линии зеркала стекломассы и на глубине 650 мм в зависимости от расположения системы воздушного охлаждения

Из графика видно, что на глубине 650 мм скорость коррозии для обоих случаев практически идентична (максимальное отличие составляет 1,3%). На линии зеркала стекломассы отличие скорости коррозии в начале кампании составляет 0,140 мм/сут (14,9%), при этом в случае расположения соплового аппарата на уровне 1150 мм наблюдается линейное распределение скорости коррозии огнеупорного бруса. При расположении соплового аппарата на уровне 1250 мм характер изменения скорости коррозии носит криволинейный характер.

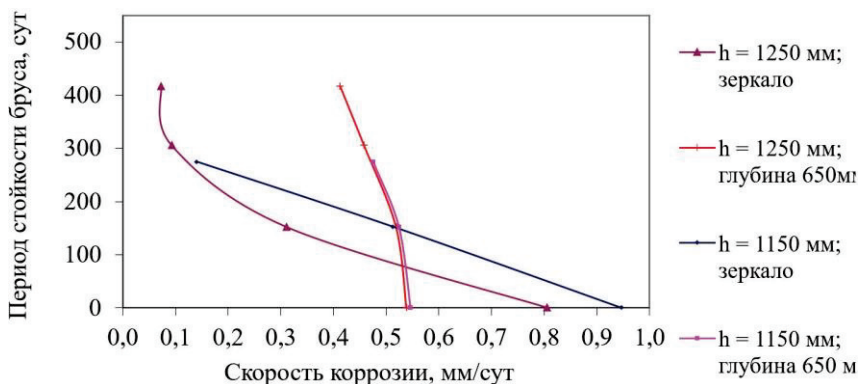


Рисунок 3.13 – Зависимость периода стойкости огнеупорного бруса от скорости коррозии при изменении толщины материала КППД–400 при различной высоте расположения h сопел системы воздушного охлаждения

В работе [56] приведены данные, что система охлаждения должна обеспечивать максимально возможную скорость истечения воздуха. Это снизит скорость коррозии огнеупора на линии зеркала стекломассы и позволит значительно продлить срок службы ограждения. Однако, вновь полученные данные говорят о том, что скорость коррозии огнеупора на глубине 500÷600 мм от линии зеркала стекломассы может значительно превышать значения скорости коррозии огнеупора на линии зеркала стекломассы. Тем самым достаточно обеспечить скорость коррозии ниже, чем на глубине 500÷600 мм от линии зеркала стекломассы.

Отличительной особенностью изменения скорости коррозии на протяжении кампании является то, что на заключительном этапе эта величина принимает константное значение. Графики на рисунке 3.14 демонстрируют, что при остаточной толщине огнеупорного бруса равной 61,7 мм, скорость коррозии снижается до 0,073 мм/сут и остается постоянной до завершения срока службы ограждения. Это позволяет сделать вывод о том, что аналогичные процессы будут протекать на глубине 650 мм от уровня зеркала стекломассы при наличии принудительного охлаждения на данном участке.

На рисунке 3.15 представлено изменение температуры наружной поверхности огнеупорного бруса в зависимости от положения соплового аппарата на протяжении кампании печи. Отличие температуры огнеупорного материала в начале кампании печи в случае установки соплового аппарата на высоте 1250 мм и 1150 мм по сравнению с исходным вариантом составляет 39,7% (107°С) и 64,8% (300,6°С), соответственно. В конце кампании при наружной температуре огнеупорного бруса равной 864,06°С это отличие составляет 38,3% (209,6°С) и 60,9% (526,4°С), соответственно.

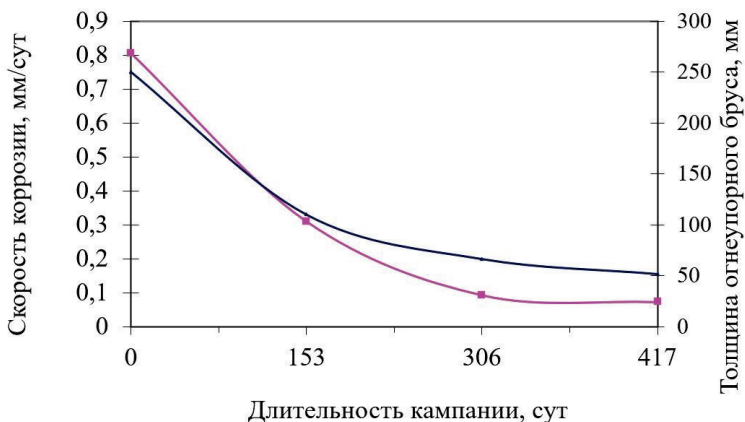


Рисунок 3.14 – Изменение скорости коррозии и толщины огнеупорного бруса на протяжении кампании печи:

1 – толщина огнеупорного бруса, мм; 2 – скорость коррозии, мм/сут.

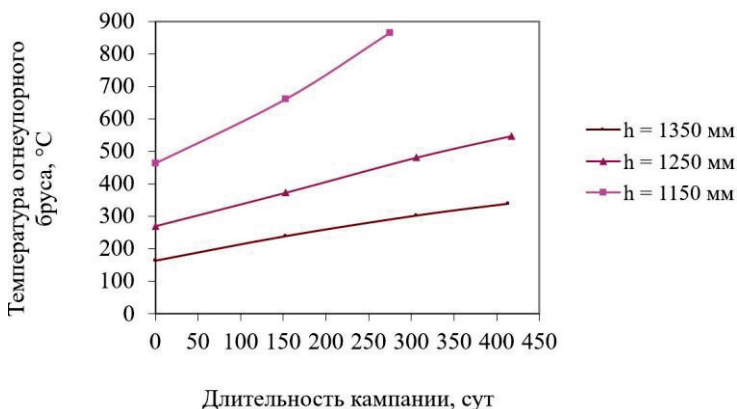


Рисунок 3.15 – Температура наружной поверхности огнеупорного бруса на линии зеркала стекломассы в зависимости от высоты расположения h соплового аппарата системы воздушного охлаждения

Таким образом, расположение сопел системы воздушного охлаждения ниже зеркала стекломассы на 200 мм вызывает увеличение температуры огнеупорного бруса в области зеркала стекломассы по сравнению с исходным вариантом. Это приводит к значительному увеличению скорости коррозии в точке раздела трех фаз и резкому сокращению длительности эксплуатации огнеупорных брусьев варочной зоны.

Исследования показали, что изменение положения сопел системы принудительного воздушного охлаждения не влияет на скорость коррозии в опасных сечениях на глубинах 500÷650 мм, что говорит о целесообразности размещения сопел на линии зеркала стекломассы. В качестве мероприятий по уменьшению скорости коррозии на глубине 500÷650 мм может рассматриваться вариант теплоизоляционной панели с уменьшенной толщиной теплоизоляционных материалов в данной зоне, а также возможность применения дополнительного принудительного обдува огнеупорного бруса на данных глубинах, что применялось в более ранних конструкциях печей при отсутствии тепловой изоляции в зоне варки [87 – 89].

4. КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МЕТОД ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА ФУНКЦИИ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

4.1. Оптимизация бокового ограждения стекловаренной печи. Основные понятия и этапы оптимизационного вычислительного эксперимента

Оптимизацией является выбор наилучшего варианта рассматриваемого объекта из множества альтернативных, реально возможных, конкурирующих.

Существует большое число определенных наилучшего варианта объекта (оптимум). Среди них отметим следующие:

1) вариант, соответствующий экстремальному значению (минимуму или максимуму) некоторого принятого критерия эффективности (критерий оптимальности, показатель оптимальности, целевая функция) объекта и удовлетворяющий всем реальным ограничениям;

2) совокупность наиболее благоприятных условий функционирования объекта;

3) наилучший вариант решения некоторой задачи рассматриваемого объекта;

4) путь достижения цели при заданных условиях и ресурсах.

При дальнейшем рассмотрении задачи оптимизации будем исходить из первого определения наилучшего варианта объекта.

В соответствии с ним производственный оптимум – это наиболее эффективное функционирование производственной системы, приводящее к наилучшему использованию ресурсов, при котором достигается возможный максимальный эффект производства соответственно используемому показателю или критерию эффективности.

Вычислительный эксперимент в более широком, производственном смысле – новая технология комплекса работ по созданию и функционированию объекта на всех или основных этапах его жизненного цикла.

В работе [90] выделено шесть основных этапов, шесть составных частей оптимизационного вычислительного эксперимента:

1. Выбор либо разработка критерия эффективности объекта;

2. Формирование либо создание математической модели объекта;

3. Выбор либо разработка метода поиска экстремума критерия эффективности;

4. Выбор, разработка или синтез алгоритма и программы оптимизации объекта;

5. Проведение первой части оптимизационного вычислительного эксперимента: оптимизирующие компьютерные расчеты;

6. Проведение второй части оптимизационного вычислительного эксперимента: обработка результатов оптимизации, их анализ и формирование выводов.

Далее рассматриваются эти основные этапы оптимизационного вычислительного эксперимента применительно к задачам диссертационной работы.

4.2. Критерии эффективности бокового ограждения стекловаренной печи

Обоснование критериев эффективности является решающей стадией формулирования целей функционирования оборудования и установок. Для этого необходимо учитывать все особенности и свойства системы, ее подсистем и элементов, условия их функционирования, взаимодействия внутри системы и с внешней средой.

Функциональная классификацией критериев, впервые предложенная в [91] позволяет систематизировать критерии и показатели эффективности химико – и энерготехнологических систем и их элементов по главным классификационным признакам.

Более универсальными являются экономические критерии. Они более объективны, так как с помощью денежных эквивалентов трансформируют, сводят воедино качественные и количественные характеристики систем и их элементов, множество частных показателей эффективности.

Размерность оптимизационной задачи зависит от факторов, влияющих на выбранный критерий эффективности. Расчет скорости коррозии, а следовательно, и продолжительности срока службы огнеупорного бруса варочного бассейна зависят от уровня температуры на границе расплав стекломассы–огнеупорный материал. Данная температура, в свою очередь, зависит от геометрических, начальных и граничных условий, типов огнеупорных и теплоизоляционных материалов, используемых в боковых ограждениях, интенсивности теплообмена при естественной и вынужденной конвекции на наружных поверхностях стеновых брусьев и теплоизоляционных панелей.

При наложении тепловой изоляции на наружную поверхность стеновых брусьев рабочего пространства и варочного бассейна происходит существенное повышение температуры внутренней поверхности огнеупорного бруса. В варочной зоне это вызывает интенсификацию коррозионных процессов на границе расплав стекломассы – стеновой брус. При этом в случае применения системы принудительного воздушного охлаждения для наружной поверхности

бруса на линии зеркала стекломассы, зона максимальной интенсивности коррозионных процессов смещается с границы раздела трех фаз (огнеупорный материал–расплав стекломассы–пламенное пространство) в глубину бассейна, покрытую тепловой изоляцией.

Таким образом, целесообразно рассмотреть задачу минимизации тепловых потерь через боковое ограждение печи при максимальном периоде работы огнеупорных брусьев в случае использования принудительного воздушного охлаждения наружной поверхности варочного бассейна на линии зеркала стекломассы. Снижение тепловых потерь через боковое ограждение достигается применением различных вариантов компоновки теплоизоляционных панелей зоны варочного бассейна путем изменения толщины и марки теплоизоляционных материалов, составляющих теплоизоляционную панель.

Экономическое обоснование целесообразности использования какого-либо варианта изоляционных панелей требует ввода в обиход критерия эффективности, позволяющего сопоставить затраты на тепловую изоляцию и затраты за счет тепловых потерь через теплоизоляционную конструкцию, имеющие место при эксплуатации ограждения с данным набором изоляционных материалов.

В качестве критерия эффективности в работе используется максимальный валовый доход за период кампании печи. Применение данного критерия позволяет оценить влияние работы ограждения на максимальный доход, получаемый предприятием от эксплуатации рассматриваемой печи $D_{вал.мах}$, руб./кампания.

$$D_{вал.мах} = G_{сут} \cdot \tau - \left(\varepsilon_{сут} + K + \frac{Q_{потерь}}{Q_n^p} \cdot \tau \right) \cdot C_{пр.г} \quad (4.1)$$

где τ – время работы стекловаренной печи с момента выхода на номинальный режим до остановки на холодный ремонт, сут/кампания;

$G_{сут}$ – суточный объем выпускаемой продукции, т/сут;

$C_{ст}$ – цена тонны стекольной продукции при отпуске с предприятия, руб./т;

$\varepsilon_{сут}$ – суточные эксплуатационные затраты, руб./сут;

K – капитальные вложения, руб./кампания;

$Q_{потерь}$ – среднеинтегральное значение тепловых потерь с погонного метра изоляционной конструкции за кампанию печи, кДж/сут;

Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³.

$C_{пр.г}$ – цена природного газа, руб./(1000 м³);

$$\varepsilon_{сут} = \varepsilon_3 + \varepsilon_{топ} + \varepsilon_{тод} + \varepsilon_{товар} \quad (4.2)$$

где ε_3 – суточные затраты на энергию для работы вентиляторов, руб./сут;

$Z_{\text{тов}}$ – суточные затраты (отчисления) на амортизацию, текущие и капитальные ремонты, содержание вентиляторов, руб./сут;

$Z_{\text{тоэд}}$ – суточные затраты (отчисления) на амортизацию, текущие и капитальные ремонты, содержание приводных электродвигателей, руб./сут;

$Z_{\text{товвэр}}$ – суточные затраты (отчисления) на амортизацию, текущие и капитальные ремонты, содержание системы воздухопроводов и запорно–регулирующей арматуры системы принудительного воздушного охлаждения, руб./сут.

$$K = (C_{\text{иК}} + C_{\text{иП}} + V_{\text{иК}} \cdot k_{\text{стК}} + F_{\text{иП}} \cdot k_{\text{стП}} + F_{\text{иП}} \cdot k_{\text{стМ}}) + (Z_{\text{эмК}} + Z_{\text{эмП}} + P_{\text{ОП}} + C_{\text{эвспво}} + K_{\text{спво}}), \quad (4.3)$$

где $C_{\text{иК}}$ – стоимость огнеупорного кирпича ТКСП, руб.;

$C_{\text{иП}}$ – стоимость теплоизоляционных панелей ТКСП, руб.;

$V_{\text{иК}}$ – объем огнеупорного кирпича ТКСП, м³;

$k_{\text{стК}}$ – стоимость работ по монтажу огнеупорного кирпича ТКСП, руб./м³;

$F_{\text{иП}}$ – площадь поверхности теплоизоляционных панелей, м²;

$k_{\text{стП}}$ – стоимость работ по монтажу теплоизоляционных панелей ТКСП, руб./м²;

$k_{\text{стМ}}$ – стоимость подготовительных работ по монтажу теплоизоляционных панелей ТКСП, руб./м²;

$Z_{\text{эмК}}$ – затраты на эксплуатацию машин и механизмов при укладке огнеупорного кирпича, руб.;

$Z_{\text{эмП}}$ – затраты на эксплуатацию машин и механизмов при укладке теплоизоляционных панелей, руб.;

$P_{\text{ОП}}$ – затраты общепроизводственные, руб.;

$C_{\text{эвспво}}$ – стоимость электродвигателей и вентиляторов системы принудительного воздушного охлаждения, руб.;

$K_{\text{спво}}$ – капитальные вложения на сооружение системы принудительного воздушного охлаждения, руб.;

Представим расходную часть критерия эффективности в виде суммы составляющих, и определим влияние каждого слагаемого на критерий эффективности путем вычисления отношения каждого слагаемого суммы к критерию эффективности. Далее полученные отношения ранжируются по значению от минимума до максимума и выделяются параметры, оказывающие наибольшее воздействие на критерий эффективности.

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial K_{\text{вал.мах}}} = \frac{Z_{\text{тоэд}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{Z_{\text{тов}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{Z_{\text{тоэд}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{Z_{\text{товвэр}}}{D_{\text{вал.мах}}} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial K}{\partial K_{\text{вал.мах}}} = \left(\frac{C_{\text{иК}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{C_{\text{иП}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{V_{\text{иК}} \cdot k_{\text{стК}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{F_{\text{иП}} \cdot k_{\text{стП}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{F_{\text{иП}} \cdot k_{\text{стМ}}}{D_{\text{вал.мах}}} \right) +$$

$$+\left(\frac{Z_{\text{эмМК}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{Z_{\text{эмМГ}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{P_{\text{оп}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{Ц_{\text{ЭВСПВО}}}{D_{\text{вал.мах}}} + \frac{K_{\text{СПВО}}}{D_{\text{вал.мах}}} \right). \quad (4.5)$$

Если боковое ограждение состоит только из огнеупорных материалов, то величины с индексом «П» равны нулю.

Уменьшение соотношения $\frac{Q_{\text{потерь}}}{D_{\text{вал.мах}}} \cdot \Pi_{\text{пр.г}}$ может быть осуществлено за счет увеличения толщины слоев или их общего количества, уменьшения коэффициента теплопроводности материалов, используемых в теплоизоляционной конструкции.

Выявив составляющие, оказывающие наибольшее влияние на критерий эффективности, выбираем таким образом независимые переменные, чтобы минимизировать критерий эффективности.

Зная величину тепловых потерь базового и оптимального вариантов, можно определить экономию топлива в денежном эквиваленте за период кампании печи, сопоставив величину тепловых потерь с теплотой сгорания 1 м³ природного газа (условного топлива).

4.3. Критерий эффективности кампании печи

Математическая модель длительности службы огнеупорных брусьев ваочного бассейна является имитационной. Такие математические модели являются алгоритмическими моделями, отражающие развитие процесса (поведение исследуемого объекта) во времени при задании внешних воздействий на процесс (объект). Например, это заданные в алгоритмической форме модели поведения энерготехнологической установки при плановом изменении ее производительности и (или) при изменении параметров окружающей среды.

Имитационное математическое моделирование основано на прямом описании моделируемого объекта. Существенной характеристикой таких моделей является структурное подобие объекта и модели.

Ценным качеством имитации является возможность управлять масштабом времени. Динамический процесс в имитационной модели протекает в так называемом системном времени. Системное время имитирует реальное время. При этом пересчет системного времени в модели можно выполнять двумя способами. Первый способ заключается в «движении» по времени с некоторым постоянным шагом. Второй способ заключается в «движении» по времени от события к событию, при этом считается, что в промежутках времени между событиями в модели изменений не происходит.

В диссертационном исследовании выбран первый способ имитации времени, при котором одна расчетная итерация соответствует одним суткам работы печи.

Математическая модель является детерминированной и описывает поведение объекта с позиций полной определенности в настоящем и будущем.

4.4. Выбор метода поиска экстремума

4.4.1. Независимые переменные математической модели

Методы поиска экстремума (далее для краткости будем применять термин «оптимизация») критериев эффективности сложных энерготехнологических систем (ЭТС) и их элементов подразделяются на три группы [92, 93].

Наиболее эффективными методами, являются такие, которые условно можно назвать эволюционными. В [94] сравнены «два наиболее ярких представителя эволюционных методов – феноменологический эвристико-эволюционный подход [91, 95 – 101] и «биологический» подход (использование нейронных сетей и генетических алгоритмов) [102]».

Среди перечисленных групп методов для нас наибольший интерес представляют прямые и эволюционные методы, в частности – феноменологический эвристико-эволюционный подход.

Прямые методы используются в качестве инструмента для решения локальных задач, например, задач расчета элементов систем, оборудования в трех других группах методов поиска экстремума. Применительно к оборудованию энерго-технологических систем они описаны в [101].

В настоящей работе в качестве метода оптимизации используется эвристико-эволюционный метод проф. Каневца Г.Е. Независимые переменные выбраны исходя из реальных технологических условий, оказывающих наибольшее влияние на процесс варки стекломассы. Такие параметры приведены ниже в характерных для современных стекловаренных печей диапазонах, среди них: перепад температуры по глубине бассейна; температура рабочего пространства; температура зеркала стекломассы; коэффициенты теплообмена, обеспечиваемые системой принудительного воздушного охлаждения; толщина теплоизоляционных материалов зоны варочного бассейна; стоимость теплоизоляционных материалов; стоимость природного газа.

В качестве независимых переменных взяты следующие параметры:

I режимные

1) изменение перепада температуры по глубине варочного бассейна, °С

1 $\Delta t = 150$;

2 $\Delta t = 130$;

3 $\Delta t = 110$;

4 $\Delta t = 90$;

2) изменение температуры варки на поверхности стекломассы и соответствующая ей температура пламенного пространства, °С

1 $t_{\text{зер}} = 1475$; $t_{\text{п.п.}} = 1525$;

2 $t_{\text{зер}} = 1500$; $t_{\text{п.п.}} = 1550$;

3 $t_{\text{зер}} = 1525$; $t_{\text{п.п.}} = 1575$;

4 $t_{\text{зер}} = 1550$; $t_{\text{п.п.}} = 1600$;

3) интенсивность принудительного воздушного охлаждения, Вт/(м²°С)

1 $\alpha_{\text{возд. прин.}} = 200$;

2 $\alpha_{\text{возд. прин.}} = 240$;

3 $\alpha_{\text{возд. прин.}} = 300$;

4 $\alpha_{\text{возд. прин.}} = 360$;

II конструктивные

1) изменение толщины теплоизоляционной панели КПД–400 в зоне варки, мм

1 $\delta_{\text{КПД-400}} = 230$;

2 $\delta_{\text{КПД-400}} = 114$;

3 $\delta_{\text{КПД-400}} = 65$;

2) изменение толщины теплоизоляционной панели КПД–500 в зоне варки, мм

1 $\delta_{\text{КПД-500}} = 230$;

2 $\delta_{\text{КПД-500}} = 114$;

3 $\delta_{\text{КПД-500}} = 65$;

3) изменение толщины теплоизоляционной панели ШЛ–0,4 в зоне варки, мм

1 $\delta_{\text{ШЛ-0,4}} = 230$;

2 $\delta_{\text{ШЛ-0,4}} = 114$;

3 $\delta_{\text{ШЛ-0,4}} = 65$;

4) изменение толщины теплоизоляционной панели ШЛ–0,9 в зоне варки, мм

1 $\delta_{\text{ШЛ-0,9}} = 230$;

2 $\delta_{\text{ШЛ-0,9}} = 114$;

3 $\delta_{\text{ШЛ-0,9}} = 65$;

5) изменение толщины теплоизоляционной панели ШТЛ–0,6 в зоне варки, мм

1 $\delta_{\text{ШТЛ-0,6}} = 230$;

2 $\delta_{\text{ШТЛ-0,6}} = 114$;

3 $\delta_{\text{ШТЛ-0,6}} = 65$;

6) изменение толщины материала КЛ–1,1

1 $\delta_{\text{КЛ-1.1}} = 230$;

$$2 \delta_{\text{кл-1.1}} = 114;$$

$$3 \delta_{\text{кл-1.1}} = 65;$$

III экономические

1) цена природного газа за 1000 м³, руб.

$$1 C_{\text{пр.г.}} = 4946,56$$

Итого возможно 46 656 сочетаний (вариантов расчета).

Учитывая диапазоны изменения параметров, влияющих на выбранные критерии эффективности, размерность оптимизационной задачи составляет более 45 тысяч вариантов. Для решения задач подобных масштабов необходимо умело использовать методы оптимизации. Преодоление указанных трудностей возможно при использовании изложенного далее феноменологического эвристико-эволюционного подхода к комплексной оптимизации сложных систем.

4.4.2. Основные принципы комплексной оптимизации установок и оборудования на основе феноменологического эвристико-эволюционного подхода

Под феноменологическим подходом понимается учет, использование в первую очередь специфики объектов оптимизации (например, схем, режимов и оборудования производств). Это позволяет существенно уменьшить размерность задач комплексной оптимизации технических систем и создать комплекс оптимизационных методов, практически реализуемый на современных ЭВМ (электронно-вычислительных машинах), имеющий широкую область приложения по объектам и задачам расчета.

Приведенные выше критерии эффективности технических систем как правило являются аддитивными, то есть представляют собой сумму критериев эффективности элементов. Именно это обстоятельство предопределяет, что основная сложность и трудоемкость расчета критериев эффективности технических систем находится на уровне расчета критериев эффективности элементов.

Выбор применяемых методов поиска экстремума зависит от размерности оптимизационной задачи.

В частности, выше показано, что применительно к рассматриваемой в диссертации задаче, размерность оптимизационной задачи составляет более 45 тысяч вариантов. Следовательно, непосредственное применение общеизвестных методов оптимизации многофакторных задач при высоких требованиях к точности расчета критерия эффективности становится затруднительным, а зачастую и невозможным.

Для преодоления указанных трудностей решения комплекса оптимизационных задач в диссертации применен феноменологический эвристико-эволюционный подход проф. Каневца Г.Е. [91, 92, 94–96, 98, 102], основанный на учете специфики схем, режимов и оборудования сложных систем.

Оптимизация схем, режимов и оборудования проводится до тех пор, пока, например, аддитивные приведенные затраты ЭТС достигают минимума, либо уменьшаются по сравнению с исходным вариантом на заданную величину.

При оптимизации оборудования целесообразно применение принципа гибридизаций моделей. Согласно подходу, предложенному Каневцом Г.Е., разрабатываются точные и сложные модели для каждого вида оборудования, и на их основе путем расчетно-теоретического анализа проводится эквивалентирование моделей, то есть создаются простые модели, по точности практически не уступающие сложным для фиксированной области исходных данных. Оптимизация оборудования проводится с помощью этих простых моделей с периодическим их уточнением путем обращения к сложным моделям.

В перспективе, при появлении опыта эквивалентирования и гибридизации моделей, а также при накоплении результатов расчетов в объеме, достаточном для их систематизации и обобщения, возможно непосредственное использование других методов оптимизации многофакторных задач. Однако в настоящее время, основным при решении задач оптимизации сложных систем является феноменологический эвристико-эволюционный подход.

4.4.3. Обобщенная схема реализации феноменологического эвристико – эволюционного подхода при оптимизации бокового ограждения печи

Как указывалось выше, необходимость в феноменологическом эвристико-эволюционном подходе объясняется большой размерностью задачи оптимизации ЭТС на всех уровнях иерархии и сложностью, громоздкостью расчета целевой функции ЭТС, когда непосредственное применение прямых методов оптимизации многофакторных задач становится затруднительным или даже невозможным.

В нем применяются следующие основные эвристико-эволюционные процедуры:

1. Выбираются некоторые исходные: топология (схема) и режим работы ЭТС. Они могут быть получены методами предварительной оптимизации (например, эксерго-топологической), ограничивающими область поиска экстремума, либо заданы, исходя из опыта проектировщиков.

2. С помощью алгоритма синтеза топологии сложных схем формируется матрица смежности топологии ЭТС с проверкой ее реальности.

3. Производится расчет материальных и тепловых балансов ЭТС и ее элементов. В итоге находятся их режимные параметры на входе и выходе.

4. При этих режимных параметрах оптимизируются элементы (оборудование) ЭТС. При этом используются описанные выше прямые методы поиска экстремума либо упрощенные эвристико-эволюционные процедуры.

5. Осуществляется технико-экономический анализ ЭТС. Устанавливаются элементы, вносящие наиболее весомый вклад в критерии эффективности.

6. Для этих элементов используются технико-экономические и другие эвристики с помощью которых изменяется топология и режим работы ЭТС с целью улучшения критерия эффективности.

7. Расчет повторяется с пункта 2.

Таким образом, обеспечивается эволюция схем и режимов к оптимуму.

Отметим, что методы оценки термодинамического совершенства теплотехнологических систем, в частности эксергетический метод анализа и пинч-анализ, могут быть использованы для получения эвристик, углубляющих поиск с помощью феноменологического эвристико-эволюционного подхода оптимальных схем и режимных параметров установок.

Функциональная схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации бокового ограждения печи с помощью методического и информационного обеспечения подсистемы технологического автоматизированного проектирования и оптимизации объекта (решения задач комплексной оптимизации ЭТС (КОЭТС), см. рис. 4.1).

Здесь приняты следующие условные обозначения: Р – режим, P_n – исходный режим, P_o – оптимальный режим, О – ограждение стекловаренной печи, O_o – оптимальное ограждение, АФОР – алгоритм формирования режима, АРО – алгоритм расчета оборудования (одного варианта без оптимизации), ТМОО – точные модули оптимизации оборудования, ГЭМАОО – гибридизированные и эквивалентированные модули алгоритмов оптимизации оборудования.

При реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода используются шесть подсистем:

1. Подсистема формирования режимов (ПФР).

2. Подсистема эвристико-эволюционной оптимизации объекта (ПЭЭО).

3. Подсистема сервиса (ПС).

4. Подсистема информационного обеспечения (ПИО), включающая в себя базы данных.

Подсистемы ПФР, ПС, ПИО в принципе инвариантны относительно метода поиска экстремума (метода оптимизации) и поэтому могут применяться при использовании других методов оптимизации сложных ЭТС.

При замене ПЭЭО на другую подсистему, реализующую подход к оптимизации, отличный от феноменологического эвристико–эволюционного подхода, обобщенная функциональная схема сохраняет свою целостность и лишь изменяет качество.

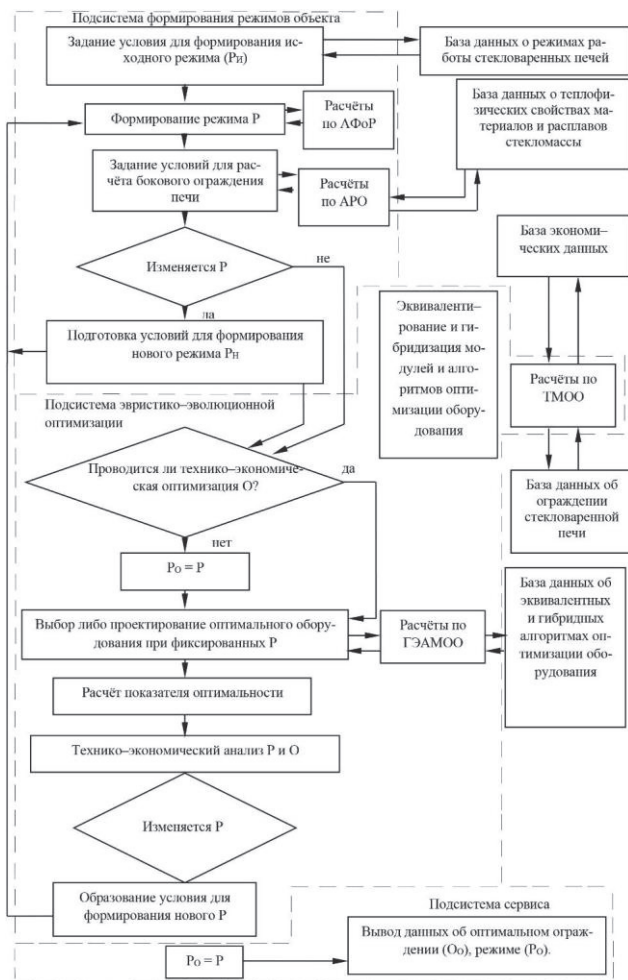


Рисунок 4.1 – Обобщенная функциональная схема реализации феноменологического эвристико – эволюционного подхода при оптимизации ограждения печи

4.5. Алгоритм оптимизационной задачи

Основными компонентами систем оптимизации оборудования и установок являются алгоритмы расчета их показателей и критериев эффективности, а также алгоритмы поиска экстремума критериев эффективности.

Целью расчетов является обоснование при проектировании новых либо реконструируемых производств оптимальности конструкции и материального оформления бассейна стекловаренной печи, его конструктивных параметров, типы применяемых огнеупорных и теплоизоляционных материалов, использование системы охлаждения, ее параметры и др. Перечисленные задачи могут решаться в комплексе, отдельно каждая или в любом сочетании. От этого зависит состав независимых переменных.

Блок-схема реализации алгоритма оптимизации бокового ограждения стекловаренной печи (см. рис. 4.2), аналогична схеме реализации эвристико–эволюционного метода оптимизации ЭТС и состоит из следующих этапов:

1. Компоновка схемы конструкции ограждения варочного бассейна, задается уровень температур в зоне пламенного пространства и зоне варочного бассейна, назначается режим работы системы принудительного воздушного охлаждения, то есть определяется набор переменных, которые в дальнейшем оптимизационном расчете являются независимыми (Б1).

2. Расчет температурного поля в боковом ограждении печи и пристенном слое стекломассы (Б2).

3. Определение периода стойкости огнеупорного бруса в зависимости от исходных параметров и величины тепловых потерь с погонного метра бокового ограждения (Б3).

4. Расчет критерия эффективности (Б4).

5. Осуществление технического анализа путем установления параметров, вносящих наиболее весомый вклад в критерий эффективности (Б5).

6. Применение технико-экономических показателей и эвристик с помощью которых изменяются конструктивное исполнение бокового ограждения, режим работы печи или режим работы системы принудительного воздушного охлаждения с целью улучшения значений критериев эффективности (Б6). Тем самым обеспечивается эволюция компоновки конструкции и режимов к оптимальному.

7. Проверка достижения максимального значения критерия эффективности (Б7).

8. Блок схема изменения набора исходных данных.

9. Расчет повторяется с Б2.



Рисунок 4.2 – Блок-схема реализации оптимизационного алгоритма

Методологической основой эвристико–эволюционного метода является эвристическое программирование или теория эвристических решений, теория адаптации и самоорганизации, теория поиска оптимальных решений на основе упорядоченного перебора [91/93].

Эвристическое правило представляет собой некоторое утверждение, являющееся результатом обобщения существующих научных знаний в некой предметной области (химии, физике, теоретических основ теплотехнической технологии и кибернетики теплотехнологических процессов), либо некоторые гипотезы, допущения или предположения исследователя, либо совокупность факторов, обобщающих многолетний практический опыт принятия рациональных решений специалистами.

Выбор эвристики осуществляется случайным образом по величине ее весового коэффициента, значение которого изменяется в зависимости от результатов предыдущих попыток синтеза с использованием алгоритма обучения [103 – 105].

Использование каждого ЭП (эвристического правила) может привести к выбору рационального решения задачи, не гарантируя в общем случае нахождения оптимального решения. Для разработки эвристических методов и алгоритмов необходимо создать фонд эвристических правил, который может содержать следующие компоненты:

- фонд ЭП толщин материалов;
- фонд ЭП сочетаний теплоизоляционных материалов;
- фонд ЭП высот материалов;
- фонд ЭП расположения соплового аппарата системы воздушного охлаждения.

Эвристические правила компоновки теплоизоляции следующие:

1. Размещать слои тепловой изоляции, соприкасающиеся с высокотемпературной наружной поверхностью огнеупорного материала с минимальным коэффициентом теплопроводности. Это позволяет резко снизить удельную плотность теплового потока на единицу поверхности, а также температуру на поверхности теплоизоляционного слоя.

2. Использовать теплоизоляционные материалы с более высоким коэффициентом теплопроводности и меньшей стоимостью по сравнению с материалом первого слоя. Данные материалы могут компоноваться в несколько слоев разной толщины, причем данный уровень несет на себе основную функцию по снижению температуры и удельной плотности теплового потока.

3. Заключительные слои теплоизоляционной панели могут быть выполнены из широкодоступных изоляционных материалов со значениями коэффициента теплопроводности характерными для тепловой изоляции, применяемой в случае изоляции поверхностей, имеющих относительно не высокую температуру.

4. Суммарная толщина теплоизоляционной панели не должна превышать 350 мм.

5. Сопротивление теплопроводности теплоизоляционной панели стремится к максимуму, одновременно стоимость панели минимальна.

Использование эвристических правил, которые отображают физико-химические, технологические, конструкционные и технико-экономические ограничения компоновки теплоизоляционных панелей, позволяет применять эвристико-эволюционный метод поиска оптимального сочетания изоляционных материалов.

Самообучающаяся процедура оптимального выбора ЭП из некоторого заранее составленного набора ЭП базируется на использовании либо аппарата теории вероятностей, либо аппарата теории нечетких множеств [91].

При использовании теории вероятностей происходит случайный выбор эвристик, каждой из которых присвоен оценочный коэффициент, величина которого равна вероятности предпочтительного выбора этой эвристики на данном этапе оптимизации.

Значения весовых оценочных коэффициентов эвристик, используемых в той или иной серии попыток оптимизации изменяются по результатам предыдущих оптимизационных итераций в соответствии с алгоритмом самообучения. Для первой итерации оценочный коэффициент всех ЭП одинаков. Значения оценочных коэффициентов ЭП корректируется со вторым приближением по результатам наиболее показательной попытки последней серии в сравнении с предыдущими сериями. Показательной попыткой называю либо такую «наилучшую попытку», в результате которой получен оптимальный вариант теплоизоляционной панели, т.е. панели с минимальными критериями эффективности, если последняя серия обеспечила синтез оптимального по сравнению с предыдущими сериями попыток варианта теплоизоляционной панели, либо такую «наихудшую попытку», в результате которой синтезирован наихудший вариант теплоизоляционной панели, т.е. вариант с максимальным значением КЭ, если последняя серия попыток обеспечила наихудший по сравнению с предыдущими сериями вариант теплоизоляционной панели.

Значения оценочных коэффициентов эвристик, использованных при реализации «наилучшей попытки», на последующей серии попыток синтеза увеличиваются, а значения оценочных коэффициентов эвристических правил, использованных при синтезе наихудшей попытки уменьшаются, что и обеспечивает процедуру самообучения.

Для формирования структуры методического, информационного и программного обеспечения комплексной оптимизации [103] ограждения стекловаренной печи (объекта) необходимо реализовать следующие 19 этапов работ (рис. 4.3):

1. Создать системные классификации объектов расчета и оптимизации (схем ЭТС, режимных параметров, основных видов оборудования, объектов рутинного проектирования).

2. Создать системные классификации видов расчета объектов с установлением иерархии этих расчетов.

3. Создать идеологию комплексной оптимизации объекта (КОО).

4. Разработать обобщенные структуры формирования режимов.

5. Сформировать базу данных о теплофизических свойствах веществ.

6. Разработать общие (унифицированные) и специфические модули расчета процессов массопереноса, теплопередачи, теплоотдачи, гидромеханики, конструкторских, экономических, сервисных расчетов, как элементы обобщенных структур расчета основных видов оборудования.

7. Установить иерархию всего комплекса обобщенных структур, расчетных модулей и алгоритмов.

8. Разработать алгоритмы генерации режимов. Сформировать базу данных о режимах.

9. Разработать алгоритмы расчета и технико-экономической оптимизации основных видов оборудования. Сформировать базы данных об оборудовании и экономических показателях.

10. Разработать методы и алгоритмы уточненной, технико-экономической оптимизации на всех уровнях.

11÷13. Провести программирование алгоритмов, перечисленных в пунктах 8÷10.

14÷17. Разработать комплексное обеспечение для эквивалентирования математических моделей и алгоритмов: обобщенные алгоритмы и программы эквивалентирования (14); эквивалентированные модели и расчетные модули (15); эквивалентированные алгоритмы КОО (16); программы соответственно эквивалентированным алгоритмам (17).

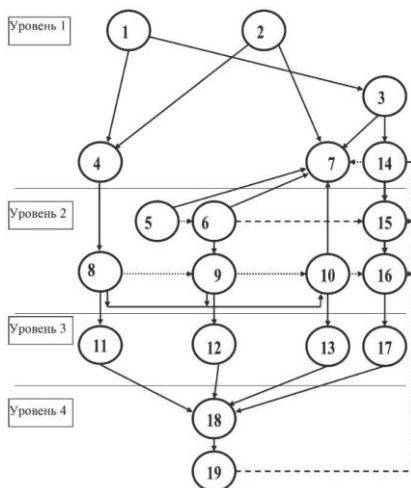


Рисунок 4.3 – Структура синтеза методического, информационного и программного обеспечения комплексной оптимизации режимов сложных технических систем при фиксировании их топологии:
Уровень 1. Системный анализ. Уровень 2. Математическое моделирование.
Уровень 3. Программирование. Уровень 4. Расчетно-теоретический анализ

18. Провести комплекс оптимизирующих расчетов на ЭВМ.

19. Провести расчетно-теоретический анализ результатов расчетов и разработать рекомендации по развитию методической основы КОЭТС.

5. ССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ НА ЕЕ ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. Режимные, конструктивные параметры печи и теплоизоляционной конструкции бокового ограждения

В настоящей главе выполняется моделирование работы бокового ограждения варочного бассейна стекловаренной печи при наличии теплоизоляционной конструкции [44], а также системы принудительного воздушного охлаждения. С целью определения оптимального набора теплоизоляционных материалов рассчитывается ряд вариантов теплоизоляционной конструкции высокопроизводительной стекловаренной печи.

Геометрические параметры ограждения плавильного агрегата, конфигурация теплоизоляционных панелей, температурные режимы и условия работы системы воздушного охлаждения приведены в таблице 5.1. Параметры дутьевых устройств, которые могут применяться в системе принудительного воздушного охлаждения приведены в таблице 5.2.

В таблице 5.3 приведены варианты компоновки ТКСП с учетом выводов, приведенных в главе 3. Так, многослойная теплоизоляционная панель в зоне расплава, на высоте 750 мм от уровня пода (или 650 мм от зеркала стекломассы) имеет зону высотой 200 мм свободную от теплоизоляции (см. рис. 5.1, перечень используемых материалов см. Приложение Г). Подобная конфигурация ТКСП позволяет локально снизить температуру огнеупорного бруса в опасном сечении (в соответствии с данными раздела 3).

Интенсивность принудительного воздушного охлаждения в районе зеркала стекломассы не превышает $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$, из-за более интенсивного процесса коррозии на глубинах 600÷800 мм от уровня пода.

Таблица 5.1 – Исходные данные для моделирования продолжительности кампании печи производительностью 280 т/сут

Геометрические параметры ограждения	Значения, мм	Условия теплообмена	Значения
высота от уровня пода до пятого кирпича	2550	температура продуктов сгорания, °C	1575
длина варочного бассейна	13750	температура расплава стекломассы, °C	1525
ширина варочного бассейна	8600		

Геометрические параметры ограждения	Значения, мм	Условия теплообмена	Значения
Толщина огнеупорного бруса – зона варки – зона пламенного пространства	250 200	температура воздуха, °С	30
минимальная остаточная толщина огнеупорного бруса в момент останова печи	40	коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² °С): по газовой стороне по воздушной стороне – естественная конвекция – принудительное охлаждение	147÷200 30
высота зоны обдува	400		200÷300
высота расположения соплового аппарата	1350	температура стекломассы: – на уровне зеркала, °С	1525
толщина охлажденного пристеночного слоя расплава стекломассы	50	– на уровне пода, °С	1435

Подачу воздуха в систему принудительного воздушного охлаждения обеспечивают низконапорные вентиляторы. Расход воздуха через сопловой аппарат составляет 0,9÷1,2 м³/с при ширине сопла 15 мм. Необходимый напор составляет 800÷900 Па. Количество воздуходувных машин, применяемых в системах охлаждения такого типа, колеблется от 5 до 10 единиц. Коэффициенты теплоотдачи, обеспечиваемые подобной системой охлаждения лежат в диапазоне 50÷360 Вт/(м²°С) [77].

Вентиляторы, соответствующие заданным параметрам, представлены в таблице 5.2.

Исходя из параметров системы принудительного охлаждения, выбраны вентиляторы В-Ц4-70-8-04А в количестве 6 штук.

В качестве базового варианта принят вариант под номером 1. Далее на основании расчета критерия эффективности и анализа степени влияния величин, входящих в него, выбирался последующий вариант. Целью является получить оптимальную конфигурацию ТКСП, а именно максимальное значение критерия эффективности за счет увеличения срока службы печи, при этом снизить величину капитальных затрат на сооружение ТКСП.

Таблица 5.2 – Параметры вентиляторов, применяемых в системе принудительного воздушного охлаждения стекловаренной печи

№ п/п	Параметр	Тип вентилятора			
		В-Ц4-70-8-04А	В-Ц4-70-8-07А	ВДН-9	В-Ц4-70
1	Производительность Q, тыс. м ³ /ч	10÷23	11÷24	10	23,1÷46,5
2	Напор Р, Па	930	1080	1250	840÷1800
3	КПД η, %	79	81	81	83
4	Установленная электрическая мощность N, кВт	7,5	11	15	22

Таблица 5.3 – Параметры теплоизоляционных панелей бокового ограждения стекловаренной печи

Номер варианта	Наименование панели	Высота панели, мм	$\Delta t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{впр}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{пл. пр.}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	авозд. прин., Вт/(м ² °C)	Марка материала					
							КЛ-1,1	ШЛ-0,9	ШЛ-0,6	ШЛ-0,4	КПД-400	КПД-500
							Стоимость, тыс.руб./т					
							47,9	32,0	101,8	103,8	67,0	53,6
Порядковый номер в многослойной панели начиная от огнеупорного бруса (толщина (мм))												
1	секция №1 в зоне стекло-массы	750	90	1525	1575	200	1(114)	2(114)	3(65)	–	4(65)	–
	секция №2 в зоне стекло-массы	200					1(114)	2(114)	3(65)	–	4(65)	–
	секция в зоне пламенного пространства	550					1(114)	2(114)	3(65)	4(65)	–	–
2	секция №1 в зоне стекло-массы	750	90	1525	1575	200	1(114)	2(114)	–	–	3(65)	–
	секция №2 в зоне стекло-массы	200					1(114)	2(114)	–	–	3(65)	–
	секция в зоне пламенного пространства	550					1(114)	2(114)	3(65)	4(65)	–	–
3	секция №1 в зоне стекло-массы	750	90	1525	1575	200	1(114)	2(228)	–	–	–	–
	секция №2 в зоне стекло-массы	200					1(114)	2(228)	–	–	–	–
	секция в зоне пламенного пространства	550					1(114)	2(228)	–	–	–	3(114)
4	секция №1 в зоне стекло-массы	750	90	1525	1575	200	1(114)	2(114)	3(114)	–	–	–
	секция №2 в зоне стекло-массы	200					1(114)	2(114)	3(114)	–	–	–
	секция в зоне пламенного пространства	550					1(114)	2(114)	3(65)	4(65)	–	–

5.2. Влияние теплового режима стекловаренной печи и параметров теплоизоляционной конструкции на критерий эффективности

Продолжительность работы печи до аварийной остановки при разности температур между зеркалом стекломассы и уровнем пода $\Delta t_{ст}=90$ °С в первом случае составила 427 суток, в третьем – 438 суток (таблица 5.4). Результатами работы составленной программы, помимо конфигурации огнеупорного бруса в зоне контакта с расплавом стекломассы, являются градиенты температур и плотности теплового потока по сечению бокового ограждения. Это позволяет получить данные о тепловых потерях с наружных поверхностей теплоизоляционной конструкции бокового ограждения варочного бассейна печи.

Таблица 5.4 – Результаты расчетов оптимальной ТКСП (в ценах на 2019 г.)

Номер варианта	Длительность кампании печи τ , сут	Затраты на изоляцию $C_{сумм_т.изол}$, млн. руб.	Максимальная температура поверхности ТКСП в конце эксплуатации, °С	Критерий эффективности D , млн. руб.
1	427	2,86	98 (секция №1)	3820
2	430	2,76	118 (пламенное пространство)	3846
3	438	2,79	89 (секция №1)	3919
4	432	2,89	118 (пламенное пространство)	3864

В таблице 5.5 приведены статьи теплового баланса рассматриваемой печи.

Таблица 5.5 – Статьи теплового баланса исследуемой ванны стекловаренной печи

Название статьи прихода	кВт	%	Название статьи расхода	кВт	%
Химическая энергия топлива, $Q_{х.т}$	12888,29	64,01	Теплота технологического продукта, $Q_{т.п}$	7376,83	36,63
Теплота топлива, $Q_{ф.в}$	12,09	0,06	Теплота отходящих газов, $Q_{о.г}$	9973,70	49,53

Название статьи прихода	кВт	%	Название статьи расхода	кВт	%
Теплота окислителя, $Q_{o.k}$	7097,05	35,24	Потери теплоты от не-полноты сгорания, $Q_{н.г.}$:	257,77	1,28
			химический недожог, $Q_{х.н}$	257,77	
			механический недожог, $Q_{м.н}$	–	
Теплота исходных технологических материалов, $Q_{т.м}$	139,83	0,69	Потери теплоты в окружающую среду, $Q_{o.c.}$:	1524,7	7,57
			теплопроводностью через обмуровку, $Q_{то.с}$	1042,72	4,99
			излучением через отверстия, окна, $Q_{ло.с}$	481,98	
			Неучтенные потери $Q_{неучт}$	1004,26	
Итого	20137,26	100	Итого	20137,26	100

Одним из ключевых параметров, входящих в применяемый критерий эффективности является стоимость теплоизоляционной конструкции бокового ограждения печи, а также затраты на ее сооружение. Выполнение таких расчетов потребовало разработку программы по определению затрат на сооружение теплоизоляционной конструкции бокового ограждения в соответствии с нормами сметной документации для подобного типа работ (Бекназарян Д.В. Прогнозирование и диагностика состояния тепловой изоляции плавильных агрегатов: дис. кандидата техн. наук: 05.14.048 «Промышленная теплоэнергетика»: защищена 26.05.2022. – 343 с.).

Компоненты, входящие в критерий эффективности, рассчитанные, соответственно, для варианта с максимальной длительностью кампании печи и оптимального варианта теплоизоляционной конструкции, представлены в таблице 5.6. Расчетные величины для представленных вариантов ТКСП приведены в таблице 5.7. Ввиду того, что технические параметры системы принудительного воздушного охлаждения при изменении конфигурации теплоизоляционной конструкции не меняются, то в разделе эксплуатационных затрат целесообразно оставить только затраты на электроэнергию, которая используется для работы системы.

В результате сравнения четырех вариантов многослойной теплоизоляционной конструкции можем сделать вывод, что в случае применения конструкции по третьему варианту происходит увеличение продолжительности кампании печи на 11 суток по сравнению с вариантом №1. Это влечет за собой увеличение эксплуатационных затрат на 75783 руб.

Таблица 5.6 – Параметры, входящие в критерий эффективности

№ п/п	Наименование параметра	Значение			
		Вариант 1 базовый	Вариант 2	Вариант 3 оптимальный	Вариант 4
1	Длительность кампании тэ, сут.	427	430	438	432
2	Общий выпуск стекломассы за кампанию печи G, т	119560	120400	122640	120960
3	Эксплуатационные расходы Э, млн. руб.	2,942	2,962	3,018	2,976
4	Капитальные затраты на сооружение ТКСП, тыс. руб.	4045	3926	3986	4074
5	Величина тепловых потерь с поверхности бокового ограждения за период кампании Qпотерь, ГДж	26703	37164	23809	35172
6	Максимальный валовой доход за период кампании печи Dвал.мах, млн. руб.	3820	3846	3919	3846

Остаточная толщина огнеупорного бруса, контактирующего со стекломассой, для безопасной эксплуатации $\delta_{ост} = 40$ мм.

Стоимость листового стекла (толщина 4 мм) $C_{ст} = 32045,8$ руб./т.

Низшая теплота сгорания природного газа $Q_{н}^p = 35,7$ МДж/м³.

Стоимость природного газа $C_{пр.г} = 4946,56$ руб. за 1000 м³.

Стоимость ТКСП по третьему варианту ниже на 58,8 тыс. руб. по сравнению с первым вариантом. Снижение тепловых потерь через боковое ограждение при использовании третьего варианта ТКСП позволяет сэкономить 400,9 тыс. руб. Таким образом, выигрыш при сооружении и эксплуатации варианта №3 по сравнению с вариантом №1 составляет 383,8 тыс. руб. Кроме

того, из-за увеличения длительности кампании печи валовой доход увеличивается на 99 млн. руб. Таким образом, в случае максимального уровня температур в зоне пламенного пространства, вариант исполнения ТКСП под номером три является оптимальным.

Следовательно, общее повышение экономической эффективности стекловаренной печи видится в увеличении длительности кампании печи за счет применения ТКСП, которые обеспечат высокое качество продукции и строгое соблюдение технологического регламента процесса варки стекломассы.

Таблица 5.7 – Расчетные величины для различных вариантов ТКСП

№ п/п	Наименование параметра	Значение			
		Вариант 1 базовый	Вариант 2	Вариант 3 оптимальный	Вариант 4
1	Длительность кампании τ , сут.	427	430	438	432
2	Величина тепловых потерь с поверхности бокового ограждения за период кампании в пересчете на природный газ, тыс. м ³	747,97	1041,01	666,92	985,194
3	Денежный эквивалент тепловых потерь, руб.	3699879	4873325	3299003	4873321
4	Часовой расход топлива, нм ³ /ч	1313,5	1353,9	1299,7	1345,4
5	Удельный расход топлива на тонну сваренной стекломассы нм ³ /т	112,6	116,0	111,4	115,3

Следует отметить, что снижение тепловой эффективности ТКСП в зоне варки приводит к уменьшению температуры расплава на границе огнеупор-стекломасса и общему захлаживанию объема стекломассы в варочном бассейне, повышению температуры на внешней поверхности ТКСП, что ухудшает условия труда персонала. Для обеспечения необходимого уровня температуры стекломассы необходимо отслеживать температуру расплава по глубине в точках, где ранее располагалась первоначальная граница огнеупорного бруса. Температура в данных точках не должна опускаться ниже температуры расплава на уровне пода печи. Возможности созданного программного ком-

плекса позволяют это сделать. Таким образом, можно назвать следующие лимитирующие факторы, исходя из которых, следует подбирать элементы ТКСП в зоне варки: температура наружной поверхности ТКСП, температура расплава по глубине стекломассы на вертикальной линии, которая соответствует первоначальной границе раздела огнеупорный брус – стекломасса, остаточная толщина огнеупорного бруса в зоне варки.

Необходимость отслеживать толщину огнеупорного бруса ограждения в зоне варки связана с тем, что в случае применения высокоэффективной ТКСП скорость коррозии огнеупорного бруса на глубинах 500÷650 мм от уровня зеркала стекломассы, может превышать скорость коррозии на уровне зеркала.

Выявление оптимального набора изоляционных наборов в ТКСП требует детального рассмотрения критерия эффективности, а именно влияние каждой составляющей на его суммарное значение. С этой целью найдем отношение уменьшаемого и каждого из вычитаемых к значению критерия эффективности. В результате получим безразмерные величины, позволяющие оценивать влияние каждой составляющей на величину критерия эффективности (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Безразмерные параметры (весовые коэффициенты), входящие в критерий эффективности для ТКСП

№ п/п	Безразмерный параметр	Значения ¹			
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	$(G_{сут} \cdot \Pi_{ст} \cdot \tau_3) / D_{вал.мах}$	100279,53	100312,80	100262,79	100308,42
2	$K / D_{вал.мах}$	105,88	102,07	101,70	105,42
3	$(Q_{потерь} \cdot \Pi_{пр.г} / Q_{пн}) / D_{вал.мах}$	96,84	85,77	84,16	85,37
4	$(\Delta_{сут} \cdot \tau_3) / D_{вал.мах}$	76,99	77,02	76,98	77,017

Как видно из таблицы 5.8, при увеличении длительности кампании печи (вариант №3), суммарные относительные затраты на эксплуатацию и сооружение ТКСП снижаются на 6,03% по сравнению с вариантом №1. Относительная величина тепловых потерь при увеличении длительности кампании печи также снижается на 12,85%, а стоимость сооружения ТКСП снижается на 2,53%.

¹ Для удобства обработки полученных данных все значения были умножены на 10⁵

На рисунке 5.1 для варианта №3 ТКСП представлены распределение температуры в поперечном сечении бокового ограждения печи в начале и конце кампании. Представленная конфигурация теплоизоляционных панелей с участком без тепловой изоляции на отметке 650 мм от зеркала стекломассы позволяет перенести зону наименьшей толщины огнеупорного бруса на отметку 1000÷1100 мм. от зеркала стекломассы, то есть в зону более низких температур, что приводит к замедлению процесса коррозии.

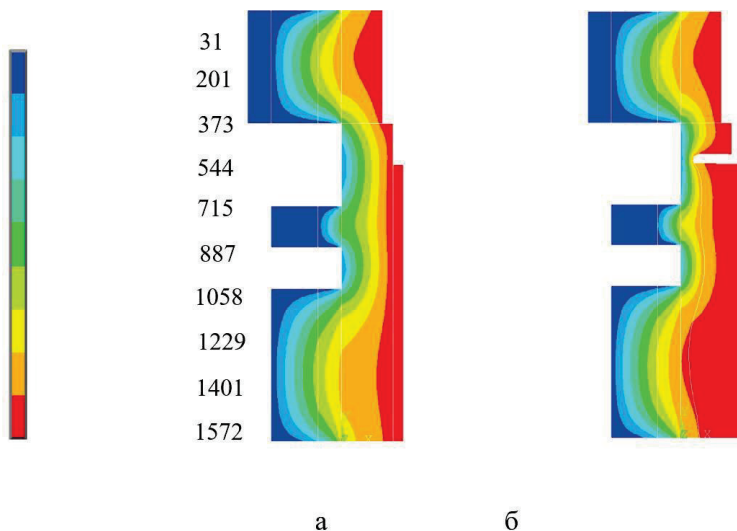


Рисунок 5.1 – Распределение температуры по сечению бокового ограждения ванны стекловаренной печи при наличии оптимальной ТКСП:
а – в начале кампании печи; б – в конце кампании печи

Исходя из выводов раздела 3, повышать интенсивность принудительного воздушного охлаждения наружной поверхности ограждения на участке линии зеркала стекломассы для обеспечения коэффициента теплоотдачи более 200 Вт/(м²°С) не является целесообразным, так как зона наиболее интенсивной коррозии огнеупорного бруса переносится в ближе к поду печи, в теплоизолированную зону.

На рисунке 5.2 представлена конфигурация огнеупорного бруса в конце кампании печи. Как видно из рисунка, огнеупорный брус ограждения имеет две ярко выраженные зоны коррозии. Первая находится на линии зеркала стекломассы. Вторая расположена у пода печи под многослойной изоляцией.

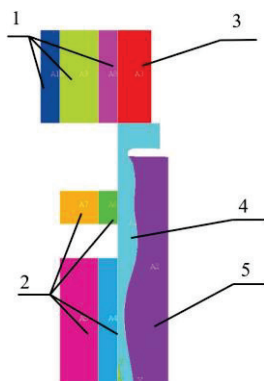


Рисунок 5.2 – Фрагмент поперечного сечения бокового ограждения ванной стекловаренной печи в конце кампании при наличии оптимальной ТКСП:

- 1 – теплоизоляционные панели зоны пламенного пространства;
 2 – теплоизоляционные панели варочной зоны; 3 – огнеупорный брус зоны пламенного пространства (бакор–33); 4 – огнеупорный брус варочной зоны (бакор–41); 5 – расплав стекломассы

Такое распределение толщин огнеупорного бруса характерно для ограждения ванной печи при наличии ТКСП рассматриваемой конструкции.

Конфигурация огнеупорного бруса пламенной печи по данным [75] представленная на рисунке 5.3 (а) является аналогичной данным, полученным в ходе вычислительного эксперимента (рис. 5.2), что еще раз подтверждает корректность работы созданной в ходе диссертационного исследования программы.

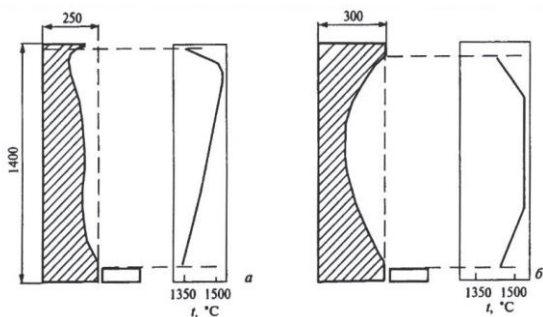


Рисунок 5.3 – Профили коррозии стеновых брусьев и распределения температур t по глубине варочного бассейна: а – пламенная печь; б – электрическая печь

Таким образом, применение эвристико-эволюционного метода оптимизации Каневца Г.Е. применительно к ТКСП, позволяет утверждать, что для выбранного наиболее высокотемпературного режима варки, наименьшего перепада температуры по глубине стекломассы, с учетом имеющихся ограничений по толщине многослойных панелей и температуре наружной поверхности, вариант ТКСП номер 3 является оптимальным [106, 107].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ методов расчета тепломассообменных процессов в рабочем пространстве плавильных агрегатов ванного типа на примере пламенной стекловаренной печи, теплообменных процессов, протекающих в стекломассе. Основываясь на ретроспективном анализе исследований в области повышения энергоэффективности и надежности работы огнеупорных и теплоизоляционных материалов в зоне варки и пламенного пространства стекловаренных печей, выбраны такое строение ограждения и тип принудительного охлаждения, которые наибольшим образом отвечают требованиям к конструкциям подобного рода.

2. Произведено уточнение математической модели процесса коррозии двумерной путем учета эффективного коэффициента теплопроводности расплава стекломассы. Использование двумерной геометрической модели при определении скорости коррозии теплоизолированных брусев бокового ограждения позволило получить данные более приближенные к реальным, по сравнению с одномерной моделью, из-за более точного расчета конфигурации огнеупорного бруса и температурного поля по сечению ограждения.

3. Разработан алгоритм и создан программный вычислительный комплекс, моделирующий тепловое состояние и геометрическую конфигурацию бокового ограждения при заданном температурном режиме в зоне варки и режиме работы системы принудительного воздушного охлаждения на участке вдоль линии зеркала стекломассы в двумерной постановке.

4. Проведен вычислительный эксперимент с целью исследования влияния температуры расплава на уровне зеркала стекломассы, величины перепада температуры по глубине варочного бассейна, коэффициента теплоотдачи, который обеспечивает система принудительного охлаждения на наружной поверхности огнеупорного бруса бокового ограждения бассейна печи на линии зеркала стекломассы, положения соплового аппарата на длительность кампании и тепловое состояние огнеупорных брусев, а также тепловой изоляции бассейна печи. Выявлено, что опасным сечением огнеупорного бруса бокового ограждения печи помимо области на линии зеркала стекломассы, является область, лежащая на глубине 500–650 мм ниже линии зеркала стекломассы, которая подвергается интенсивной высокотемпературной коррозии в случае применения тепловой изоляции по всей высоте варочной зоны.

5. Разработана методика применения феноменологического эвристико-эволюционного метода оптимизации Г.Е. Каневца применительно к ограждению стекловаренных печей. Разработан критерий эффективности, позволяющий выполнять оптимизацию теплоизолированного бокового ограждения при

учете различных технологических режимов и изменении режима работы системы принудительного воздушного охлаждения. На основе анализа величин, составляющих критерий эффективности, установлено, что при нынешней цене природного газа оптимальным вариантом тепловой изоляции варочного бассейна будет набор слоев, обеспечивающих длительность кампании продолжительностью 438 суток, при величине критерия эффективности 3919 млн. руб. При этом должны соблюдаться санитарные нормы и правила относительно уровня температур на внешней поверхности ТКСП.

Результаты исследования могут быть использованы следующим образом.

1. Разработанный программный комплекс может быть использован на действующих предприятиях стекольной промышленности в качестве альтернативного метода диагностики и прогнозирования толщины огнеупорного бруса и теплового состояния изоляции.

2. Разработанный критерий эффективности и адаптированный к стекловаренным печам феноменологический эвристико-эволюционный метод оптимизации Г.Е. Каневца может быть использован для подбора оптимальных многокомпонентных ТКСП на печах как вновь проектируемых, так и после холодного ремонта.

3. Полученные результаты могут быть использованы научными и проектными организациями при проектировании энергоэффективных ограждений стекловаренных печей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаптев, В.И. Электротермические агрегаты для варки стекла [Текст] / В.И. Лаптев, В.А. Сибиряков. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 160 с.
2. Акоюян, А.Р. Электростекловаренная печь производительностью 14 т/сутки / А.Р. Акоюян, К.А. Костаян, А.Ф. Мелик-Ахназаров и др. // Стекло и керамика. – 1978. – №3. – С. 34–35.
3. Савина, И.М. Влияние дополнительного электроподогрева на конвекцию стекломассы в ваннах печах листового стекла / И.М. Савина, Р.И. Севастьянов // Стекло и керамика. – 1977. – №5. – С. 5 – 7.
4. Сибиряков, В.А. Электрическая варка хрусталя в печи с трехфазной системой нагрева / В.А. Сибиряков, В.М. Будов, Б.Н. Прохоров // Стекло и керамика. – 1983. – №12. – С. 6 – 8.
5. Пчеляков, К.А. Исследование пламенно–электрической варки бутылочного стекла / К.А. Пчеляков, В.П. Соколова, Г.А. Леснова // Стекло и керамика. – 1975. – №8. – С. 6 – 8.
6. Лисиенко, В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. Справочное издание: В 3-х книгах. Книга 2. / В.Г. Лисиенко, Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Под. ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с. – 1100 экз. – ISBN 5-98457-003-3.
7. Боровкова, Л.Б. О коррозионной стойкости огнеупоров на основе кварцевого стекла / Л.Б. Боровкова, О.Н. Попов, А.В. Беляков, Р.К. Савицкая, Г.С. Теплов // Стекло и керамика. – 1978. – № 6. – С. 7 – 9.
8. Дзюзер, В.Я. Энергоэффективная структура тепловой изоляции стекловаренных печей / В.Я. Дзюзер, Е.А. Никифоров // Огнеупоры и техническая керамика. – 2012. № 1 – 2. – С. 33 – 36.
9. ГОСТ 3910-75. Изделия огнеупорные динасовые для кладки стекловаренных печей. Технические условия (с изменениями № 1-6) [Текст]. – Введ. 1977–07–01. – Ч1 Сб. ГОСТов. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 10 с.
10. Огнеупоры для стекольной промышленности: Аналитич. обзор 1992 – 1993 / ВНИИЭСМ. – М., 1993. – Вып. 1–2. – 44 с.
11. Дзюзер, В.Я. Совершенствование технических характеристик стекловаренных печей (обзор) / В.Я. Дзюзер // Стекло и керамика. – 2008. – №7. – С. 3 – 12.
12. Кошельник, В.М. Энерго–та ресурсозбережения в промислових агрегатах скляного виробництва на основі удосконалення теплоенергетичного обладання [Текст]: дис ... докт. техн. наук 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»: захищена 14.11.2006: утв. / Кошельник Вадим Михайлович. – Харьков, НТУ «ХПИ». – 2006. – 336 с.

13. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Л.Л. Интегрированные энергосберегающие тепло-технологии в стекольном производстве: монография /Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.М. КОШЕЛЬНИК, В.В. СОЛОВЕЙ, А.В. КОШЕЛЬНИК; под ред. В.М. КОШЕЛЬНИКА. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 627 с. Библиогр.: с. 613 – 622. – 1000 экз. – ISBN 978-966-593-582-7.

14. Козлов, А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей / А.С. Козлов. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 143 с. – Библиогр. с. 138–140. – 1550 экз. – ISBN 5-7088-0399-1.

15. Матвеев, Г.М. Энергосбережение при варке стекла / Г.М. Матвеев, В.В. Миронов, Э.М. Раскина, К.А. Тарасевич // Стекло и керамика. – 1998. – №11. – С. 10 – 11.

16. Дзюзер, В.Я. Расчет и конструирование варочного бассейна стекловаренных печей тарного стекла / В.Я. Дзюзер // Стекло и керамика. – 2009. – №11. – С. 3 – 8.

17. Дзюзер, В.Я. Анализ конструктивных схем тепловой изоляции свода стекловаренной печи //Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – №7–8. – С. 76–79.

18. Луцканов, С.А. Модернизированная изоляция свода экономит топливо / С.А. Луцканов // Стекло и керамика. – 2009. №10. – С. 23 – 27.

19. Дзюзер, В.Я. Энергоэффективные печные ограждения высокопроизводительной стекловаренной печи/ В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. №7 – 8. – С. 48 – 54

20. Дзюзер, В.Я. Эффективное применение электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров в высокотемпературных стекловаренных печах: Ч. I / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 6. – С. 45 – 49.

21. Дзюзер, В.Я. Эффективное применение электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров в высокотемпературных стекловаренных печах: Ч. II / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 7. – С. 36 – 39.

22. Кучерявый, М.Н. Продление срока службы огнеупоров в ваннных печах тарного стекла / М.П. Кучерявый, О.Н. Попов, В.Т. Селянко и др. // Стекло и керамика. – 1983. – № 9. – С. 5 – 7.

23. Попов, О.Н. О кинетике взаимодействия плавнелитых огнеупоров с расплавами промышленных стекол / О.Н. Попов // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. – М.: ГИС, 1984. – С. 8 – 17.

24. Попов, О.Н. Служба огнеупоров в ваннных печах листового стекла с мажутным отоплением / О.Н. Попов, Л.Б. Боровкова, Т.С. Сильвестрович // Стекло и керамика. – 1980. – №9. – С. 6–8.

25. Бадан, Г.О. О повышении срока службы стекловаренных печей / Г.О. Бадан // Стекло мира. – 2002. – № 4. – С. 73 – 77.

26. Гуляян, Ю.А. Основы технологии стекла. – Владимир: Транзит - ИКС, 2003. – 475 с.
27. Галдина, Н.М. Огнеупоры для стекольной промышленности в СССР и за рубежом / ВНИИЭСМ. – М., 1971. – 92 с.
28. Проценко, Л.М. Результаты испытаний системы теплового экранирования стен варочного бассейна стекловаренных печей от контакта с шихтой / Л.М. Проценко, Л.Я. Левитин, С.И. Макаров // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. – М.: Изд-во ГИС, 1984. – С. 102–104.
29. Рублевский, И.П. Стеклоустойчивость высокоциркониевого плавящего огнеупора / И.П. Рублевский, А.А. Верлюцкий, В.П. Фролова и др. // Стекло и керамика. – 1983. – № 11. – С. 8 – 10.
30. Соколов, В.А. Получение плавнелитых высокоциркониевых огнеупорных материалов / В.А. Соколов // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. – М.: ГИС. – 1984. – С. 48 – 55.
31. Токарев, В.Д. Анализ службы огнеупорных материалов в ваннах стекловаренных печах / В.Д. Токарев, С.С. Игнатьев, О.Н. Попов // Стекло и керамика. – 2006. – № 5. – С. 19 – 22.
32. Гоберис, С.Ю. Взаимодействие расплавов минераловатного производства с огнеупорами ограждающих конструкций ванн печей / С.Ю. Гоберис, Г.П. Абрамов // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. – М.: ГИС, 1984. – С. 92 – 97.
33. Граменицкий, Е.П. Закономерности взаимодействия огнеупоров и стеклообразующих расплавов в свете теории диффузионной зональности / Е.П. Граменицкий, А.М. Батанова // Стекло и керамика. – 1996 – № 2. – С. 9 – 13.
34. Павловский, В.К. Влияние температуры на коррозию огнеупоров в расплавах стекол / В.К. Павловский, Ю.С. Соболев // Стекло и керамика. – 1991. – № 12. – С. 12 – 14.
35. Павловский, В.К. Коррозия огнеупоров в расплавах свинцовосиликатных стекол / В.К. Павловский, Ю.С. Соболев // Стекло и керамика. – 1992. – № 8. – С. 12 – 13.
36. Галдина, Н.М. Рекомендации по применению огнеупорных материалов в стекольной промышленности / Н.М. Галдина // Стекло и керамика. – 1984. – № 3. – С. 8 – 10.
37. Павловский, В.К. Взаимодействие огнеупоров с расплавом боросиликатного стекла / В.К. Павловский, В.К. Петров, Ю.С. Соболев // Стекло и керамика. – 1990. – № 10. – С. 17 – 19.
38. Васильева, Л.Е. Цирконовый огнеупор для оптического стекловарения / Л.Е. Васильева, Е.П. Коркина, И.Г. Мельникова и др. // Стекло и керамика. – 1981. – № 6. – С. 9 – 10.

39. Павловский, В.К. Влияние состава силикатных стекол на стеклоустойчивость огнеупорных материалов/ В.К. Павловский, Ю.С. Соболев // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. – М.: ГИС, 1984. – С. 82 – 86.

40. Шатова, Н.П. Коррозия огнеупоров при варке боросиликатных медицинских стекол / Н.П. Шатова, А.В. Изосенкова // Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей: Сб. науч. тр. – М.: ГИС, 1984. – С. 70 – 74.

41. Попов, О.Н. Плавнелитые хромкорундовые огнеупоры для стекловаренных печей / О.Н. Попов, В.П. Мартынов, Ю.С. Токарев // Стекло и керамика. – 1984. – № 8. – С. 8–10.

42. Галдина, Н.М. Электроплавленные огнеупоры для стекловаренных печей [Текст]. / Н.М. Галдина, Л.Л. Чернина. – М.: Стройиздат, 1975. – 182 с. – Библиогр.: с 173–179. – 2000 экз.

43. Дзюзер, В.Я. Совершенствование методики расчета теплового баланса регенеративной стекловаренной печи / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №3. – С. 24 – 31.

44. Хижняков, С.В. Практические расчеты тепловой изоляции (для промышленного оборудования и трубопроводов) [Текст]. М.: Энергия, 1976. – 200 с. Библиогр.: с. 143 – 144.

45. Попов, О.Н. Оценка эффективности воздушного охлаждения стекловаренных печей / О.Н. Попов, Р.З. Фридкин, З.Т. Мамедов // Стекло и керамика. – 1983. – № 2. – С. 8–10.

46. Попов, О.Н. Интенсификация охлаждения стен варочного бассейна стекловаренной печи / О.Н. Попов, Фридкин Р.З., Мамедов З.Т. // Стекло и керамика. – 1983. – № 5. – С. 6–7.

47. Зайцев, Ю.С. Испарительное охлаждение стен стекловаренных печей [Текст] / Ю.С. Зайцев, О.В. Филиппев. – Х.: Основа, 1993. – 105 с.

48. Шляховецкий, В.М. Исследование факторов, определяющих эффективную работу воздушно-водоиспарительного охлаждения стекловаренных печей / В.М. Шляховецкий // Стекло и керамика. – 1984. – № 3. – С. 5 – 8.

49. Зейботс, А.А. Испарительное охлаждение бассейна стекловаренной печи / А.А. Зейботс // Стекло и керамика. – 1974. – № 8. – С. 6 – 7.

50. Захариков, Н.А. Испарительное охлаждение стен бассейна ваннных печей / Н.А. Захариков, Рожанский А.И., Суховой В.А. // Стекло и керамика. – 1961. – № 9. – С. 7 – 12.

51. Шипов, Э.И. Испарительное охлаждение бассейна в стекловаренной печи / Э.И. Шипов, М.Я. Хинкис, С.В. Левитин и др. // Стекло и керамика. – 1968. – № 11. – С. 8 – 12.

52. Андоньев, С.М. Охлаждение доменных печей [Текст]. / С.М. Андоньев, О.В. Филиппьев, Г.А. Кудинов. – М.: Металлургия, 1972. – 382 с. – Библиогр.: с. 363–364. – 2200 экз.

53. Будов, В.М. Исследование работы крупногабаритной стекловаренной печи для выработки листового стекла / В.М. Будов // Стекло и керамика. –1970. – №1. – С. 7 – 10.

54/57. А.с. 1232654 СССР А 51 (4) СОЗ В 5/44. Система воздушного охлаждения кладки и подачи воздуха на горение рекуперативной печи. / А.С. Гусев. – № 123456789; заявл. 25.12.84., опубл. 23.05.86. Бюл № 12. – 2 с.: ил.

55. Хавін, Є.В. Закономірності процесів оптимального повітряного охолодження плавильних реакторів скляного виробництва: дис. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології»: захищена 18.11.2010; утв. 23.02.2011 / Хавін Євген Валерійович. – Х., 2010. – 146 с.

56. Семенов, Б.А. Методика и результаты оптимизации параметров системы обдува ограждений варочного бассейна стекловаренных печей / Б.А. Семенов, Н.А. Озеров // Вестник СГТУ, 2011. – № 4(59). – Выпуск 1 «Энергетика и электротехника» – С. 210 – 217.

57. Семенов, Б.А. Математическое моделирование высокотемпературной коррозии огнеупоров варочного бассейна стекловаренных печей / Б.А. Семенов, В.Н. Лункин, Н.А. Озеров // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 7-8. – С. 88 – 93.

58. Кучерявый, М.Н. Кинетика коррозии огнеупоров расплавом многощелочного тарного стекла / М.Н. Кучерявый, О.Н. Попов // Огнеупоры. – 1985.– №3. С. 22–27.

59. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст]./ Л. Сегерлинд; под ред. докт. физ-мат наук Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1979. – 392 с. Предм. указ.: с. 389. – 12000 экз.

60. Журавлев, Ю.А. Радиационный теплообмен в огнетехнических установках / Журавлев Ю.А. – Красноярск.: изд-во Красноярского университета, 1983. – 253 с.

61. Гусовский, В.Л. Методики расчета нагревательных и термических печей [Текст]. / В.Л. Гусовский, А.Е. Лившиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с. Библиогр.: с. 395. – 1000 экз. – ISBN 5-98457-009-2.

62. Племянников, М.М. Хімія та теплофізика скла: Навчальний посібник [Текст] / М.М. Племянников, О.А. Крупа. – Київ: НТУУ «КПІ», 2000. – 560 с.

63. Дзюзер, В.Я. Конструирование огнеупорной кладки варочного бассейна высокопроизводительных стекловаренных печей / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 8. – С. 14–22.

64. Фервонер, О Огнеупорные материалы для стекловаренных печей [Текст] / О. Фервонер, К. Берндт; Пер. с нем. О.Н. Попова; Под ред. А.С. Власова. – М.: Стройиздат, 1984. – 261 с. Библиогр.: с. 238 – 260. – 2400 экз.

65. Дзюзер, В.Я. Совершенствование методики расчета теплового баланса регенеративной стекловаренной печи (окончание) / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №4. – С. 22 – 27.

66. Кошельник, В.М. Выбор рациональных конструкционных параметров соплового аппарата систем струйно–воздушного охлаждения бассейнов стекловаренных печей / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2006. – № 2/2 (20). – С. 94 – 97.

67. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст]. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – изд. 2–е, стереотип. – М.: «Энергия», 1977. – 344 с. Библиогр.: с. 336 – 341. – 25000 экз.

68. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов [Текст]. / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Metallургия, 1990. – 239 с. Библиогр.: с 238. – 3170 экз.

69. Коцелко, Р.С. Разработка и оптимизация теплоизолирующих элементов стекловаренной печи // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Львов. – 1990, – 17 с.

70. Андреев, А.А. Исследование теплообмена в области градиентного течения при натекании плоской турбулентной струи на пластину, расположенную нормально к потоку / А.А. Андреев, В.Н. Дазно, В.К. Савин, Б.Н. Юдаев / «Инженерно–физический журнал», т. XVIII. – 1970. – №4.

71. Юдаев, Б.Н. Теплопередача [Текст]: учебник для вузов. – М., «Высшая школа», 1973. – 360 с. Библиогр.: с. 353 – 356.

72. Кошельник, В.М. Выбор рациональных конструктивных параметров оптимально охлаждаемого стенового ограждения варочных бассейнов стекловаренных печей / В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2007. – № 9. – С. 116 – 120.

73. Дзюзер, В.Я. Методика обработки результатов зонального расчета внешнего теплообмена / В.Я. Дзюзер, В.С. Швыдкий, С.Е. Собянин // Наука и технологии. Часть 1. Тр. XXV Российской школы и XXXV Уральск. семинара: М: РАН, 2005. – С 191 – 198.

74. Озеров, Н.А. Оптимизация энергетических и материальных затрат в системе обдува варочного бассейна стекловаренных печей / Н.А. Озеров, Б.А. Семенов // Вестник СГТУ. – 2013. – № 1 (69). – С. 137–144.

75. Аксельрод, Л.М. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок. Справочник в двух книгах. Книга 2. Служба огнеупоров. [Текст] / Л.М. Аксельрод, Г.И. Антонов, Е.Е. Грищенко, В.Л. Гусовский, И.Д. Кашеев и др.; Под ред.

И.Д. Кашеева, Е.Е. Грищенко. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 656 с. Библиогр.: с. 654–656. – 1000 экз. – ISBN 5-89594-072-2.

76. Becknazaryan D V Algorithm of calculation and analysis of corrosive wear of side enclosures of glass furnace bath / D V Becknazaryan, V M Koshelnik, A A Larin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/8(69), – P. 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24865>

77. Дзюзер, В.Я. Огнеупоры для варочной части стекловаренных печей / В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №5. – С. 24 – 32.

78. Дзюзер, В.Я. Служба огнеупоров в варочном бассейне высокопроизводительной стекловаренной печи / В.Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. – 2018. – № 9. – С. 3 – 9.

79. Будов, В.М. Продление межремонтного периода работы стекловаренных печей – резерв увеличения выпуска листового стекла / В.М. Будов // Стекло и керамика. – 1975. – №4. – С. 4–7.

80. Апапина, А.Т. Стойкость огнеупоров при варке стекла С48-3 / А.Т. Апапина // Стекло и керамика. – 1984. – № 7. С. 12 – 13.

81. Бекназарян, Д.В. Постановка задачи оптимизации тепловой изоляции варочной зоны стекловаренной печи с учетом динамики разрушения стенового бруса / Д.В. Бекназарян, В.М. Кошельник // Вестник национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. : темат. вып. / Харьковский политехнический ин-т, нац. техн. ун-т. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – Вып. 32: Химия, химическая технология и экология. – С. 40 – 46.

82. Бекназарян, Д.В. Моделирование теплового состояния тепловой изоляции и ограждения варочного бассейна стекловаренной печи / Д.В. Бекназарян, В.М. Кошельник // Сборник научных трудов 5-й международной научно-практической конференции «Проблемы экономии энергии» / Национальный университет «Львовская политехника». – Львов. – 2008. – С 197 – 201.

83. Бекназарян, Д.В. К определению температурного поля в огнеупорной кладке варочного бассейна стекловаренной печи / Д.В. Бекназарян, В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вестник национального технического университета "ХПИ": сб. науч. тр. : темат. вып. / Харьковский политехнический ин-т, нац. техн. ун-т. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – Вып. 33: Химия, химическая технология и экология. – С. 169 – 174.

84. Дзюзер, В.Я. Влияние конструкции варочного бассейна на теплообмен и гидродинамику расплава в стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени. / В.Я. Дзюзер, В.С. Швыдкий // Стекло и керамика. – 2006. – № 10. – С. 9 – 16.

85. Попов, О.Н. Расчет оптимальных вариантов тепловой изоляции / О.Н. Попов, Г.П. Лисовская, М.Я. Богомольный, Л.Е. Красный, В.А. Сенатова // Стекло и керамика. – 1984. – № 3. – С. 8–10.

86. Дзюзер, В.Я. Электроплавленные AZS-огнеупоры для высокопроизводительных стекловаренных печей. // Новые огнеупоры. – 2013. – №7. – С 50 – 52.

87. Бекназарян, Д.В. Компьютерная диагностика температурного состояния и прогнозирование ресурса огнеупорной кладки варочной зоны стекловаренной печи с воздушным охлаждением / Д.В. Бекназарян, В.М. Кошельник, А.А. Ларин // Вестник НТУ «ХПИ». / Харьковский политехнический институт, нац. техн. ун-т. - Харьков: НТУ «ХПИ». – 2014.– № 28 (1071). – (Серия: Химия, химическая технология и экология). – С. 24 – 31.

88. Бекназарян, Д.В. Прогнозирование температурного состояния и срока службы ограждения ванной стекловаренной печи. / Д.В. Бекназарян, В.М. Кошельник, Е.В. Хавин // Вестник национального технического университета «ХПИ» : сб. научн. трудов : темат. вып. / Харьковский политехнический институт, нац. техн. ун-т. - Харьков: НТУ «ХПИ».– 2012. – Вып. 8: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – С. 178–183.

89. Бекназарян, Д.В. К определению теплового состояния изоляции ваннных стекловаренных печей на основе вычислительного эксперимента //Д.В. Бекназарян, Г.Е. Каневец, К.В. Строгонов// Промышленная энергетика. – 2021. – № 3. – С. 18 – 27.

90. Кафаров, В.В. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г. Грун., В. Нойманн. – М.: Химия, 1987. – 272 с. Библиогр.: с. 257–265. Предм. указ.: с. 266 – 269. – 2350 экз.

91. Каневец, Г.Е. Методы поиска экстремума критериев эффективности энерготехнологических систем [Текст]. / Г.Е. Каневец, М.А. Берлин //Краснодар, ГеоИнжиниринг. 2012. №2 (14). – С. 52 – 56.

92. Назаренко, Р.Н. Сравнение некоторых эволюционных методов оптимизации сложных систем. – Харьков, Сб. трудов ХНУРЕ, 2000.

93. Кафаров, В.В. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств [Текст]/ В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, В.Л. Перов. – М.: Химия, 1979. – 314 с. Библиогр.: с. 311–312. Предм. указ.: с. 313 – 318. – 7900 экз.

94. Каневец, Г.Е. Принципы автоматизированного проектирования и оптимизации химико-технологических производств [Текст]./ Г.Е. Каневец, М.А. Берлин – Киев: «Знание», 1981. – 29 с.

95. Каневец, Г.Е. Проблемы исследования сложных систем и их элементов. Состояние и перспективы системных исследований химико- и энерготехнологических объектов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 153 с.

96. Каневец, Г.Е. Пути повышения эффективности технических систем и их элементов на основе вычислительного эксперимента. – Киев: «Знание», 1988. –104 с.

97. Кафаров, В.В. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов. [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 368 с. Библиогр.: с. 358 – 362. – 3200 экз. – ISBN 5-7245-0582-7.

98. Каневец, Г.Е. Феноменологический эвристико-эволюционный подход при комплексной оптимизации процесса подготовки нефти на промыслах / Г.Е. Каневец, М.А. Берлин // Сфера Нефтегаз. –2010. – №1(20). С.40 – 50.

99. Каневец, Г.Е. Комплексная оптимизация процесса подготовки нефти на промыслах / Г.Е. Каневец, М.А. Берлин // Бурение и нефть. – 2010. – №3. С. 56 – 60.

100. International workshop on combination of genetic algorithms and neural networks (1992; Baltimore, Md), June 6, 1992. / COGANN-92; Ed. L.P. Whitley, J.P. Schoffer. – Los Alamatic (Ca) et al.: IEEE computer. soc. press, 1992. – VIII. – 262p.

101. Каневец, Г.Е. Обобщенные методы расчета теплообменников. – Киев: Наукова думка, 1979. – 352 с. Библиогр.: с. 337–344. – 1500 экз.

102. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача [Текст]/ Самарский А.А., Вабищев П.Н. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с. Предм. указ.: с. 780–782. – 800 экз.

103. Каневец, Г.Е Системный подход к повышению эффективности энерготехнологических систем и оборудования на основе оптимизационного вычислительного эксперимента. /Г.Е. Каневец// Краснодар, ГеоИнжиниринг. –2012. – №2 (14). – С. 57 – 67.

104. Кафаров, В.В Анализ и синтез химико–технологических систем: учебник для вузов [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 432 с. Библиогр.: с. 430–432. – 2950 экз.

105. Каневец, Г.Е. Введение в автоматизированное проектирование теплообменного оборудования [Текст]. / Г.Е. Каневец, И.Д. Зайцев, И.И. Головач.– Киев: Наукова думка, 1985. –232 с. Библиогр.: с. 220 – 225. – 1000 экз.

106. D V Beknazarian Methodological bases of optimization of thermal insulation structures of glass furnaces/D V Beknazarian, G E Kanevets, K V Strogonov // Journal of Physics: Conference Series 1683 (2020) 052027 doi:10.1088/1742-6596/1683/5/052027.

107. Бекназарян Д.В. Критерии эффективности теплоизоляционных конструкций стекловаренных печей //Д.В. Бекназарян, Г.Е. Каневец, К.В. Строгонов// Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – № 14(4). – С. 459 – 471.

Характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов, используемых в кладке свода стекловаренной печи [17]

№ п/п	Наименование материала	Характеристика материала						
		Химический состав, %				Плотность, ρ, кг/м ³	Максимальная температура применения, t _{прим} °С	Коэффициент теплопроводности, λ(t), Вт/(м °С)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃			
1	STELLA GGS	–	96,5	2,5	–	1860	1650	$0,7+1,4 \cdot 10^{-3}t - 1,4 \cdot 10^{-6}t^2$
2	STELLAMUR GGS	0,7	95,5	–	0,1	1300	1680	то же
3	LEGRAL 55/0	1,7	93,0	4,7	–	1100	1600	$0,379-0,07 \cdot 10^{-3}t + 0,44 \cdot 10^{-6}t^2$
4	LEGRAL 55/07	3,0	90,0	5,7	1,0	790	1600	$0,2595-0,055 \cdot 10^{-3}t + 0,2 \cdot 10^{-6}t^2$
5	STELLIT GH	1,4	85,5	12,5	0,4	1750	1400	$0,29-0,1 \cdot 10^{-3}t + 0,3 \cdot 10^{-6}t^2$
6	LUBISOL Si-Seal	4,8	92,5	2,6*	0,6**	1920	1620	$1,142+0,36 \cdot 10^{-3}t$
7	LUBISOL-SL	<13,0	>72,0	1,0	1,0**	400	1400	$0,08+0,1 \cdot 10^{-3}t$
8	LUBISOL-3	3,8	89,8	0,6	0,6**	1980	1380	$0,642+0,415 \cdot 10^{-3}t$
9	MKPB-200	50	–	–	–	200	1150	$0,04+0,1 \cdot 10^{-3}t + 0,08 \cdot 10^{-6}t^2$

*CaO + MgO; **Fe₂O₃ + Ti

Характеристики огнеупорных и теплоизоляционных изделий [63]

№ п/п	Марка огнеупора	Максимальная температура применения, $t_{прим}$ °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м°С)	Предел прочнос-ти при сжатии, МПа
1	AZS-36 (41), ZWS: $\rho = 3,7$ (3,8) т/м ³	1700	$6-5,63 \cdot 10^{-3}t + 3,86 \cdot 10^{-6}t^2$	350
2	AZS-33,WS: $\rho = 3,65$ т/м ³	1700	$6-5,628 \cdot 10^{-3}t + 4,015 \cdot 10^{-6}t^2$	350
3	Мертель AZS 0,5 L	1700	5,0	–
4	МЛС-62; ГОСТ 24704-94	1450	$1,12 + 0,444 \cdot 10^{-3}t$	25
5	ВН-40 (40% Al ₂ O ₃ , $\rho = 2,25$ т/м ³)	1450	$1,32 + 0,437 \cdot 10^{-3}t + +0,141 \cdot 10^{-6}t^2$	50
6	ШЛ-0,9; ГОСТ 5040-96	1270	$0,29 + 0,23 \cdot 10^{-3}t$	2,5
7	ШГЛ-0,6; ГОСТ 5040-96	1150	$0,13 + 0,23 \cdot 10^{-3}t$	2,5
8	ШЛ-0,4; ГОСТ 5040-96	1150	$0,1 + 0,21 \cdot 10^{-3}t$	1,0
9	КЛ-1,1; ГОСТ 5040-96	1550	0,55	2,5
10	КПД-400-И ТУ 5764-002-25310144-99	950*	$0,0747 + 0,1 \cdot 10^{-3}t$	1,7*
11	КПД-500-И ТУ 5764-002-25310144-99	950*	$0,096 + 0,08 \cdot 10^{-3}t + 0,04 \cdot 10^{-6}t^2$	2,3*

*Уточненные показатели – по данным ООО «Диатомитовый комбинат»

Теплофизические свойства некоторых изоляционных материалов [36]

№ п/п	Наименование материала	Плотность, ρ , кг/м ³	Максимальная температура применения, $t_{прим}$ °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	Ячеистый фосфатный бетон	950	1580	$0,348 + 10^{-4} t$
2	Фосфокерамзитобетон	1200	1270	$0,314 + 2,4 \cdot 10^{-4} t$
3	Фосфоперлит	275	800	$0,034 + 1,2 \cdot 10^{-4} t$
4	Перлиталь	225	900	$0,068 + 0,9 \cdot 10^{-4} t$
5	Алюмохромофосфатный газобетон	800	1500	$0,214 + 2,4 \cdot 10^{-4} t$
6	Алюмохромофосфатный газобетон	600	1450	$0,163 + 2,8 \cdot 10^{-4} t$
7	Шамотоволокнистые плиты ШВП–1150	400	1400	$0,093 + 3,0 \cdot 10^{-4} t$
8	Шамотоволокнистые плиты ШВП–1350	375	1150	$0,130 + 10^{-4} t$
9	Керамвермикулитовые плиты	500	1350	$0,07 + 3,0 \cdot 10^{-4} t$
10	Гранулированный фосфозит	350	1000	$0,085 + 2,1 \cdot 10^{-4} t$
11	Маты из муллитокремнеземистого (каолинового) волокна МКРР–130	650	1700	$0,034 + 2,6 \cdot 10^{-4} t$
12	Легковесный диңсавоый кирпич ДЛ 1,2	130	1150	$0,470 + 2,57 \cdot 10^{-6} t$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Стоимость теплоизоляционных материалов, применяемых в стекольной промышленности

№ п/п	Наименование изделий	Единица измерения	Цена с НДС, руб.
1	Плита ШВП–350 500х500х100	м ³ *	48000
2	Войлок МКРВ–200	т	61440
3	Муллитокремнеземистый рулонный материал МКРР–130	т	61440
4	Муллитокремнеземистый рулонный материал МКРР–130	т	61440
5	Муллитокремнеземистый фетр МКРФ-100, МКРВХ–150	т	75520
6	Плиты МКРП–340 (600х300х30)	руб./шт.	2680,8
7	Плиты МКРП–340 (600х400х50)	руб./шт.	3980,08
8	Кирпич диатомитовый КПД–400, 230×113×65	м ³ **	19072
9	КЛ–1,1	т	46550
10	ШЛ–0,9 №5	т	35080,65
11	ШЛ–0,6 № 5	т	80313,75
12	ШЛ–0,4 № 5	т	85668
13	Плиты вермикулитовые ПВТН 1200×600×30-100	м ³	33792

* в 1 м³ 40шт.

** в 1,2 м³ 600 шт.

В одной паллете 0,454 т. 649 шт. (для ШЛ)

Научное издание

Бекназарян Давид Владимирович
Строгонов Константин Владимирович

**Прогнозирование состояния тепловой изоляции
плавильной зоны печей ванного типа**

Монография

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
<http://publishing.intelgr.com>
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7 (812) 945-50-63

Подписано в печать 21.06.2023.

Формат 60×84/16

Объем 8,25 п.л.

Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-907618-68-8

