

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»



На правах рукописи

Ихно Анна Владимировна

УДК 624.042:69.056.55

**РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА
ОБВЯЗКИ ВАННЫХ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель

Югов Анатолий Михайлович

доктор технических наук, профессор



Идентичность **всех экземпляров** диссертации заверяю:

ученый секретарь

диссертационного ученого совета Д 01.006.02



Лахтарина С. В.

Макеевка – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Наименование раздела (подразделов)	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ I КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ	12
ОСОБЕННОСТИ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ ВАННОГО	
ТИПА. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРОБЛЕМЫ	
ПРОЕКТИРОВАНИЯ	12
1.1 Состояние вопроса	17
1.2 Анализ конструктивных схем. Основные конструктивные	
элементы	22
1.3 Нагрузки и воздействия на металлический каркас обвязки	
печи. Методики проектирование каркасов обвязки	
стекловаренных печей	27
1.4 Натурные исследования конструктива печей	30
1.5 СВП как технологический объект стекольной	
промышленности	32
1.6 Анализ возможности продления службы ванных	
стекловаренных печей	37
1.7 Цели и задачи исследования	
РАЗДЕЛ II ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПЛАНИРУЕМЫХ МЕТОДОВ И	40
МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	
2.1 Обоснование использования метода конечных элементов	40
при анализе напряженно-деформированного состояния	
каркаса обвязки ванных стекловаренных печей	
2.2 Особенности моделирования технологического процесса	50
в расчетной модели	
2.3 План и методика проведения натурных	
экспериментальных исследований напряженно-	
	56

деформированного состояния металлического каркаса обвязки ванной стекловаренной печи	63
2.4 Выводы по результатам II-го раздела	
РАЗДЕЛ III ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСА	65
3.1 Исходные данные и методика моделирования	65
исследования напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса	68
3.2 Методика редуцирования напряжений в расчетной модели	71
3.3 Моделирование технологического процесса	78
3.4 Анализ результатов расчета	
3.5 Выводы по результатам III-го раздела	
РАЗДЕЛ IV ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ОБВЯЗКИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ	85
4.1 Цели и задачи экспериментальных исследований определения напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса стекловаренной печи	85
4.2 Общие сведения о натурном эксперименте	85
4.3 Исследования технологических параметров	87
4.4 Обработка результатов исследований	104
4.5 Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений	105
4.6 Выводы по результатам IV-го раздела	106

РАЗДЕЛ V РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ОБВЯЗКИ ПЕЧИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ СВОДА	107
5.1 Напряженно-деформированное состояние свода	107
5.2 Методика расчета стальной обвязки стекловаренной печи	117
5.3 Выводы по результатам V-го раздела	123
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А (таблицы усилий элементов (стержней))	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (рекомендации по эксплуатации сводов промышленных печей при первичном запуске)	167
ПРИЛОЖЕНИЕ В (акты внедрения)	181

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Стекловаренные печи представляют собой важнейший комплекс технологического оборудования для производства стекла, применяемого в промышленности, строительстве и других отраслях. При этом, в связи с общемировой тенденцией к контролю качества производимой продукции и сбережению энерго- и материальных ресурсов, индустрия предъявляет повышенные требования к технологическому оборудованию. В отношении стекловаренных печей это означает необходимость отслеживания температурных и механических процессов внутри и снаружи агрегата печи с возможностью их регулирования, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к металлическим каркасам печей, от которых зависит качество технологической части печи и продолжительность ее межремонтной эксплуатации. Одновременно в рамках указанной проблемы стоит задача снижения аварийности в работе печей, что связано, в том числе, с корректным проектированием металлических каркасов при учете влияния всех действующих нагрузок и, соответственно со своевременным обнаружением и коррекцией дефектов в их тепловой защите. Проектирование каркасов печей базируется на практическом опыте, без достаточного научного обоснования.

Указанные причины вызывают необходимость, во-первых, в разработке алгоритмов сбора и обработки информации в технологических системах работы стекловаренных печей для адекватного определения нагрузок и воздействий на каркас печи, и, во-вторых, для определения рационального конструктивного решения каркаса печи с учетом специфики эксплуатации для конкретных технологических объектов.

Актуальным является вопрос увеличения длительности безремонтной работы стекловаренных печей в стекольном производстве. Он связан с необходимостью снижения себестоимости продукции, а также экономией огнеупорных материалов, металлоконструкций обвязки и т. п.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в рамках кафедральных научно-исследовательских работ:

- К2-13-06 «Разработка ресурсосберегающих и безопасных строительных технологий с применением современных материалов и конструктивных систем в условиях Донбасса» (гос. регистр. № 0109U006721);
- К2-13-11 «Разработка и совершенствование ресурсосберегающих и безопасных конструктивных и организационно-технологических решений при строительстве, эксплуатации, реконструкции и ликвидации зданий и сооружений в сложных условиях» (гос. регистр. № 0111U008174);
- К2-13-16 «Инновационные энергоресурсосберегающие организационно-технологические процессы возведения и реконструкции зданий и сооружений» (гос. регистр. № 0117D000268);
- К2-13-21 «Развитие конструктивных систем и организационно-технологических процессов для зданий и сооружений на этапах жизненного цикла» (гос. регистр. № 0121D000089).

Степень разработанности темы.

Вопрос проектирования металлических каркасов обвязки печей мало освещен и на сегодняшний день практически отсутствует теоретически и экспериментально обоснованные методики их проектирования. В настоящее время не существует актуальных нормативных документов и рекомендаций по проектированию и эксплуатации системы металлического каркаса печи. Работа стекловаренных печей и конструкция описана в работах В. И. Бельского, В. М. Будова, Ю. М. Волгиной, А. А. Тихоновой, R. Moreau.

Совершенствованию технических характеристик посвящены работы В.Я. Дзюзера, A. Ungan, R. Viskanta, R. Beerkens, M. Daniels. Физико-химические и технические свойства материалов, составляющих футеровочный корпус печей, изложены в работах П. П. Будникова, Г. Н. Бурмисторова, И. С. Кайнарского, И. Д. Кащеева, К. К. Стрелова, С. Г. Aneziris, W. Landenfeld, M. Rigaud, S. Zhang, A. P. Margishvili, V. P. Migal. Имеющиеся методики проектирования каркасов

печей не дают достаточно эффективных (экономичных) решений в связи с отсутствием указаний по достоверному определению действующих на каркас нагрузок и, особо, из-за неучета температурного воздействия. Методики расчета описаны в работах М. Ш. Исламова и В. Тринкса и основаны на введении коэффициента для учета дополнительной температурной нагрузки без учета сброса напряжений в колоннах обвязки, предусмотренного на практике.

Целью исследования является развитие методики расчета металлических каркасов обвязки ванных стекловаренных печей на основе численных и экспериментальных исследований действительного напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом параметров жизненного цикла с возможностью управления его параметрами.

На основе выполненного критического анализа конструктивных решений, методов расчета и традиционного проектирования каркасов обвязки стекловаренных печей поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Выполнить теоретическую оценку существующих методик расчета металлических каркасов обвязки стекловаренных печей.
2. Выполнить теоретическую и экспериментальную оценку влияния технологического процесса этапов жизненного цикла стекловаренной печи на напряженно-деформированное состояние конструкций металлического каркаса.
3. Разработать алгоритм сбора нагрузок на металлический каркас обвязки стекловаренной печи с учетом уточненных параметров нагрузок и воздействий.
4. Оценить влияние податливости узлового соединения подвески главного свода на напряженно-деформированное состояние боковых колонн металлического каркаса печи.
5. Разработать усовершенствованную методику расчета поперечной рамы металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей с учетом изменения напряженно-деформированного состояния общей системы печи при управлении параметрами за счет податливости соединения подвески свода печи.

Объект исследования – напряжённо-деформированное состояние конструктивных элементов системы металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей непрерывного действия.

Предмет исследования – изменение параметров напряженно-деформированного состояния пространственной системы металлического каркаса стекловаренной печи с учетом этапов жизненного цикла.

Научную новизну полученных результатов составляют:

- уточненные значения параметров напряженно-деформированного состояния конструкций металлического каркаса печи с учетом особенностей их эксплуатации;
- уточненные значения напряженно-деформированного состояния свода печи при переменном эксцентризите приложения продольной нагрузки;
- алгоритм формирования расчетной модели ванной стекловаренной печи в вычислительных комплексах, отличающийся от ранее реализованных подходов в части учета уточненных технологических и эксплуатационных нагрузок и методов регулирования НДС конструкций в расчетной модели за счет изменения жесткостной характеристики тяжа;
- уточненные значения распора свода при нагреве на основе учета коэффициента температурного расширения кладки с учетом регулирования для установленных температурных интервалов;
- параметры управления напряженно-деформированным состоянием конструкций металлического каркаса обвязки и свода печи;
- разработке алгоритма расчета конструкций металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей по критерию удельной металлоемкости, отличающегося от ранее реализованных подходов в части учета:
 - уточненной оценки несущей способности внецентренно-сжатых элементов каркаса обвязки;
 - податливости опорных конструкций;
 - предложенного поправочного коэффициента (γ_T), учитывающего

своевременную регулировку опор подвески свода печи;

- параметрами конструкций в период введения в эксплуатацию, учитывающего не своевременную регулировку опор;
- контроля уровня напряжений в своде, с проверкой внутренних усилий по условию прочности на внерадиальное нагружение с определением температур возникновения предельного состояния.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов работы состоит в разработке:

- Рекомендаций по расчету металлических конструкций каркаса обвязки ванных стекловаренных печей, обеспечивающих разработку оптимальных по расходу стали проектных решений, базирующихся на:
 - уточненной оценке несущей способности внерадиально-сжатых элементов рамы металлического каркаса стекловаренной печи, выполняемой с учетом температурных режимов эксплуатации объекта;
 - алгоритме формирования расчетной схемы каркаса печи с возможностью учета влияния податливости узловых соединений с помощью «тяжей-компенсаторов»;
 - алгоритме стабилизации напряжений в конструкциях в температурных интервалах технологического процесса эксплуатации по количественным значениям параметров регулирования «тяжей-компенсаторов»;
 - учете возможности изготовителя к реализации разработанного проектного решения в виде плоской поперечной рамы металлического каркаса системы обвязки стекловаренной печи с учетом распора свода на всех стадиях эксплуатации.
 - Рекомендаций по эксплуатации сводов промышленных печей при первичном запуске, положения которых основаны на методике стабилизации напряжений в конструкциях металлической обвязки и сводов при помощи регулирования тяжей каркаса на определенное количество витков в соответствии с технологическим режимом и возможностью визуального контроля за

состоянием свода в период его «выводки» при становлении температурного режима печей.

Методология и методы исследования. В основу численного исследования напряженно-деформированного состояния металлических конструкций каркаса стекловаренной печи, положен метод конечных элементов (МКЭ). Экспериментальным методом получены результаты исследований реальных эксплуатационных и технологических нагрузок при помощи стандартных измерительных приборов и специального оборудования для данного вида сооружений. Для обработки и анализа результатов экспериментальных исследований использованы методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- методика проведения натурных экспериментальных исследований на конструкциях стекловаренной печи в период ее запуска;
- результаты численных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металлического каркаса обвязки печи с учетом технологического режима эксплуатации;
- методика формирования пространственной модели стекловаренной печи с реализацией в вычислительных комплексах с учетом технологических и эксплуатационных нагрузок;
- алгоритмы управления напряженно-деформированным состоянием конструктивных элементов металлического каркаса обвязки и свода печи;
- методика расчета металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач исследования, выполнении натурных экспериментальных исследований на реальном объекте в период ввода его в эксплуатацию, теоретической обработке и интерпретации полученных данных экспериментальным путем с численными исследованиями, оценке НДС элементов конструкций каркаса стекловаренной печи, разработке алгоритма редуцирования напряжений в системы и анализе результатов, полученных на основе его использования, внедрение результатов

работы. Представленные в диссертационной работе результаты получены автором самостоятельно. Отдельные составляющие результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые указаны в перечне научных публикаций.

Степень достоверности результатов подтверждена данными экспериментальных исследований, которые выполнены с применением современных технологий и оборудования со статистической обработкой данных, а также соответствие численных исследований НДС конструкций каркаса стекловаренной печи.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях (г. Харьков, 2014 г.), (г. Ростов-на-Дону, 2015 г.), (г. Томск, 2018 г.), (г. Бендеры, 2018 г.). На Международных молодежных форумах (г. Белгород, 2015 г., 2018 г.). На Международных научных конференциях (Тула-Минск-Донецк, 2017 г.), (Астрахань, 2018 г.). На Международных Академических чтениях (г. Курск, 2018 г.). На ежегодных научно-технических конференциях ДонНАСА в период с 2008 г. по 2021 г.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором в 25 научных изданиях, самостоятельно в 4 научных изданиях, в том числе 8 – в рецензируемых научных изданиях, 7 – изданий по материалам научных конференций.

Общий объем публикаций – 19,59 п.л., из которых 10,48 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы (178 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет 184 страницы, в том числе 103 страницы основного текста, 25 полных страниц с рисунками и таблицами, 22 страницы списка использованной литературы, 34 страницы приложений.

РАЗДЕЛ I. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ ВАННОГО ТИПА. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. Состояние вопроса

Стекольной промышленности присущи высокие капитало-, материально-, энергоемкость производства. При этом стекольная промышленность в значительной степени определяет уровень загрузки производственных мощностей ряда базовых отраслей экономики. Существенным ограничением развития стекольной промышленности является недостаточный уровень конкурентоспособности ее продукции. Технологический уровень стекольных производств в странах СНГ низок в сравнении с промышленно развитыми странами. Только 20 % применяемых в стеклоиндустрии технологических схем соответствует современному мировому уровню, а 45 % являются устаревшими и не имеют резервов для модернизации. Недостаточно высокий технологический уровень производств обуславливает значительное отставание по ряду основных технико-экономических показателей стекольной индустрии:

- частые холодные ремонты печей;
- средняя энергоемкость варки стекла выше на 20–30 %;
- средняя производительность труда ниже в 1,5–2 раза;
- суммарное удельное негативное воздействие на окружающую среду.

Развитие промышленности, методов изучения свойств стекла позволило за последние десятилетия создать принципиально новые подходы к расчетным схемам печей. Но, к сожалению, отечественные научные сотрудники и стеклоделы не ищут новых подходов к расчетам и конструированию печей, из-за упадка экономики страны, из-за отсутствия производства оборудования, а вынуждены покупать все в основном в странах Западной Европы. В последнее время Китай выходит на мировой рынок по поставке оборудования и созданию технологий для стекольной промышленности. В этих условиях стоит задача

стимулирования прогрессивных технологических сдвигов и создание условий для перехода стекольной промышленности на инновационный путь развития.

Решение этой задачи предполагает появление прогрессивных методов проектирования стекловаренных печей, с учетом их технологических особенностей.

Перед предприятиями стекольной промышленности стоит задача продления службы агрегатов стекловаренных печей без необходимости проведения горячих и холодных ремонтов, продление «компании» печи более 5 лет. Если технологический процесс контроля и управления параметрами внутрипечной среды практически доведен до совершенства, то, как правило, проектирование каркасов печей базируется лишь на практическом опыте.

В связи с узкой специализированной сферой применения таких конструкций и сложностью их проектных решений, зависящих от конструкций и типов самих агрегатов печей, заданных технологическими параметрами производства, перед проектировщиками возникает необходимость их решения. При реконструкции или введении мощностей стеклопроизводства разработчикам рабочей документации, из-за отсутствия нормативной и справочной литературы, приходится исходить из уже имеющейся документации предприятий, разработанной еще на базе нормативной литературы и методик, устаревших несколько десятилетий назад.

В настоящее время не существует актуальных нормативных документов и рекомендаций по проектированию и эксплуатации системы металлического каркаса печи. Имеющиеся методики проектирования каркаса печи не дают достаточно четких надежных и экономичных решений из-за неучета температурного воздействия, вследствие чего сечения элементов каркаса принимаются с большим запасом, что ведет к перерасходу металла. Проектирование ванных стекловаренных печей непрерывного действия сводится к решению комплекса отдельных, логически связанных между собой технических задач. Ему свойственна множественность решений, вытекающих из варианности выпускаемой продукции, ее качества, и соответственно теплового режима.

На рис. 1.1 приведена мониторинговая карта наличия стекольного производства. На карте отмечены точки расположения крупнейших стекольных предприятий, которые на данный момент времени продолжают функционировать. Список основных стекольных заводов России приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Крупные предприятия стекольных заводов России

№ п/п	Название завода	Местоположение
1	2	3
1	«ОСтек»	Белгородская область, г. Старый Оскол
2	«Балахнинское стекло»	Нижегородская обл. п. Гидроторф
3	«Луч»	Республика Северная Осетия
4	«Гардиан Стекло»	г. Рязань
5	Стекольный завод «Факел»	Удмуртская обл., с. Факел
6	«Коркинский стеклоторный завод»	Челябинская обл., г. Коркино
7	Борский стекольный завод «Эйджи си»	Нижегородская обл., г. Бор
8	«Опытный стекольный завод»	Владимирская обл., г. Гусь-Хрустальный
9	«Дмитровский стекольный завод»	Московская обл., с. Борисово
10	«Киришский стекольный завод»	Ленинградская обл., г. Кириши
11	Стекольный завод «Красное эхо»	Владимирская обл. п. Красное Эхо
12	«Омский стекольный завод»	г. Омск
13	«Саратовстройстекло»	г. Саратов
14	«Солнечногорский стекольный завод»	Московская обл., г. Солнечногорск
15	«Чагодощенский стекольный завод»	Вологодская область, п. Чагода

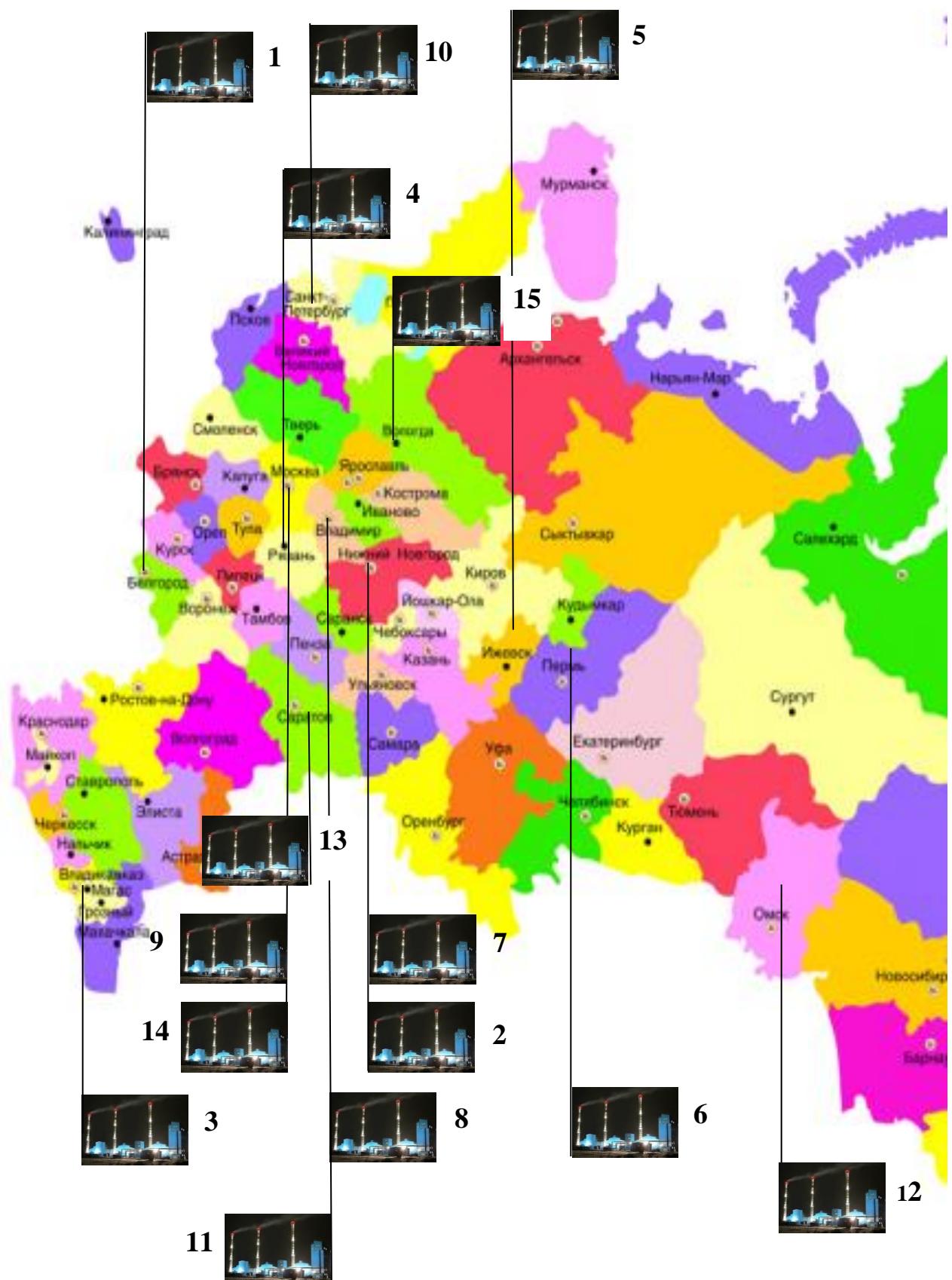


Рисунок 1.1 – Карта наличия мощностей стекольных предприятий

Если по общим вопросам технологических расчетов, проектирования и строительства стекловаренных печей имеется литература 1941–1983 гг., в современных версиях встречается в виде немногочисленных статей в периодической печати. Информация ограничивается технологическими данными варки стекла, расчетами теплового баланса внутри печи, расчетами огнеупорной кладки и т. д. По методике расчета и моделированию расчетной схемы металлического каркаса СВП, с учетом всех нагрузок в т. ч. температурных, специальной литературы явно недостаточно.

На основании проведенного анализа, наблюдается резкий спад активности публикаций после 2000 года, что обусловлено неустойчивостью рынка стекла, к 2015 году ситуация стабилизировалась.

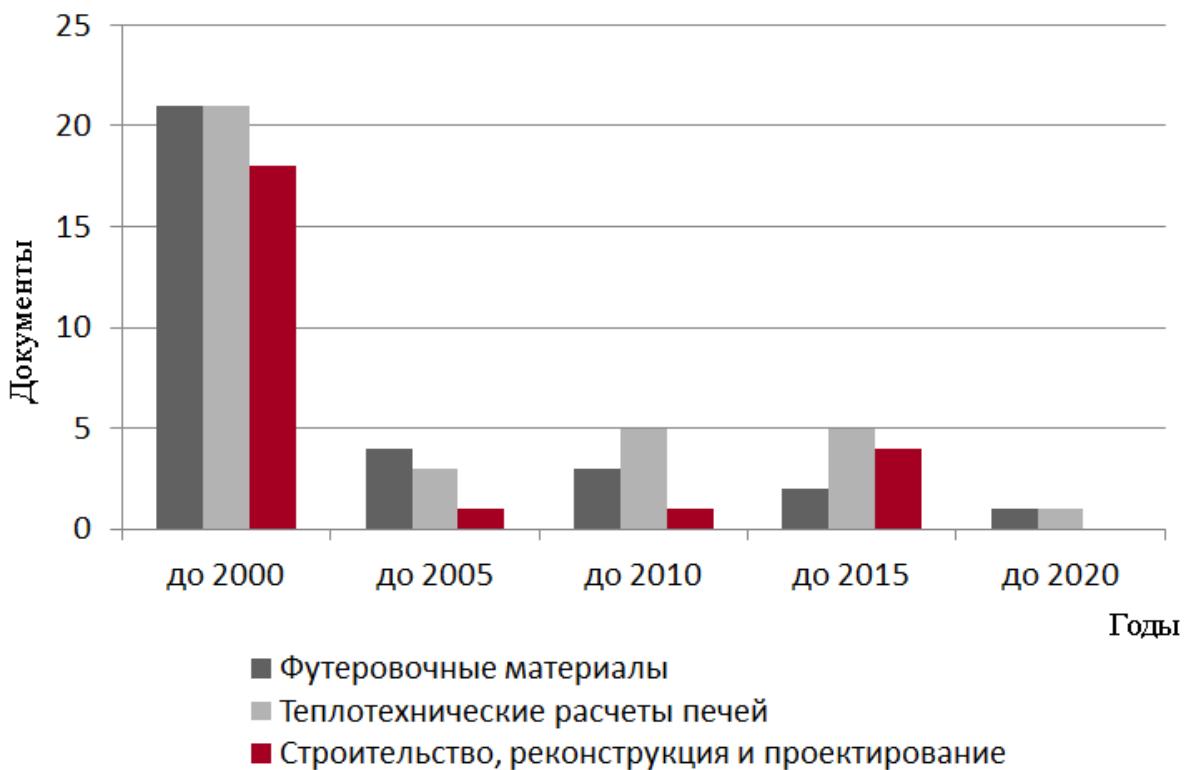


Рисунок 1.2 – Тенденции актуализации работ

Для данного класса сооружений можно предположить, что нагрузки от футеровки, распора свода, расширения кладки от температуры и стекломассы являются основными, определяющими внешние размеры, конфигурацию, вид и параметры сечений металлических конструкций. При этом отличительной

особенностью каркасов печей являются высокотемпературные воздействия на несущие конструкции. Совершенствованию теплотехнических параметров стекловаренных печей посвящены работы В. Я. Дзюзера [50-54], А. Ungan [177], R. Viskanta [177], R. Beerkens [167], M. Daniels [168]. Физико-химические и технические свойства материалов, составляющих футеровочный корпус печей, изложены в работах П. П. Будникова [22-23], Г. Н. Бурмисторова [26], И. С. Кайнарского [78-79], И. Д. Кащеева [80-82], К. К. Стрелова [131-134], C. G. Aneziris [166], W. Landenfeld [172], M. Rigaud [176], S. Zhang [178], A. P. Margishvili [173], V. P. Migal [174]. Работа стекловаренных печей и их конструкция описана в работах В. И. Бельского [14], В. М. Будова [24-25], Ю. М. Волгиной [29], М. А. Глинкова [38], В. Л. Гусовского [44], А. А. Тихоновой [144], R. Moreau [175].

Оценка принципиальных конструктивных решений опорного узла крепления свода печи с возможностью регулирования, позволила выделить основные расчетные схемы проектирования каркасов обвязки стекловаренных печей. Выделить основное назначение в работе системы агрегата стекловаренной печи, как одним из важнейших конструктивных элементов, от надежности которого зависит срок эксплуатации печи в целом. Основным предназначением металлического каркаса обвязки является восприятие и снятие усилий от распора свода и давления стекломассы.

Методики расчета основных конструкций печей описаны в работах М. Ш. Исламова [65-66], В. Тринкса [146-147]. Существующая методика носит достаточно приближенный характер вследствие неучета расширения кладки при нагревании. Подход к учету температурных воздействий при расчете силы распора свода основан на введении поправочного коэффициента, который с повышением температуры в печи увеличивает распорное усилие более чем в три раза. Такие величины коэффициентов принимаются на основе эмпирических данных, исходя из возможности нагрева, воздействия агрессивных газов и других специфических условий службы каркасов.

1.2. Анализ конструктивных схем. Основные конструктивные элементы

Анализ существующих проектных решений ванных стекловаренных печей показывает, что, несмотря на многообразие факторов, определяющих конструктивную форму, их схема принимается однотипной. Ванная стекловаренная печь – основной технологический агрегат стекольного производства – представляет собой многозвеневой объект с распределенными параметрами, значительной инерционностью и свойствами самовыравнивания, подверженный случайным и детерминированным возмущениям, действующим как на входные, так и выходные параметры [51]. Это сложные сооружения из огнеупорного материала, состоящие из 2-х частей: верхнего строения печи (рабочая камера, горелки) и нижнего строения печи (бассейн со стекломассой).

В настоящее время в стекольной промышленности применяют в основном ванные стекловаренные печи. Ванные печи непрерывного действия применяют для варки и выработки листового, сортового, бутылочного, тарного, посудного и др. стекла. Их конструкция и размеры зависят от вида вырабатываемых изделий, применяемого топлива и режима варки. В ванных печах непрерывного действия все стадии процесса стекловарения протекают в определенной последовательности непрерывно и одновременно в различных частях бассейна печи.

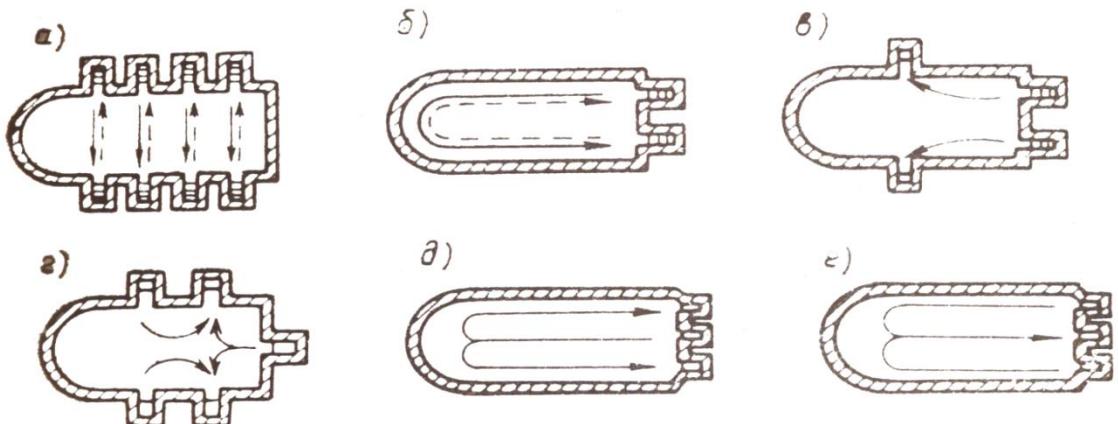


Рисунок 1.3 – Типы ванных печей в зависимости от направления топливного факела: а) регенеративная печь с поперечным направлением пламени; б) то же с подковообразным; в) рекуперативная печь с продольным направлением пламени; г) то же, с комбинированным; д) и е) то же, с подковообразным

Различают зоны варки, осветления, студки и выработки, которые располагаются одна за другой на различных участках по длине бассейна печи. В каждой зоне поддерживается неизменный во времени температурный режим.

Температура по длине печи постоянно возрастает от загрузочного кармана до зоны осветления, а затем снижается в выработочной части печи. Ответственными точками температурного режима являются максимальная температура при осветлении и минимальная при выработке. От поддержания заданного температурного режима в печи зависит не только качество получаемого стекла, но и возможный съем стекломассы.

Малые ванные печи используют при производстве штучного стекла – тарного, сортового, парфюмерного и аптекарской посуды. Средние ванные печи (СВП) применяют для механизированного производства различной консервной тары и бутылок. Крупные ванные печи используют при варке и механизированной выработке листового, сортового и тарного стекла. Их производительность 150–450 т/сут.

СВП представляет собой сложный теплотехнический агрегат и ее конструкция зависит от способа обогрева, направления движения газов, способа разделения бассейна и пламенного пространства. СВП состоит из рабочей камеры, горелок, устройства для использования тепла отходящих газов (регенераторы или рекуператоры), переводных клапанов, фундаментов, опор и каркаса. Часть бассейна, в которой расположены зоны варки и осветления, называют варочной. Часть, где находится зоны студки и выработки – выработочной частью (план на рис. 1.3). В варочной части бассейн обычно имеет прямоугольную форму в плане, в выработочной – прямоугольную или другую, удобную для присоединения стеклоформующих машин, вырабатывающих стеклоизделия.

Обычно различают верхнее и нижнее строение ванной печи. Верхнее строение состоит из рабочей камеры и горелок, а нижнее, соединенное каналами с верхним, включает теплоиспользующие устройства, каналы для отвода отходящих газов, фундамент и стены или колонны, поддерживающие верхнее строение. В бассейне

ванных печей непрерывного действия различают технологические зоны варки и осветления 2, студки 3 и выработки 4, которые располагаются по длине бассейна одна за другой (рис. 1.4). Рабочая камера ванных печей состоит из бассейна – ванны I (продольный разрез 1–1 рис. 1.5), заполненной стекломассой, и газопламенного пространства II (рис. 1.3), находящегося над ним. Бассейн обычно располагается на отдельном фундаменте. Для загрузки шихты в торце бассейна сооружают широкие выступающие карманы – загрузочный карман 1 (продольный разрез 1–1 рис. 1.3). Бассейн ванных печей выкладывается из крупных огнеупорных брусьев. Пламенное пространство печи 15 (поперечный разрез 2–2 рис. 1.6) располагается над бассейном и ограничивается подвесными стенами и сводом 12. Обычно пламенное пространство на 100–300 мм шире бассейна для установки металлических опор снаружи бассейна.

В ванных печах стены и свод имеют самостоятельные металлические опоры. Самостоятельная подвеска частей печи дает возможность производить их ремонт независимо друг от друга и в различное время.

Стены пламенного пространства располагают на чугунных плитах (лафетах), которые опираются на кронштейны 17, закрепленные на металлических колоннах обвязки 10. Сооружение сводов начинают с укладки пят 13. Пята опирается на уголок 14 (рис. 1.6).

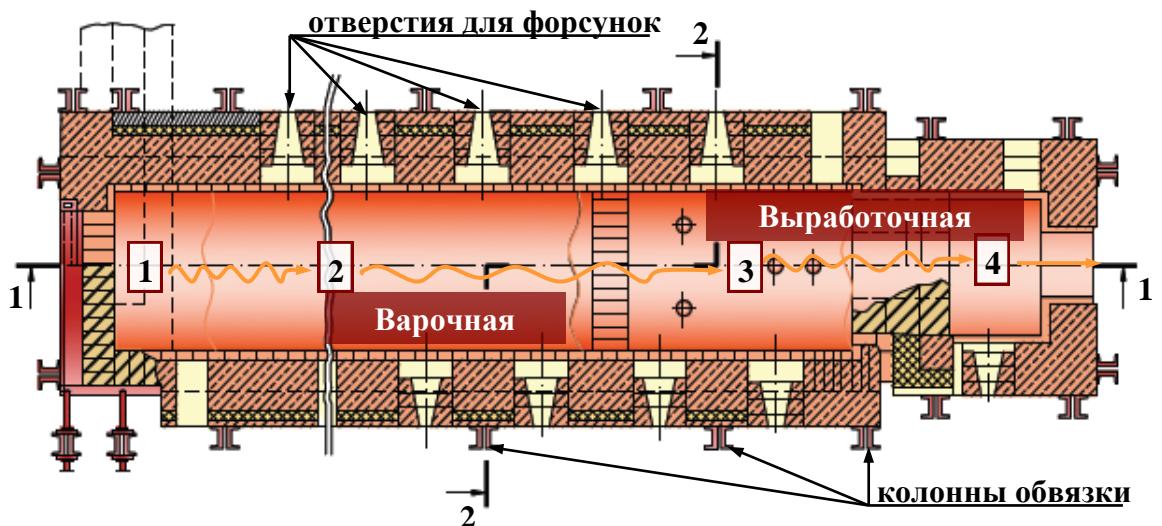


Рисунок 1.4 – План стекловаренной печи

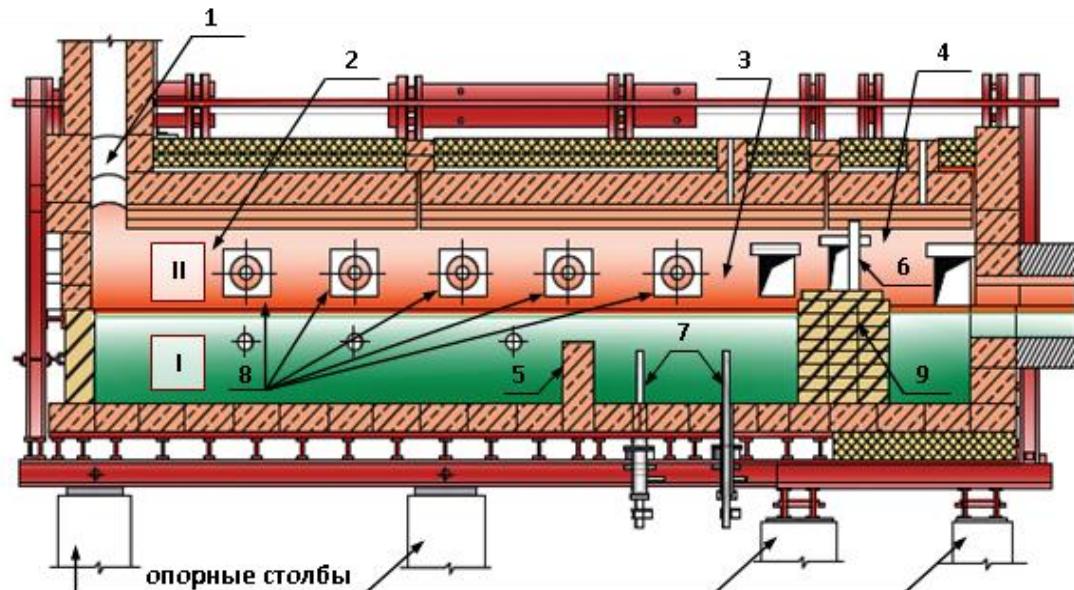


Рисунок 1.5 – Разрез 1–1 стекловаренной печи

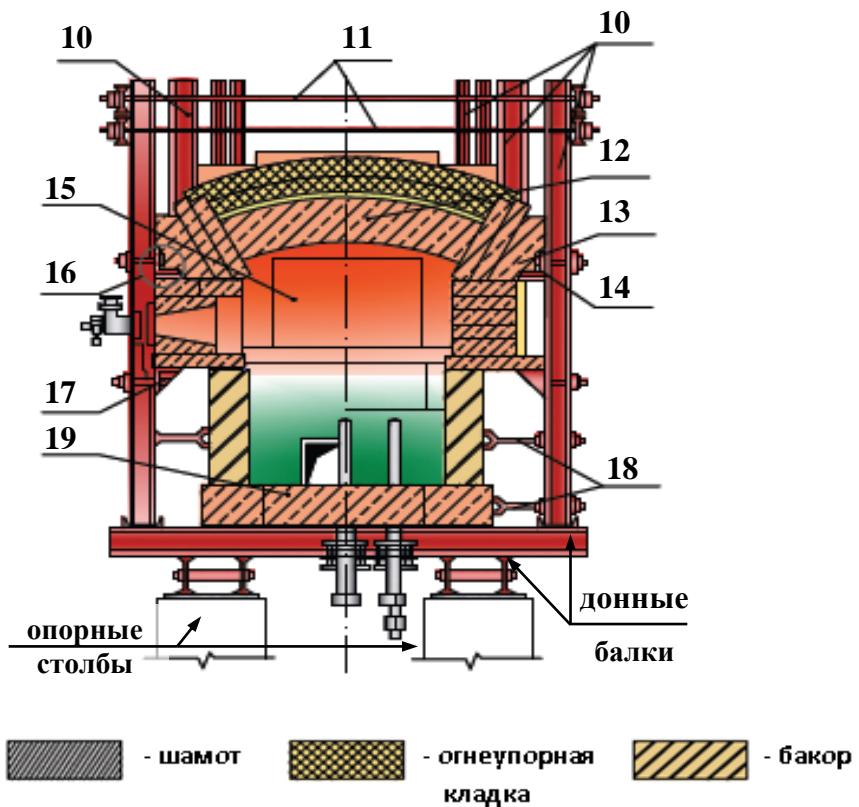


Рисунок 1.6 – Разрез 2–2 стекловаренной печи: 1 – загрузочный карман; 2 – варочная часть бассейна; 3 – студочная часть бассейна; 4 – выработочная часть бассейна; 5 – порог; 6 – экран; 7 – электроды; 8 – горелки; 9 – проток; 10 – колонны обвязки; 11 – тяжи; 12 – свод; 13 – пята свода; 14 – уголок; 15 – пламенное пространство; 16 – уголок и швеллер; 17 – кронштейн; 18 – упорные болты; 19 – дно бассейна

Для восприятия усилий, возникающих при нагревании, в кладке предусматриваются температурные швы. Размеры швов зависят от температурного режима печи и температурного расширения применяемого материала [143, 144, 145].

Каркас обвязки является одним из важнейших конструктивных элементов стекловаренных печей. От его надежности, целостности и долговечности зависит срок эксплуатации печи в целом. Обвязочный каркас печи служит для восприятия усилий от распора свода и давления стекломассы, предупреждения разрушения кладки при изменении температуры, а также он служит для подвески свода и стен пламенного пространства. Обычно металлический каркас состоит из вертикальных металлических колонн прокатного профиля, стянутых связями (тяжами) вверху и внизу. Часто колонны в нижней части крепятся жестко, а вверху предусматривается крепление, регулируемое с помощью связей (тяжей) из круглой или полосовой стали. Нижняя обвязка крепит колонны (стойки) у дна, верхняя обвязка – колонны у свода и воспринимает в основном распор свода. При разогреве печи динасовые своды расширяются и происходит усадка кладки. Поэтому предусматривается возможность гибкой регулировки обвязки печи.

Верхние связи колонн, воспринимающие распор свода, дают возможность регулировать затяжку свода, что необходимо при выводке (вывод в рабочее положение) и остановке печи. Регулирование обычно происходит вручную.

Распор свода воспринимается вертикальными колоннами через специальные детали – уголок и швеллер 14 (поперечный разрез 2–2 рис. 1.6), на которых лежит пята свода. Опорные уголки и швеллер лежат на чугунных кронштейнах, закрепленных на колоннах. Аналогично подвешиваются и динасовые стены пламенного пространства. Обвязка бассейна воспринимает давление стекломассы и должна легко сниматься при горячем ремонте. Она состоит из упорных болтов с развилкой 18 и зажимающего уголка, которым обвязан бассейн. Дно бассейна обвязано таким образом, чтобы его затяжку можно было регулировать, не изменяя при этом положения колонн, как и для обвязки бассейна – при помощи упорных болтов с развилкой 18 (рис. 1.6).

1.3. Нагрузки и воздействия на металлический каркас обвязки печи. Методики проектирование каркасов обвязки стекловаренных печей

Как уже указывалось в п. 1.2, каркас обвязки печи служит для восприятия усилий от распора свода и давления стекломассы, а также для подвески свода и стен пламенного пространства. Каркасы печей стекловаренного производства, как и каркасы прокатных, кузнечных печей, имеющих распорные своды, рассчитывают исходя из распорных усилий, создаваемых сводом [80].

Расчет распора свода ведут исходя из самого тяжелого случая, когда свод под воздействием температурных расширений внутренних слоев в процессе выводки печи в рабочий режим начинает раскрываться (рис. 1.7).

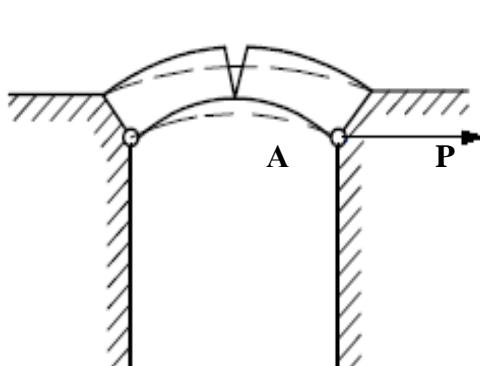


Рисунок 1.7 – Распор свода

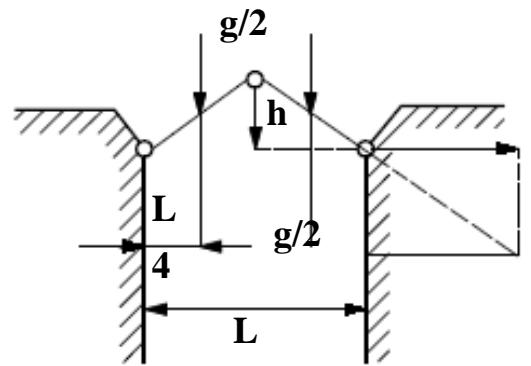


Рисунок 1.8 – Схема расчета распора свода

Принято считать [80], что при массе свода g на каждый стержень будет действовать нагрузка, равная половине массы свода, приложенная к середине стержня. Тогда из равенства крутящих моментов относительно точки опоры A следует

$$\frac{g}{2} \times \frac{1}{4} L = Ph, \text{ откуда } P = \frac{gL}{8h}, \quad (1.7)$$

где h – стрела свода в м;

L – пролет свода в м;

g – масса свода между стойками в т;

P – распор свода.

Как видно из уравнения (1.7), распор свода тем больше, чем больше

относительное значение стрелы подъема и меньше центральный угол. Свод при нагреве расширяется и создает дополнительное давление на пяты. Для учета этого давления полученную расчетом величину P при температуре под сводом печи до 900°C умножают на 2; до $1\,000^{\circ}\text{C}$ умножают на 2,5; до $1\,300^{\circ}\text{C}$ – на 3, и до $1\,500^{\circ}\text{C}$ – на 3,5 [80].

В основном каркас обвязки стекловаренных печей рассчитывают как обычные металлоконструкции в соответствии с требованиями ДБН В.1.2-2:2006 [57], но расчетное сопротивление в элементах каркасов печей марки Ст3 принимают равным $1\,200 \text{ кгс/см}^2$. Такая величина принимается на основе эмпирических данных исходя из возможности нагрева, воздействия агрессивных газов и других специфических условий службы каркасов [28].

Распорное усилие арочного свода под действием собственного веса и высокой температуры рассчитать трудно из-за необходимости учета расширения кладки при нагревании. Его рассчитывают достаточно приближенно, в холодном состоянии печи:

$$P = k \times \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (1.8.)$$

$$k = \frac{g}{2 \sin(x/2)}, \quad (1.9)$$

С повышением температуры свода распорное усилие увеличивается:

$$P_t = a \frac{g}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (1.10)$$

где α – поправочный коэффициент, зависящий от температуры под сводом в газопламенном пространстве печи.

Максимальный изгибающий момент при расстояниях между колоннами L (пролет свода) рассчитывают по формуле

$$M = \frac{P_t \times L}{8}, \quad (1.11)$$

При этом, необходимый момент сопротивления балки $W \text{ см}^3$, по которому производят выбор ее профиля и размеров:

$$W = \frac{M}{\sigma_{\text{don}}}, \quad (1.12)$$

где $\sigma_{don} = 11\ 750 \text{ Н/см}^2$.

Каркасы печей подразделяются на жесткие и подвижные [28]. Жесткий каркас представляет собой монолитное строительное сооружение, тогда, когда подвижной каркас благодаря отпуску связей дает возможность расширению кладки при нагревании. Автором источника отмечено, что из-за сложности выполнения отпуска связей в точном соответствии с температурным расширением кладки, подвижной каркас стараются не применять. Отмечена и автором сложность расчета силы распора свода, с учетом расширения кладки свода под влиянием температуры (рис. 1.10). Приближенная сила распора свода:

$$R = k \frac{P}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (1.13)$$

где R – распор свода, Н;

k – коэффициент увеличения силы R в зависимости от температуры;

P – сила тяжести свода по длине между стойками, Н;

α – центральный угол свода.

Значение коэффициентов k в зависимости от температуры, аналогично данным источника.

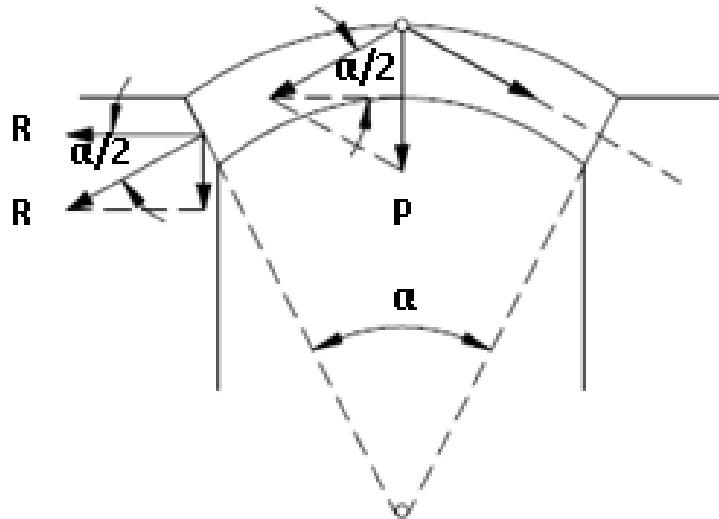


Рисунок 1.9 – Схема сил распора свода

Элементы стального каркаса рассчитывают по допускаемому напряжению на разрыв, не превышающему $\sigma = 11,75 \text{ кН/см}^2$. При установке печи в сейсмических

районах увеличивают прочность каркаса на сейсмичность [80, с. 338].

При расчете каркаса пятовые балки, стойки и верхние связи определяют расчетом. Момент сопротивления пятовой балки:

$$W_{n.\delta.} = \frac{Pl}{8\sigma}, \quad (1.14)$$

где $W_{n.\delta.}$ – момент сопротивления пятовой балки, см^3 ;

l – расстояние между стойками каркаса, см.

Конструкцию пятовой балки выбирают по рис. 1.10 и определяют номер профиля по найденному моменту сопротивления.

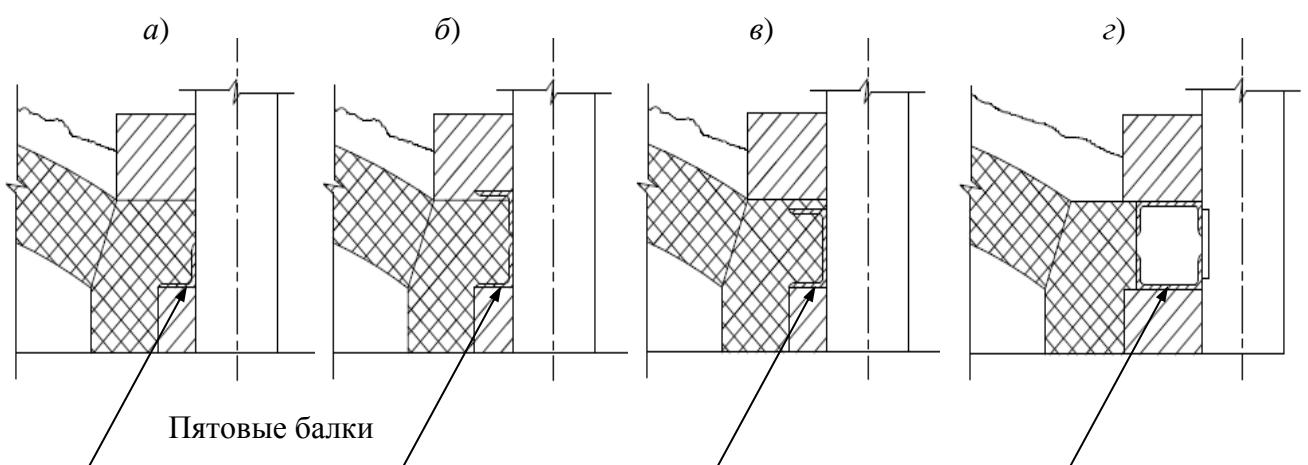


Рисунок 1.10 – Конструкция пятовых балок: а) равнополочный уголок;
б) два равнополочных уголка; в) один швеллер; г) два швеллера

Для прочности свода очень важно, чтобы не только швы между кирпичами и брусьями свода были радикальными, но чтобы и уклон пят был сделан также по радиусу.

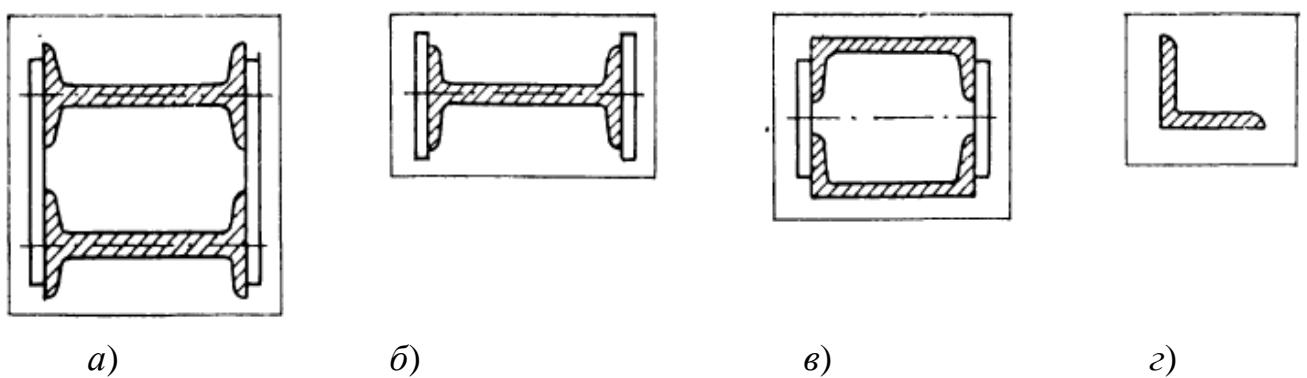


Рисунок 1.12 – Профили боковых и торцевых стоек: а) два двутавра; б) один двутавр; в) два швеллера; г) уголок равнополочный

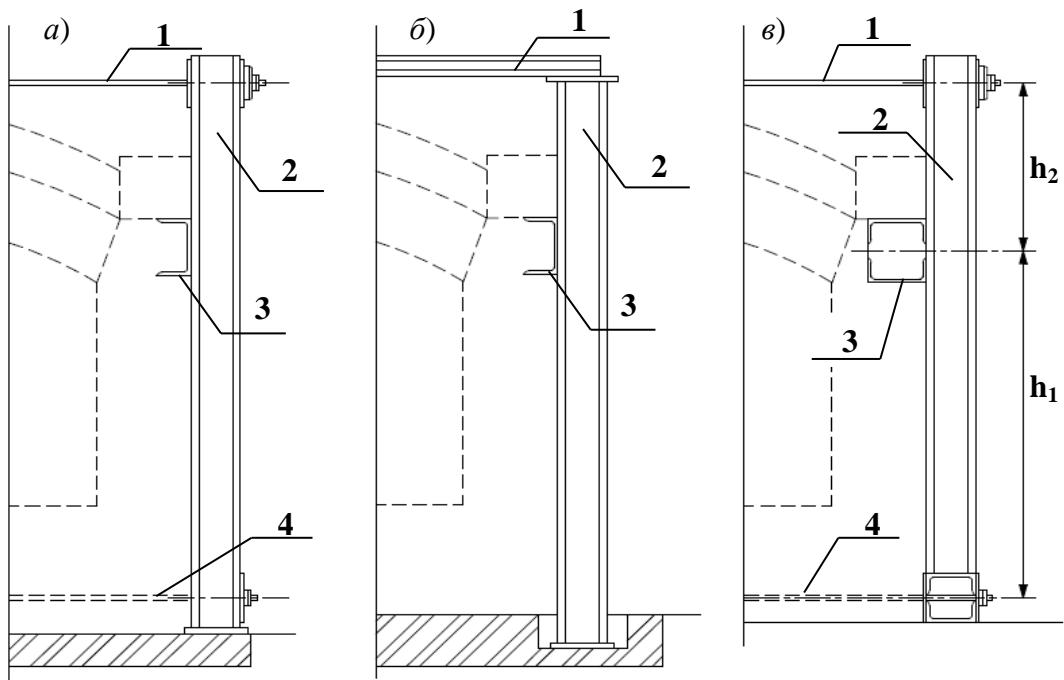


Рисунок 1.11 – Установка стоек каркаса: а) на фундамент печи; б) с заделкой нижнего конца в фундамент; в) на швеллерах; 1 – поперечная верхняя связь; 2 – стойка; 3 – пятовая балка; 4 – поперечная нижняя связь

Момент сопротивления боковой стойки:

$$W_{cm} = \frac{h_1 + h_2 R}{(h_1 + h_2) \sigma} \quad (1.15)$$

где W_{cm} – момент сопротивления боковой стойки, см^3 ;

h_1 – расстояние от нижней связи до пяты, см;

h_2 – расстояние от пяты свода до верхней связи, см (рис. 1.12).

По найденному моменту сопротивления находят номер профиля.

Сечение верхней связи:

$$\omega = \frac{R h_1}{(h_1 + h_2) \sigma}. \quad (1.16)$$

В качестве связи для жесткого каркаса выбирают уголок или полосу, для подвижного – круглого сечения. При подборе сечений проката необходимо стремиться к применению одних профилей для различных узлов каркаса.

Имеющиеся методики расчета металлических каркасов обвязки ванных стекловаренных печей не дают четких рекомендаций по учету распора при росте

свода, об этом свидетельствует и ряд авторских свидетельств времен бывшего советского союза [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Авторами предлагаются способы экономии сортамента металлопроката за счет усиления колонн обвязки в зоне действия максимальных изгибающих моментов металлическими листами, а облегчение продольных элементов обвязки предусматривается путем установки (в зоне максимальных изгибающих моментов) ребер жесткости. Часть изобретений направлена на управление ростом свода за счет установления дополнительных приспособлений на каркас обвязки печи [18].

Предложенные устройства весьма трудоемки в изготовлении и эксплуатации и не оправдывают экономию металлопроката на одну позицию сортамента. К тому же, эти приспособления не исключают наличие человеческого фактора при обнаружении чрезмерного распора свода. Не даются численные значения по величине роспуска тяжей свода. Остаются те же меры визуального осмотра печи в период ее выводки, который должен производиться персоналом каждый час. На практике применение таких приспособлений невозможно из-за трудности их обслуживания и ограничения к ним доступа. Для определения подъема свода применяются маяки, которые располагаются на его отдельных секциях.

1.4. Натурные исследования конструктива печей

На основании результатов натурных исследований изучены конструктивные особенности строения ванных стекловаренных печей. По конструктивному исполнению каркасы можно разделить на 2 группы: с жестким закреплением свода и податливым закреплением свода на колоннах обвязки (рис. 1.12–1.13).



Рисунок 1.12 – Резьбовое соединение с регулировкой вверху



Рисунок 1.13 – Жесткое крепление поперечной связи



Рисунок 1.14 – Жесткая подвеска свода



Рисунок 1.15 – Подвеска свода с возможностью регулирования



Рисунок 1.16 – Подвеска стен газопламенного пространства



Рисунок 1.17 – Соединение колонн с балками днища

Несущая часть днища печи представляет собой балочную клетку, состоящую из продольных двутавровых балок, соединенных болтовым соединением и поперечных двутавровых балок со средним шагом 300 мм, укрытыми металлическим листом (без сварки) с возможностью свободно перемещаться в

осевом направлении донным брусьям и изоляции при температурном расширении кладки. Металлическая конструкция днища опирается на опорные колонны. Днище крупной (на 250 т/сут.) ванной стекловаренной печи (рис. 1.18) представляет собой балочную клетку из продольных (I40Б1) и поперечных (I30Б1) прокатных балок с укладкой поверх металлическим листом $t = 6$ мм.



Рисунок 1.18 – Опорный узел продольных балок днища крупной ванной печи (съем 250 т/сут.)



Рисунок 1.19 – Конструкция днища средней ванной печи (съем 100 т/сут.)

По результатам теоретического обзора и натурных исследований существующих конструкций печей выявлены принципиально различные расчетные схемы одиночных рам металлического каркаса обвязки печей.

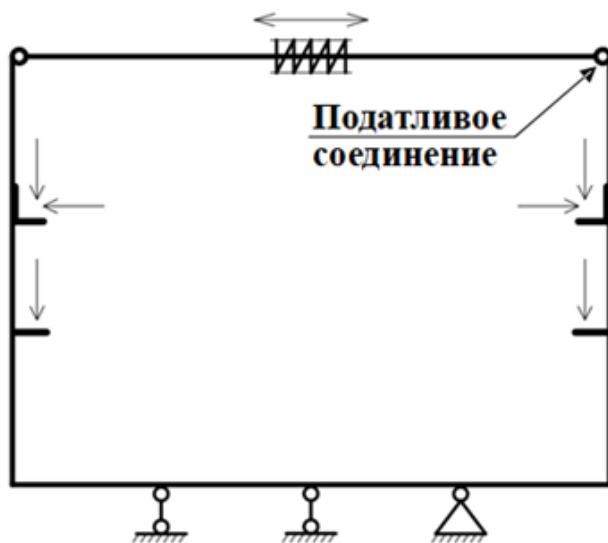


Рисунок 1.20 – Одиночная рама с жестким закреплением свода

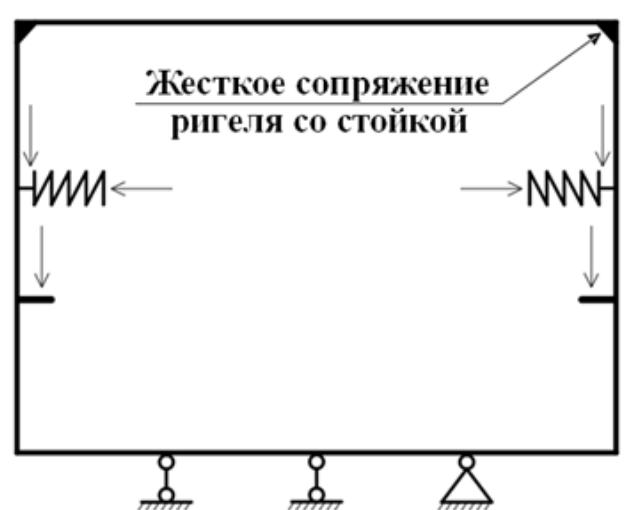


Рисунок 1.21 – Одиночная рамы с податливым закреплением свода

Первая схема предполагает шарнирное закрепление поперечных связей и жесткое закрепление свода, вторая схема включает жесткое закрепление поперечной связи с податливым креплением свода. Фактически, расчетной схемой каркаса печи является пространственная рама состоящая из одиночных рам. Для такой рамы характерно появления трех силовых факторов: изгибающих моментов M , поперечных сил Q и продольных осевых усилий N в стержнях.

1.5. СВП как технологический объект стекольной промышленности

В создавшихся условиях мирового экономического кризиса для повышения экономической эффективности любого промышленного предприятия, в том числе и стеклотарного, необходим детальный анализ каждой технологической операции, устранение негативных моментов путем выбора наилучшего решения и оценка принятой меры.

Основными этапами жизненного цикла стекловаренной печи как технологического объекта стекольной промышленности являются: техническое задание, проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт и вывод объекта из эксплуатации. Срок эксплуатации напрямую зависит от количества «компаний» печи, длительность компаний ограничивается временем эксплуатации футеровочной части.

Стекловаренная печь является сложным технологическим и опасным производственным объектом, где может произойти неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ. Ответственным моментом на этапе эксплуатации является «выводка» печи в рабочий режим, на этот период приходится около 23 % аварийных ситуаций. Проанализированы возможные аварийные ситуации.

К технологическим факторам причин аварий в период выводки можно отнести нарушение технологии выводки свода при ошибочных действиях персонала из-за недостатка опыта работ и отсутствия рекомендаций по регулировке тяжей металлического каркаса печи.



Рисунок 1.22 – Основные этапы жизненного цикла объекта СВП

На основании проведенного анализа рабочей документации на реконструкции ванных стекловаренных печей выявлено что 26 % дефекта футеровки печей приходится на свод печи, 52 % на стены и 22 % дно бассейна печи. Значительная доля аварий приходится на период «выводки» печи и требует проведения детального анализа этого процесса. Особое внимание уделяется «выводке» сводов СВП как наиболее характерным местам разрушения.

1.6. Анализ возможности продления службы ванных стекловаренных печей

Одной из актуальных проблем производства стекла является увеличение продолжительности кампании ванных стекловаренных печей. Для печей непрерывного действия кампания печи составляет от 48 до 60 месяцев. В современной практике встречаются случаи длительности компании 12–13 лет.

Этот показатель достигается при правильной организация планово-предупредительных ремонтов, систематических осмотрах и техническом обслуживании. Результаты ежемесячных осмотров и мероприятия.

Продолжительность межремонтного периода эксплуатации стекловаренных печей определяется множеством факторов, свойствами используемых огнеупорных материалов, условиями эксплуатации огнеупорной кладки, параметрами технологического режима, особенностями конструкции самой печи, тщательности проведения текущих предупредительных ремонтов. Практика показывает, что критическим элементом, определяющим общий срок службы печи, являются стены варочного бассейна, т. к. при длительной эксплуатации происходит практически полное разрушение огнеупорной кладки на уровне зеркала стекломассы за счет процессов высокотемпературной коррозии. Периодичность ремонта (T_1) принимается равной сроку службы (или ресурсу) наименее надежного элемента. Период эксплуатации печи до первого холодного ремонта T_2 составляет 21 месяц (t_2).

В зависимости от качества огнеупора этот срок может быть изменен в ту другую сторону. Время проведения должно составлять не более 40 сут. Горячие ремонты производят при преждевременном износе элементов печи без ее отключения. Продолжительность кампании (T_k) печей непрерывного действия составляет 48 месяцев [143].

На рисунке 1.23 представлена структура ремонтного цикла стекловаренной печи непрерывного действия. Результаты ежемесячных осмотров и мероприятия (ТО), осуществленные после осмотров, объем работ текущего и холодного

ремонтов, усовершенствования печи и ее отдельных элементов фиксируются в техническом паспорте.

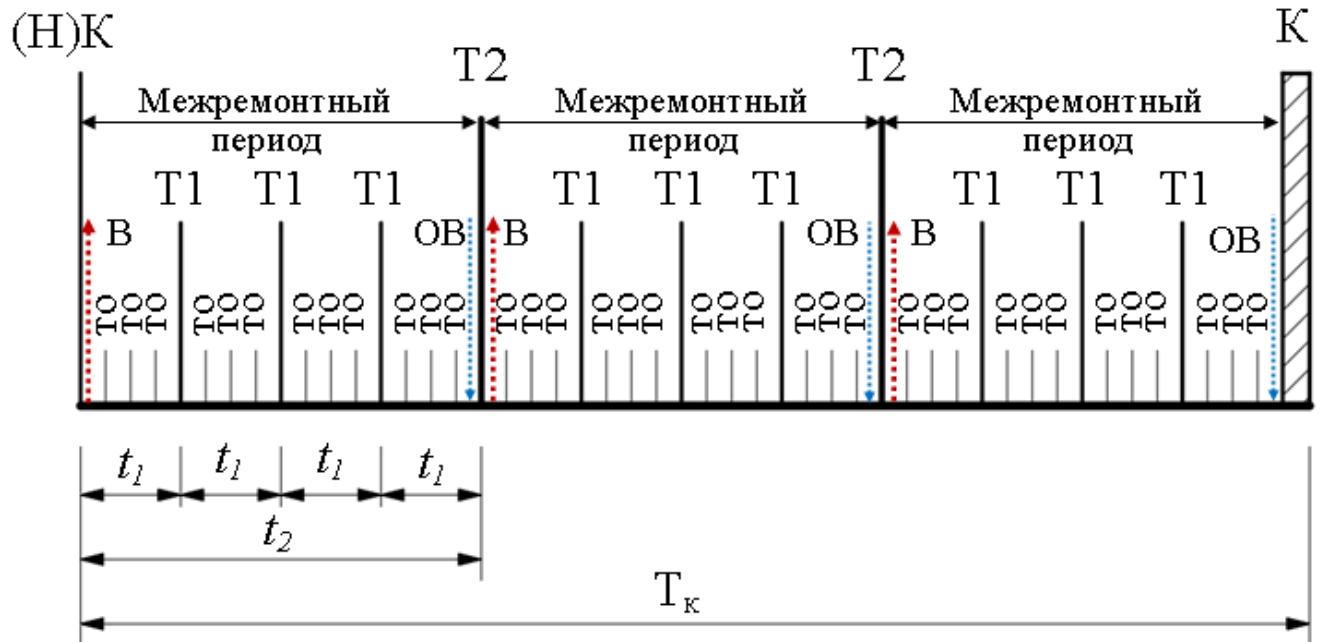


Рисунок 1.23 – Структура ремонтного цикла стекловаренной печи с годовым фондом рабочего времени 365 дней: $T1$ – Горячий плановый ремонт; $T2$ – холодный плановый ремонт; TO – Техническое обслуживание; $(H)K$ – Капитальный ремонт (вновь возведенная печь); K – Капитальный плановый ремонт; B – выводка печи в рабочий режим; OB – обратная выводка

Проведение холодных ремонтов требует подготовки, которая должна начинаться не менее чем за 4 месяца до остановки печи. Подготовительные работы начинаются за 10 дней до спуска стекломассы. Студка ведется в течении 2–4 суток осторожно по определенному графику для сохранения динасовой кладки свода. В процессе обратной выводки требуется затяжка связей свода. Календарный план ремонтных работ составляется на период с момента обрыва ленты до возобновления действия всей системы после ремонта. Ремонт сводов производится только при холодном либо при капитальном ремонте. Свод ванной печи разбирается по секционно. Длина секции составляет от 4 до 6 м [143]. По окончанию капитальных и холодных ремонтов происходит «выводка» печи в рабочий режим, когда происходит сушка и разогрев печи. Разогрев печи, особенно в первые дни подъема температур до 600 °С связан с расширением огнеупорной кладки и является наиболее ответственным для кладки сводов. В

этот период необходим особо тщательный контроль за состоянием обвязки печи. При этом сроки выводки печи (T_e) составляют 12–14 суток.

Таблица 1.2 – Определение количества межремонтных периодов

№ п/п	Кол-во межремонтных периодов	Количество ремонтов	Вид ремонта
1		$N_K = \frac{T_K}{T_{КОМП}}$	Капитальный ремонт
	$T_{КОМП} – \text{компания печи}$ $T_K – \text{межремонтный период капитального ремонта}$		
2	$N^{T_2} = \frac{T_K}{T_{T_2}}$	$N_{T_2} = \left(\frac{T_K}{T_{T_2}} \right) - N_K$	Холодный ремонт
	$T_{T_2} – \text{межремонтный период текущего второго ремонта}$		
3	$N^{T_1} = \left(\frac{T_K}{T_{T_2}} \right) \left(\frac{T_{T_2}}{T_{T_1}} \right)$	$N_{T_1} = \left(\frac{T_K}{T_{T_2}} \right) \left(\frac{T_{T_2}}{T_{T_1}} \right) - 1$	Горячий ремонт
	$T_{T_1} – \text{межремонтный период текущего первого ремонта}$		
4	$N^{TO} = \left(\frac{T_K}{T_{T_2}} \right) \left(\frac{T_{T_2}}{T_{T_1}} \right) \left(\frac{T_{T_1}}{T_{TO}} \right)$	$N_{TO} = \left(\frac{T_K}{T_{T_2}} \right) \left(\frac{T_{T_2}}{T_{T_1}} \right) \left(\frac{T_{T_1}}{T_{TO}} - 1 \right)$	Технический осмотр
	$T_{TO} – \text{межремонтный период технического осмотра}$		

В плановый холодный ремонт (T2) входят работы по смене всех рядов бассейна, 50 % донных балок, горелок. Замена секций главного свода. При последующем холодном ремонте со сменой всех рядов бассейна, всех донных брусьев могут быть заменены все секции главного свода. В структуру ремонтного цикла входят как горячие, так и холодные плановые ремонты, а также мероприятия по техническим осмотрам. По окончанию плановых холодных ремонтов происходит «выводка» печи. Основная цель этой операции заключается в сохранении физической целостности огнеупорной футеровки при полном закрытии температурных швов в кладке. Поведение огнеупоров, а также состояние теплоизолированных элементов огнеупорной футеровки в процессе нагрева не поддаются визуальному контролю, поэтому организация первичного разогрева печи представляется достаточно сложной технической задачей. Контроль над расширением кладки сводов ведется с помощью линейных указателей. По их показаниям регулируется обвязка свода.

При нагреве свода большему нагреву и напряжениям сжатия подвергается внутренняя поверхность. Во избежание их разрушения и уменьшения напряжений, регулируют поперечные связи главного свода, понемногу отвертывая гайки, но так, чтобы не «упустить» свода, т. е. чтобы свод не потерял своей первоначальной формы и на нем не появились крупные открытые швы снаружи. Несмотря на отпускание связей (тяжей) в общем на 5–6 см, свод все же «растет» и поднимается в замке до 25 см и больше. В практике имеют место случаи потери формы и прочности при выводке после ремонта, остановки производственной линии из-за выпуска неликвидной продукции по причине выпадения отдельных единиц свода в варочный бассейн со стекломассой (рис. 1.24).



Рисунок 1.24 – Дефекты кладки свода регенеративной печи на 100 т/сут., при натурном обследовании после слива стекломассы

Это дорогостоящее и ответственное мероприятие. От качества проведения выводки зависит срок эксплуатации печи и качество выпускаемой продукции. Стоимость выводки иностранными фирмами составляет примерно 120 000–130 000 тыс. евро, русскими от 2 500 000 до 5000 000 млн руб.

При определении убытков от простоя по причине аварий при «выводке» стекловаренных печей, определяющим является время простоя:

$$\Pi_O = \Pi_T + \Pi_P, \quad (1.17.)$$

где Π_T – простой, связанный с технологическими особенностями производства, сут. $\Pi_T = t_o + t_B + t_{h.c.};$

Π_P – простой, по причине ремонта, сут.;

Время продолжительности ремонта:

$$T_{\text{пп}}^{\text{T2}} = \frac{T_{\text{tp}}}{N_p P_{\text{см}} n_{\text{см}} k_{\text{в}}}, \quad (1.18.)$$

где T_{mp} – трудоемкость, чел/ч.;

N_p – число рабочих в одну смену;

$P_{\text{см}}$ – длительность смены, час.;

$n_{\text{см}}$ – сменность работ;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент использования рабочего времени.

Нормами технологического проектирования цехов непрерывного проката предусмотрена продолжительность холодного ремонта 40 суток.

t_O – время технологического простоя, связанного с остановкой печи, (обратная выводка длится 3–4 суток), сут;

t_B – время технологического простоя, связанного с введением печи в рабочий режим после ремонта печи, (выводка в рабочий режим длится 12–14 суток), сут;

$t_{h.c.}$ – время технологического простоя, связанного с наваркой стекломассы в бассейне, (6–7 суток), сут.

Расчетов убытков ведется по формуле:

$$\Sigma Y = \Pi + 3, \quad (1.19.)$$

где ΣY – возможный ущерб;

Π – прибыль, недополученная из-за простоя, которая рассчитывается на основе цены единицы продукции и оценке объема продукции, не выпущенной из-за остановки производства;

3 – дополнительные затраты:

$$3 = t * (\Phi_{3\Pi} * k + 3_{\text{пп}}) \quad (1.20.)$$

где t – время ожидаемого простоя в днях;

$\Phi_{3\Pi}$ – однодневный фонд заработной платы рабочих и служащих, занятых на остановленном участке и на восстановительных работах;

k – понижающий коэффициент учета снижения заработной платы рабочих и служащих во время простоя и при использовании их труда на других участках;

$Z_{\text{пр}}$ – однодневная величина прочих затрат:

$$k = \left(1 - \frac{\Delta}{100}\right) * \left(1 - \frac{y_{\text{зп}}}{100}\right) \quad (1.21.)$$

где Δ – доля производственных рабочих, используемых на других работах во время простоя объекта, %;

$y_{\text{зп}}$ – процент, на который уменьшена зарплата за период простоя.

Затраты на ремонт составляют:

$$\Sigma_P Z = C_m + C_{\text{СМР}} + C^{\text{Выв}} + C^{\text{ПНР}} + P_{\text{общ}} \quad (1.22.)$$

где C_m – стоимость материалов;

$C_{\text{СМР}}$ – стоимость строительно-монтажных работ;

$C^{\text{Выв}}$ – выполнение выводки с их последующей наваркой стекломассой;

$C^{\text{ПНР}}$ – проведения пуско-режимно-наладочных работ до достижения проектной мощности и устойчивого режима их работы со сдачей объекта в промышленную эксплуатацию;

$P_{\text{общ}}$ – общепроизводственные расходы.

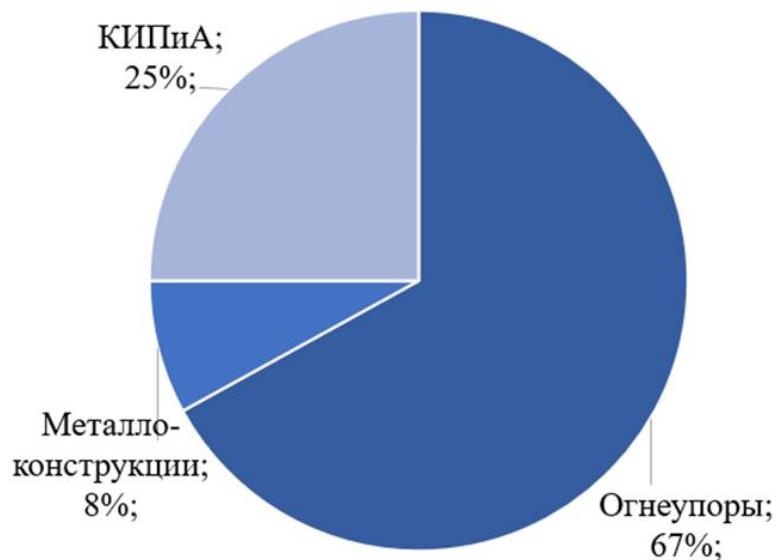


Рисунок 1.25 – Распределение капитальных вложений

Большую часть капитальных вложений, затрачиваемых на сооружение стекловаренной печи (около 67 %), составляет стоимость огнеупорных материалов. Замена огнеупорной кладки представляется длительным и затратным

мероприятием. По приведенным зависимостям можно спрогнозировать возможный ущерб, который может достигать колоссальных размеров. Возможный ущерб может составлять от 5,2 до 7,2 млн руб./сут. (только недовыпущенная продукция). Продление межремонтного периода ванных стекловаренных печей, сокращение количества холодных ремонтов, сокращения их простоя по причине ремонта является важной научно-технической задачей.

1.7. Цели и задачи исследования

На основе результатов критического анализа, представленного в I главе работы, сформулированы:

– **цель исследования** – развитие методики расчета металлических каркасов обвязки ванных стекловаренных печей на основе численных и экспериментальных исследований действительного напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом параметров жизненного цикла с возможностью управления его параметрами.

– **объект исследования** – напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов системы металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей непрерывного действия.

– **предмет исследования** – изменение параметров напряженно-деформированного состояния пространственной системы металлического каркаса стекловаренной печи с учетом этапов жизненного цикла. Поставленная цель исследования достигается путем решения основных *задач исследования*:

1. Выполнить теоретическую оценку существующих методик расчета металлических каркасов обвязки стекловаренных печей.
2. Выполнить теоретическую и экспериментальную оценку влияния технологического процесса этапов жизненного цикла стекловаренной печи на напряженно-деформированное состояние конструкций металлического каркаса.
3. Разработать алгоритм сбора нагрузок на металлический каркас обвязки стекловаренной печи с учетом уточненных параметров нагрузок и воздействий.
4. Оценить влияние податливости узлового соединения подвески главного

свода на напряженно-деформированное состояние боковых колонн металлического каркаса печи.

5. Разработать усовершенствованную методику расчета поперечной рамы металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей с учетом изменения напряженно-деформированного состояния общей системы печи при управлении параметрами за счет податливости соединения подвески свода печи.

На основании сформированной цели и задач исследования на рисунке 1.26 представлена структурно-логическая схема следований.

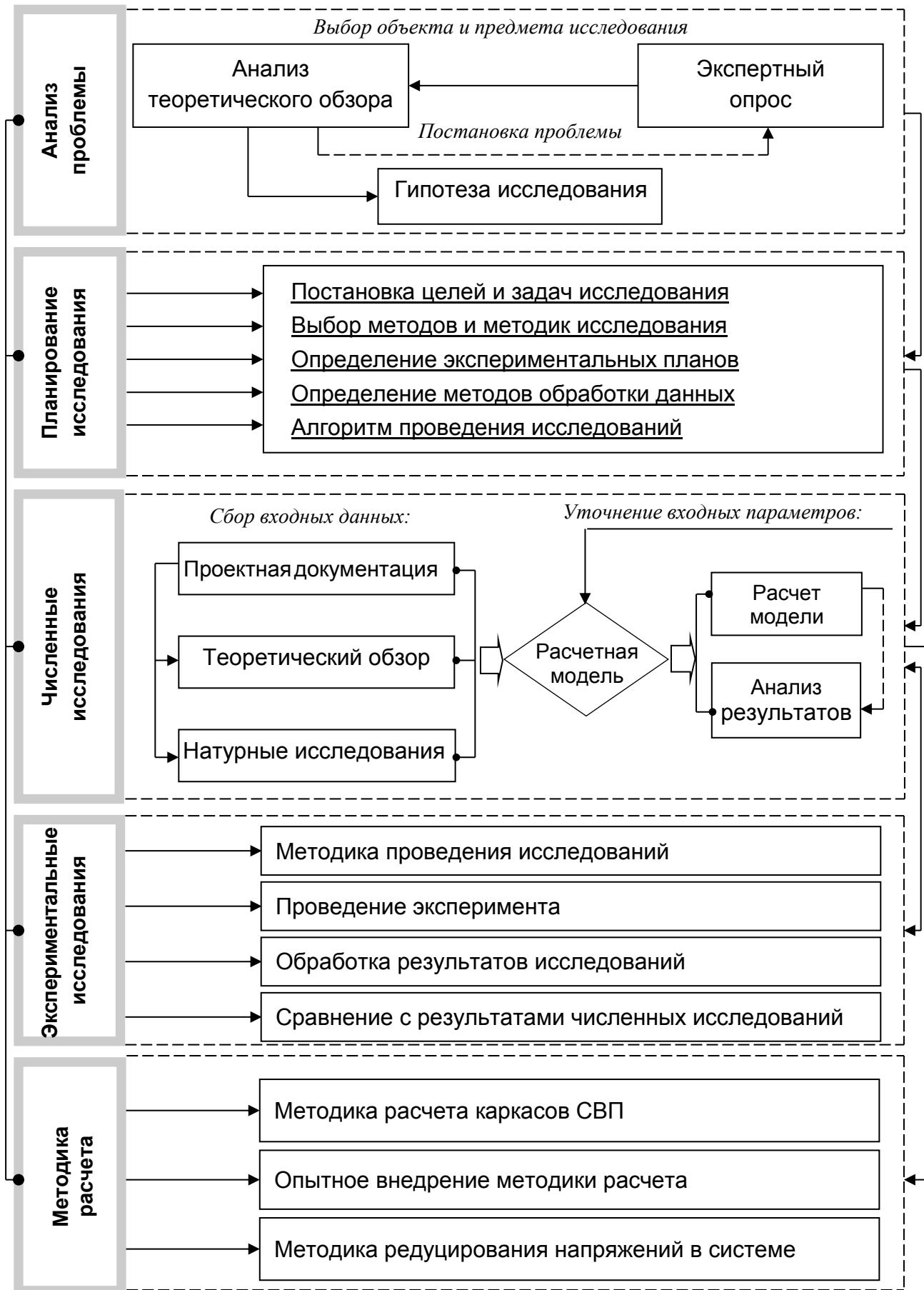


Рисунок 1.26 – Структурно-логическая схема проведения исследований

РАЗДЕЛ II. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПЛАНИРУЕМЫХ МЕТОДОВ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Обоснование использования метода конечных элементов при анализе напряженно-деформированного состояния каркаса обвязки ванных стекловаренных печей

Для численного исследования была выбрана печь на примере Константиновского стекольного завода, за которой осуществлялся контроль строительства. Стекловаренная печь крупногабаритная непрерывного действия с размерами в плане $16,0 \times 8,3$ м, регенеративная с поперечным направлением пламени рассчитана на 5 пар горелок со съемом стекломассы 200 т/сутки. На основе натурных исследований объекта получено реальное конструктивное решение системы обвязки данной печи.



Рисунок 2.1 – Крупногабаритная печь непрерывного действия (200 т/сут.)

Описание конструктивного решения. Каркас печи представляет собой пространственную систему, состоящую из комплекса металлических элементов

(колонн, балок и прокатных листов), соединенных между собой при помощи сварки, болтовых соединений и тяжами из круглой стали. Дно печи представляет собой балочную клетку. На бетонные (кирпичные) опоры уложены двутавровые балки (I40Б1) как в продольном, так и в поперечном (I30Б1) направлениях. На них уложен металлический лист $t = 6$ мм. Вертикальные колонны (в данном случае это 6 боковых и 4 торцевых колонны) выполнены из прокатного профиля 120БС1, связанными тяжами (связями) сверху из круглой стали $\varnothing 40$ мм. Распор свода печи воспринимается колоннами через опорный уголок.

Практически всегда перед проектировщиками встает проблема выбора расчетной схемы конструкции. Достаточно точную оценку напряжений в каркасе можно получить с помощью МКЭ. Данный метод применим на стадии предварительного расчета или при первоначальных теоретических исследованиях новых типов конструкций, но и требует экспериментального подтверждения.

Определение расчетной схемы печи. Рассмотрим моделирование и расчет каркаса печи с использованием программы SCAD Office, реализованной в среде Windows при упругой работе материала.

Для получения наиболее точных усилий в элементах каркаса принята пространственная схема. Построение расчетной схемы осуществлено с помощью алгоритмов комплекса SCAD Office. Среди особенностей расчетной схемы, помимо прочих, можно выделить следующие принятые допущения:

- все задачи решались без учета нелинейности;
- при расчете не учитывалась анизотропность футеровочной кладки;
- не учитывалась релаксация кирпичной кладки, то есть перераспределение напряжений в ней в результате ползучести и других физико-механических процессов;
- не учитывались температурные швы между слоями футеровочной кладки, деформационные швы секций свода;
- не учитывались также эксплуатационные составляющие, как подкрутка (роспуск) тяжей при термическом расширении свода печи в период ее запуска.

К прочим можно отнести все упрощения присущие МКЭ и алгоритмам программы SCAD, являющимися одинаковыми для любой подобной задачи. В расчетной схеме применены следующие типовые элементы: стержни (5 – пространственный стержень с шестью степенями свободы), оболочки (42,44 – с шестью степенями свободы) – согласно наименованиям, принятым в ПК SCAD.

Фактически, расчетной схемой каркаса печи является пространственная рама с жестким креплением колонн с днищем и стянуты тяжами поверху. Для такой рамы характерно появления трех силовых факторов: изгибающих моментов M , поперечных сил Q и продольных осевых усилий N в стержнях.

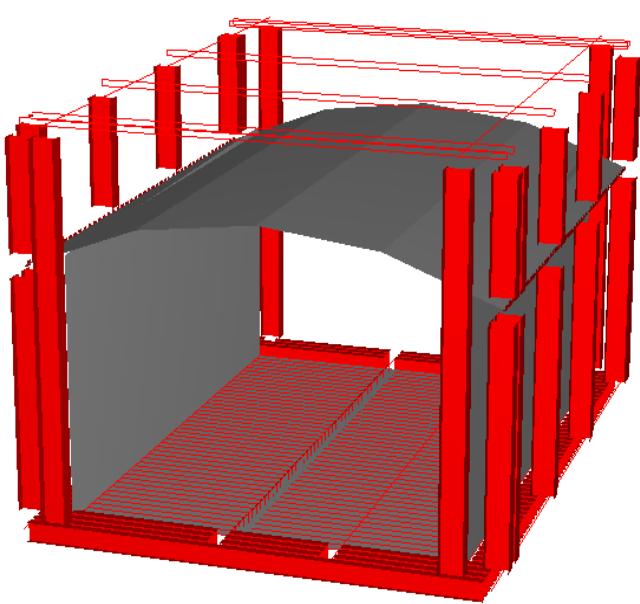


Рисунок 2.2 – Пространственная схема стекловаренной печи

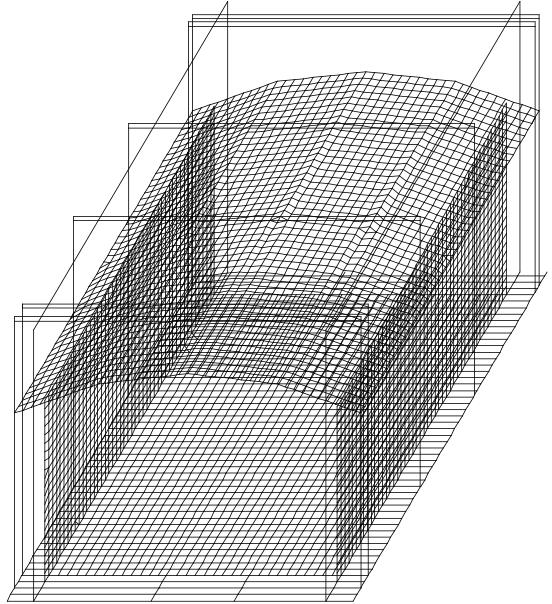


Рисунок 2.3 – Расчетная модель стекловаренной печи

Исходя из этого, определение расчетных усилий для модели каркаса производилось в два этапа. На первом этапе производился статический расчет рамы со стандартными нагрузками, от собственного веса и веса стекломассы. Целью данного расчета является выявление внутренних силовых факторов. Расчеты показали, что поперечная сила Q в элементах узлов – незначительна, а основными являются изгибающий момент M и продольная сила N .

Конструктивные решения печи. Конструкция днища в расчетной схеме представлена системой металлических балок различных сечений, поэтажно

уложенных друг на друга, опертых на бетонные/кирпичные столбики и укрытые металлическим листом $\delta = 6$ мм, сверху на который уложена огнеупорная кладка из динаса. Совместная работа металлического листа и футеровочного кирпича учтена как приведенное сечение (стальной лист – огнеупорная кладка).

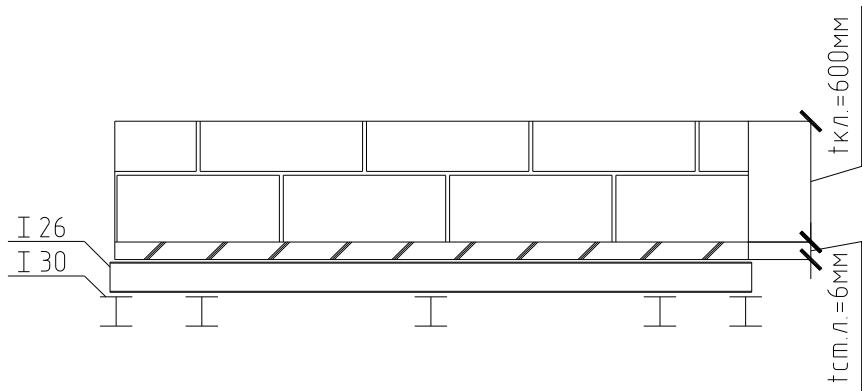


Рисунок 2.4 – Конструкция пода печи

Оптимальная толщина пода в расчетной схеме:

$$t_{\text{экв.}}^{\text{ст.л.}} = t_{\text{ст.}} + \alpha \cdot t_{\text{кладки}},$$

где $t_{\text{ст.}}$ и $t_{\text{кладки}}$ – толщины стали и кладки соответственно.

Для этого находим коэффициент α :

$$\alpha = \frac{E_{\text{кладки}}}{E_{\text{стали}}},$$

где $E_{\text{кладки}}$ – модуль упругости кладки.

Толщина пода в расчетной схеме принята 28,7 мм.

Толщина стенок печи переменная по высоте. Кладка на уровне от дна до 1,9 м имеет толщину 600 мм, выше до свода (1,775 м) – 400 мм. Толщина свода 600 мм.

Сбор нагрузки на конструкцию стекловаренной печи

Нагрузкой на под печи и в целом на каркас является давление огнеупоров и стекломассы. Поэтому сформированы такие загружения, как постоянное – собственный вес металлоконструкций и огнеупоров, а также переменное длительно действующее – давление стекломассы и температурную нагрузку.

Постоянная нагрузка (собственный вес)

Расчетная площадь приложения нагрузки, касающаяся металлической части пода: $S = 79,25 \text{ м}^2$.

- а) вес листа $\delta = 6 \text{ мм}$ и площадью 1 кв. м равен 50 кг;
- б) продольные балки прокатного сечения I40Б1 масса 1 м $m = 48,1 \text{ кг}$;
- в) поперечные балки уложены через 0,2 м прокатного сечения I30Б1 масса 1 м $m = 32,9 \text{ кг}$;
- г) собственный вес вертикальных стоек. Приняты стойки прокатного профиля I40Ш1 масса 1 м $m = 124 \text{ кг}$. Длина одной стойки $l = 6,14 \text{ м}$;

Расчетная площадь приложения нагрузки, касающаяся части каркаса печи:

$$S = 8.8 \cdot 6.48 = 57.02 \text{ м}^2.$$

- д) собственный вес кладки дна, толщиной 600мм, дно выложено динасом $(\rho = 2,38 \frac{\text{г}}{\text{см}^2} = 23,3 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3})$;
- е) постоянная нагрузка от кладки стен;
- ж) масса свода.

Площадь поперечного сечения:

$$S_{non.c.} = l_{cв.non.c.} \cdot t = 8.1 \cdot 0.6 = 4.86 \text{ м}^2$$

$$V_{cвода} = S_{non.c.} \cdot l_{дл.cв.} = 4.86 \cdot 8.85 = 43 \text{ м}^3.$$

$$m_{cвода} = 43 \cdot 23,3 = 1002 \text{ кН}$$

Отображение приложения нагрузки от собственного веса (рис. 2.5).

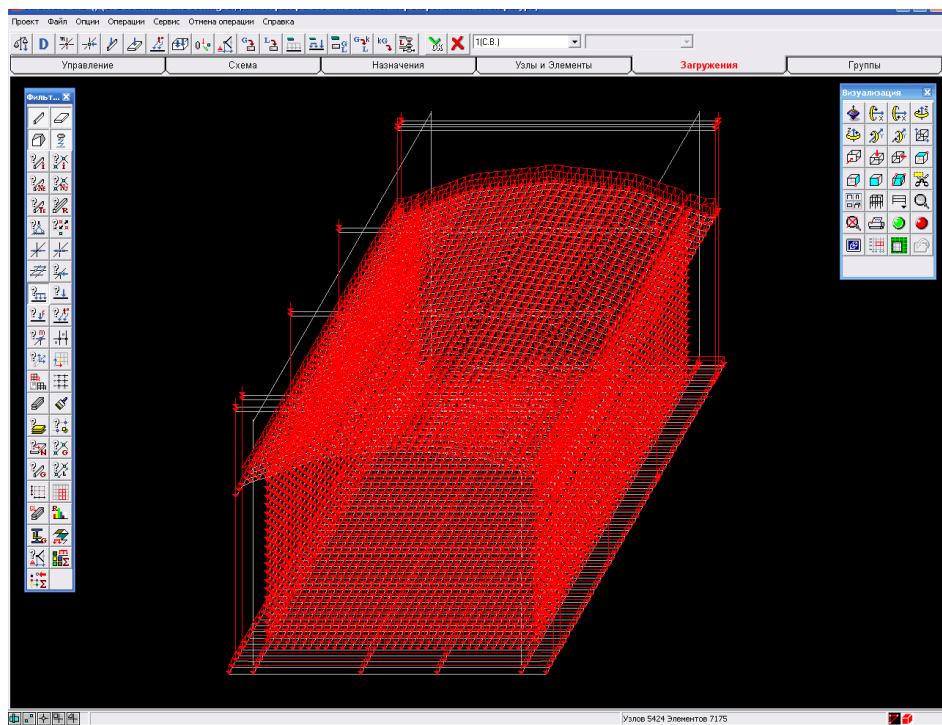


Рисунок 2.5 – Распределение собственного веса в расчетной модели

Длительно действующая нагрузка (вес стекломассы)

Следовательно, вес стекломассы:

$$g_{стекл.} = 2,5 \cdot 1,26 = 3,15 \frac{m}{m^2} (30,9 \frac{\kappa H}{m^2})$$

$$g_{стекл.}^p = g_{стекл.} \cdot 1,2 = 3,15 \cdot 1,2 = 3,78 \frac{m}{m^2} (37,08 \frac{\kappa H}{m^2})$$

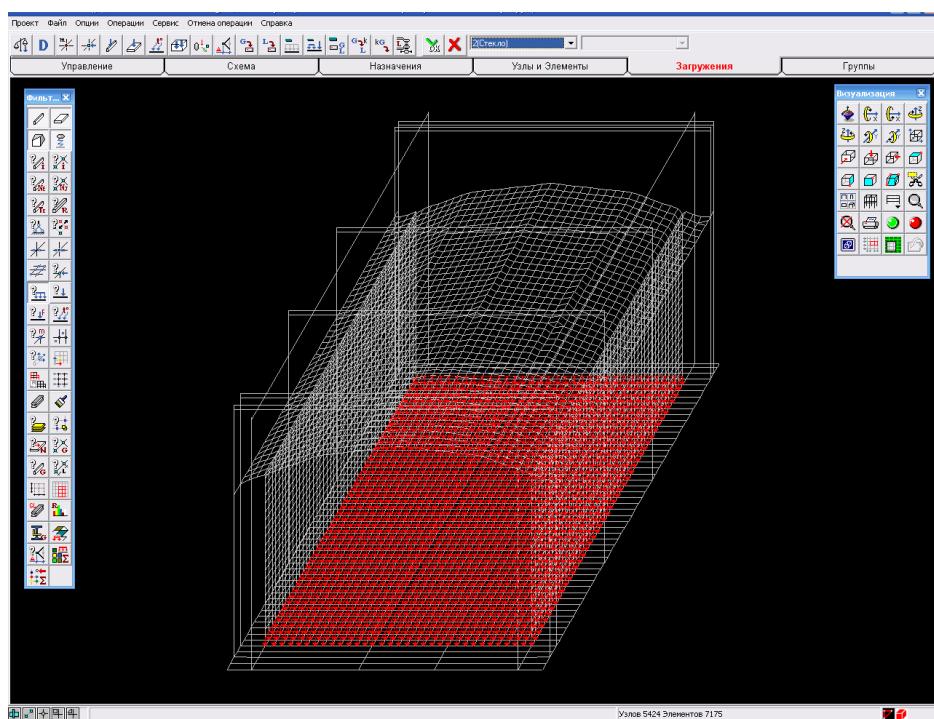


Рисунок 2.6 – Распределение веса стекломассы по дну печи

Длительно действующая нагрузка (действие высоких температур)

Специфика приложения этой нагрузки, как уже было сказано выше в анализе действия и распространения температур в стекловаренной печи, заключается в ее неравномерном действии по длине печи. В расчетной схеме будем принимать температуру наиболее высокую в варочной части печи $1\ 590\ ^\circ\text{C}$, в зоне загрузочного кармана $1\ 450$ и $1\ 350\ ^\circ\text{C}$ – в выработочной части. Также, говоря о специфике расчета по температуре, нужно учесть тот факт, что в стекловаренной печи непосредственный контакт металлического каркаса и футеровки существует только лишь в зоне опирания свода через уголок к колонне. Исходя из этого в расчетной схеме приложенная температурная нагрузка будет оказывать влияние на усилия в каркасе только через эту зону. Температурную нагрузку можно приложить двумя способами:

- как градиент температур на всю толщину свода;
- как усилие от расширения кладки при средней температуре, действующей на свод.

1. Зная максимальную температуру внутри печи, толщину и площадь свода, коэффициент теплопроводности динаса, определяем по термическое сопротивление кладки: $R = S/\lambda$, где S – площадь свода, λ – коэффициент теплопроводности. Потеря тепла через кладку свода и температуру наружной поверхности свода: $t_{\text{нар}} = 70\ ^\circ\text{C}$. Коэффициент линейного расширения динаса $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5}\ ^\circ\text{C}$. Получаем разность температур свода:

- $\Delta t = 1590 - 70 = 1520\ ^\circ\text{C}$ – в зоне варки;
- $\Delta t = 1450 - 70 = 1380\ ^\circ\text{C}$ – в зоне загрузочного кармана;
- $\Delta t = 1350 - 70 = 1280\ ^\circ\text{C}$ – в выработочной зоне.

Температура днища принята $80\ ^\circ\text{C}$ – в зоне варки и $50\ ^\circ\text{C}$ – в зоне загрузки и выработки. Данные значения получены на основе теоретических исследований.

2. Дополнительные усилия от распора свода при действии температуры, равной среднему значению внутренней и наружной температур: $t = (1\ 590 + 70)/2 = 830\ ^\circ\text{C}$. Удлинение от термического расширения: $\Delta l = \alpha_{cp} \cdot t \cdot l_{\text{свода}}$,

где α_{cp} - средний коэффициент термического расширения материала при нагреве в интервале температур от 0 до t , $^{\circ}\text{C}$, $1/\text{ }^{\circ}\text{C}$; t - принятая температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$. Тогда $\Delta l = 11,5 \cdot 10^{-5} \cdot 830 \cdot 8,1 = 77,3$ мм. На каждую сторону свода будет приходиться: $\Delta l_1 = \Delta l/2 = 38,65$ мм.

Второй способ не очень корректен и трудоемок, поэтому в расчетной схеме принято учитывать температуру распределенной.

Нагрузки заносим в проектно-вычислительный комплекс SCAD. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, проверку несущей способности стальных конструкций.

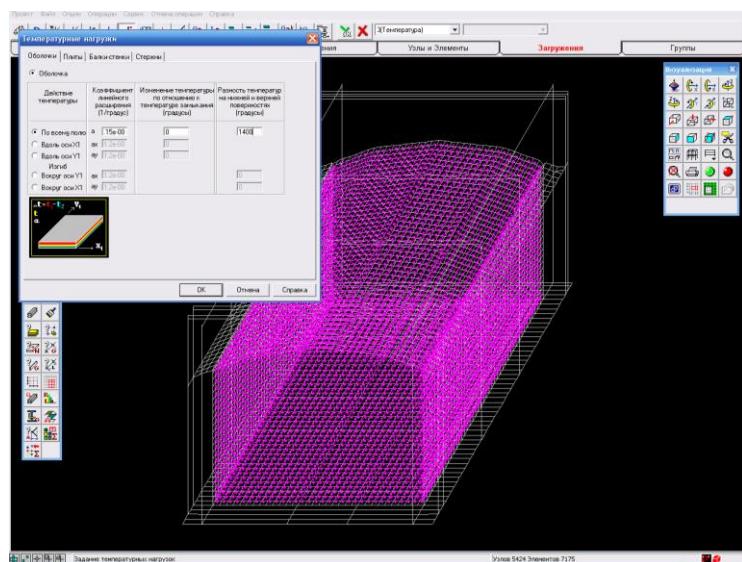


Рисунок 2.7 – Приложение температурной нагрузки

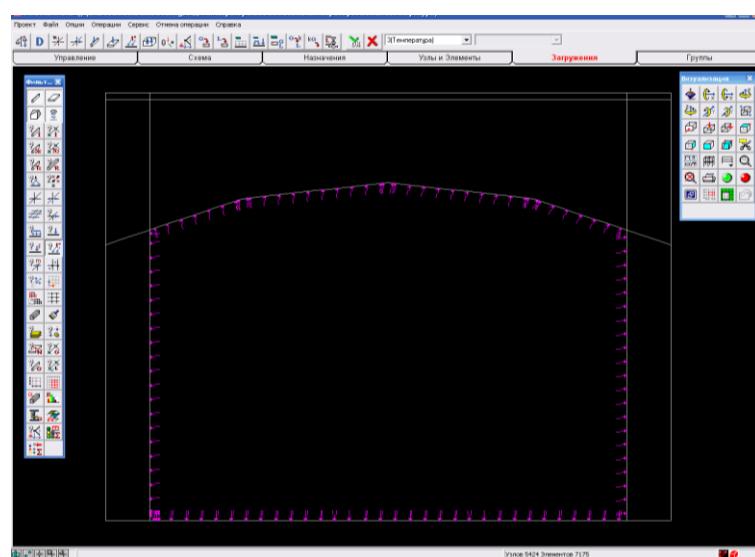


Рисунок 2.8 – Направление действия температуры

Определение усилий в элементах конструкций

Расчет конструкций каркаса печи выполнен с помощью программного комплекса «SCAD». В программном комплексе предусмотрено автоматизированное формирование расчетных сочетаний усилий (РСУ), соответствующее нормативным документам, действующим в проектировании объектов строительства.

Для стержневых элементов задача выбора РСУ сводится к нахождению экстремальных значений нормальных и касательных напряжений, вычисленных в характерных точках сечения. Поэтому и критериями здесь являются экстремальные напряжения в этих точках сечения.

Расчеты выполнены по трем загружениям:

- загружение I – собственный вес;
- загружение II – вес стекломассы;
- загружение III – температурная нагрузка

Для более наглядного получения информации об усилиях и напряжениях в металлическом каркасе из программного комплекса, все элементы каркаса были разделены на группы с извлечением выборки усилий и напряжений в каждой из них. Исходя из полученных в расчетной программе усилий, производился подбор оптимальных сечений элементов каркаса.

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики сечений элементов каркаса обвязки ванной стекловаренной печи (200 т/сут.)

№ п/п	Наименование элементов	По натурным замерам	Расчетные сечения
1.	Продольные балки днища	I40Б1	I40Б1
2.	Поперечные балки днища	I30Б1	I30Б1
3.	Поперечные тяжи	2Ø40	2Ø28
4.	Колонны	2I20БС1	I50Ш1

Расчет предложенной пространственной расчетной модели металлического каркаса стекловаренной печи с постоянными нагрузками (от собственного веса) и длительно действующими (вес стекломассы и температура) показал доминирующее действие температуры в общих усилиях в элементах металлического каркаса.

В сочетании с постоянными температурной нагрузка в 4–5 раз увеличивает возникающие усилия. Исходя из этого, полученные в результате расчета сечения колонн, балок и тяжей незначительно отличаются от принятых в строительстве. На результаты расчета повлияли некоторые допущения, принятые в модели, к которым можно отнести:

- неучет релаксации футеровочной кладки, то есть перераспределения напряжений в ней в результате ползучести и других физико-механических процессов;
- неучет компенсирующих кладочных швов;
- неучет технологических особенностей эксплуатации (подкрутка тяжей при росте свода) и все упрощения, которые требует МКЭ расчет.

Хотя предложенная расчетная схема и предполагает принципиальные решения конструктива каркаса печи, по данному алгоритму расчета можно принять различный частный случай обвязки.

Для создания адекватной модели, максимально приближенной к реальной конструкции необходимо:

- провести комплекс экспериментальных исследований, с целью изучения технологических особенностей эксплуатации объекта печи;
- включить в модель общую конструкцию печи верхнего и нижнего строения с учетом совместной работы металлического каркаса и огнеупорной футеровки печи;
- учет линейного расширения огнеупорной кладки;
- ввести в расчетную модель корректное проектирование тяжа с включением механизма в соответствии с температурными площадками.

2.2. Особенности моделирования технологического процесса в расчетной модели

На основании проведенного анализа особенностей эксплуатации печи составлена матрица формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи (рис. 2.9).

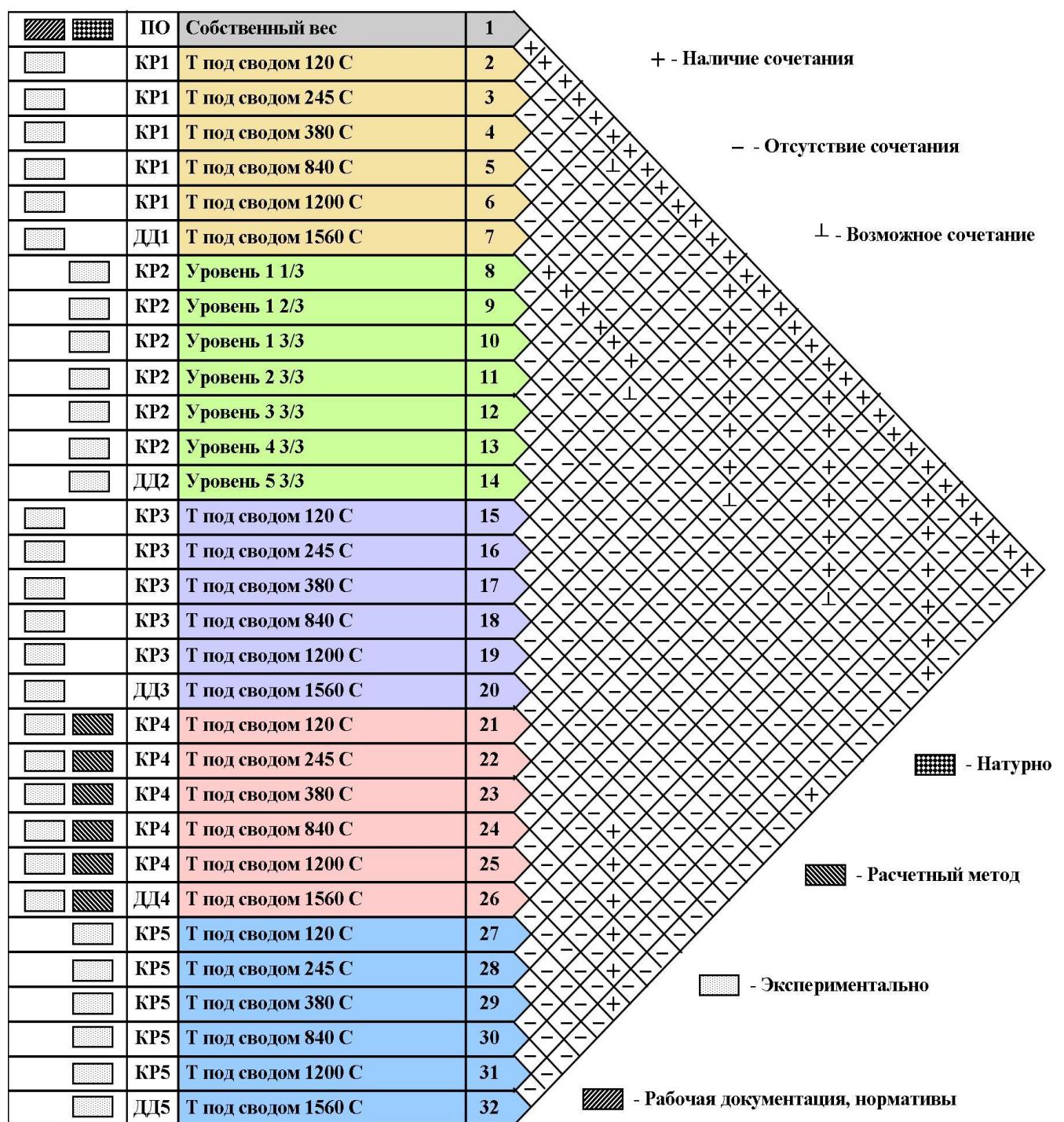


Рисунок 2.9 – Матрица формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи

Постепенно к собственному весу (1) суммируется температурная нагрузка на свод печи (отдельно по секционно) (2–7). По достижению 1 540 $^{\circ}\text{C}$ на контрольной термопаре добавляется нагрузка от стекломассы (8–14). Таким образом 1+7+8, 1+7+9, 1+7+..... 15–20 – температурные нагрузки на остальные конструктивные элементы футеровки печи. 21–26 – температурная нагрузка на элементы металлического каркаса обвязки (колонны каркаса, тяжи, лафет, продольные и поперечные балки свода, металлическая система днища). 27–32 – регулирование свода роспуском тяжей. Итак, при температуре в печи 380 $^{\circ}\text{C}$ – 1+17+23+29, гидростатическое давление стекломассы в этом случае отсутствует, т.к. ее подача начинается с температуры в камере печи 1 560 $^{\circ}\text{C}$.

Температурные нагрузки до 1 560 $^{\circ}\text{C}$ считаются кратковременными (КР1, КР3, КР4), длительно действующими при установившихся 1 560 $^{\circ}\text{C}$ считаются нагрузки (ДД1, ДД3, ДД4), (ДД2) и затяжка тяжей свода (ДД5).

Всего матрица насчитывает 66 сочетаний из них – 4 маловероятных, связанных с технологией «выводки» при наполненном стекломассой бассейне.

Определение температуры футеровки. Расчет теплопередачи стенки печи при нестационарном режиме

Нестационарным процессом можно считать тепловые процессы связанные с началом процесса «выводки» печи в рабочее состояние. При выводке происходят физико-химические превращения в огнеупорном материале кладки, необходимые для нормальной его эксплуатации.

Максимальное линейное удлинение присуще динасу, составляющему свод печи. Распор динасового свода – максимальное дополнительное усилие от линейного расширения огнеупора кладки, требующее особого внимания при учете в расчетной модели. За точки температурного контроля приняты наиболее ответственные моменты при запуске печи для динасового свода. В таблице 2.2. представлены ответственные моменты при вводе печи в эксплуатацию при становлении температурного режима.

Таблица 2.2 – Стационарные площадки графика подъема заданного температурного режима

№ площадки	Температура выдержки, °С	Скорость подъема, °С/ч	Время выдержки, ч
1	2	3	4
1	30–95	2,6	–
2	95–120	5	48 ч при 120
3	120–245	3,2	8 при 245
4	245–380	4,4	9 при 380
5	380–600	5	–
6	600–840	9	6 при 840
7	840–1 200	10	10 при 1 200
8	1 200–1 540	12	–

Температуры приняты после выдержки (по установлению заданной температуры выдержки). Для определения потери тепла через 1 м² многослойной стены печи толщиной δ_1 и δ_2 при температуре нагрева стекломассы t_{cm} температуру внутренней поверхности кладки t_{bh} принимают как $t_{cm} + 5\%$, или на 80–50 °С ниже температуры газов в печи или по расчету.

Температуру внутренней поверхности t_{bh} стен и свода варочной зоны принимают на 50 °С выше температуры нагрева стекломассы, а в конце печи на 100 °С ниже температуры отходящих газов.

Уровень расплава стекломассы в бассейне печи принимаются по журналу «Контроль наполнения стекломассой печи», при соответствующей температуре. За температуру в печи принимаются показатели по основной термопаре. Подразумевается, что выводка печи в рабочий режим осуществляется по методу «насухо», т. е. без загрузки шихты. Температуру внутренней поверхности t_{bh} стен принимаем равной температуре внутрипечной среды по контрольной термопаре. При $T = 1 540$ °С, когда произведена наварка стекломассы в полном объеме, t_{bh}^I принимаем на 50 °С выше температуры нагрева стекломассы (в варочной части). И на 100 °С ниже температуры отходящих газов. Температура в плоскости соприкосновения t_2 слоя слоев δ_1 и δ_2 определяется исходя из того, что при

стационарном потоке количество тепла, проходящего через слой δ_1 , равно количеству тепла, проходящего через слой δ_2 : $t_2 = t_{\text{ен}} - q(S_{\sigma l}/\lambda_l)$. Теплопроводность кладки с учетом газопроницаемости швов принимаем на 20 % больше теплопроводности материала кладки. В связи с этим для получения теплопроводности кладки коэффициенты теплопроводности материалов умножаются на 1,2.

Расчет теплопередачи слоев футеровки печи осуществлялся при помощи программы Heat Transmission (расчет тепловых потерь через плоскую многослойную стенку) 1.02. Программа предназначена для расчета тепловых потерь через заграждения печей и других агрегатов и используется при проектировании печей для подбора наиболее рациональной конструкции огнеупорной кладки. Программа рассчитывает тепловые потери при условии естественного охлаждения внешней стенки. При расчете учитывается зависимость теплопроводности материала слоев от температуры (коэффициенты полинома хранятся в базе данных). Материалы в базе данных разделены на категории. Результатом расчета являются величина тепловых потерь в Ваттах, плотность теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и температуры на границах слоев.

Постановка задачи расчета тепловых потерь

При проектировании печи производится расчет тепловых потерь через стенки, свод и под печи. Результаты расчета тепловых потерь являются входными параметрами расчета теплового баланса.

Задача расчета потерь теплоты через плоскую многослойную стенку состоит в следующем. Для каждого слоя известны толщина и функция зависимости коэффициента теплопроводности материала от температуры. Также известны температура окружающей среды, степень черноты внешней поверхности, температура в рабочем пространстве печи, коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности стенки к печным газам и общая площадь поверхности стенки. Требуется построить температурное поле в стенке и найти величину тепловых потерь в единицу времени.

Таблица 2.3 – Входные данные для расчета тепловых потерь

№ п/п	Входные данные	Значение
1	2	3
1	Положение поверхности	свод, стенка, под печи
2	Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	20
3	Температура внутрипечной среды, $^{\circ}\text{C}$	120, 245, 380, 840, 1 200, 1 540
4	Степень черноты поверхности, ε	
	– для динаса	0,80–0,85
	– для шамота и бакора	0,75
	– для остальных изделий	0,9

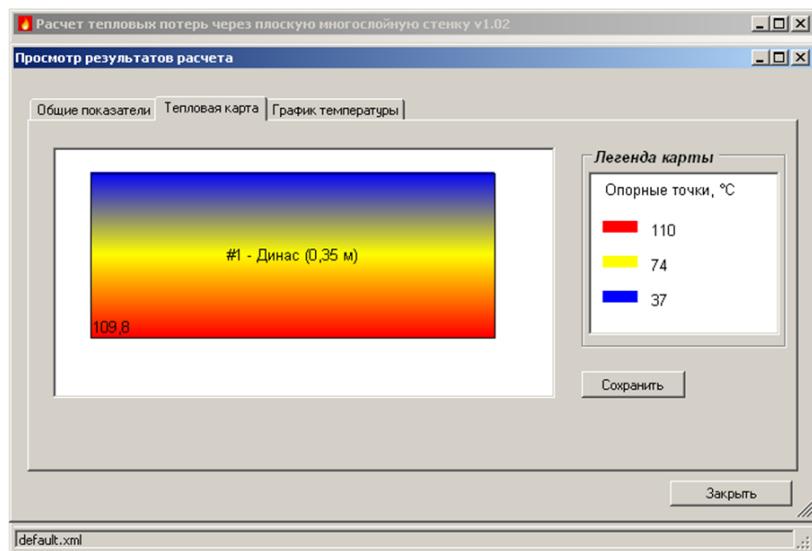


Рисунок 2.10 – Термовая карта слоя футеровки свода

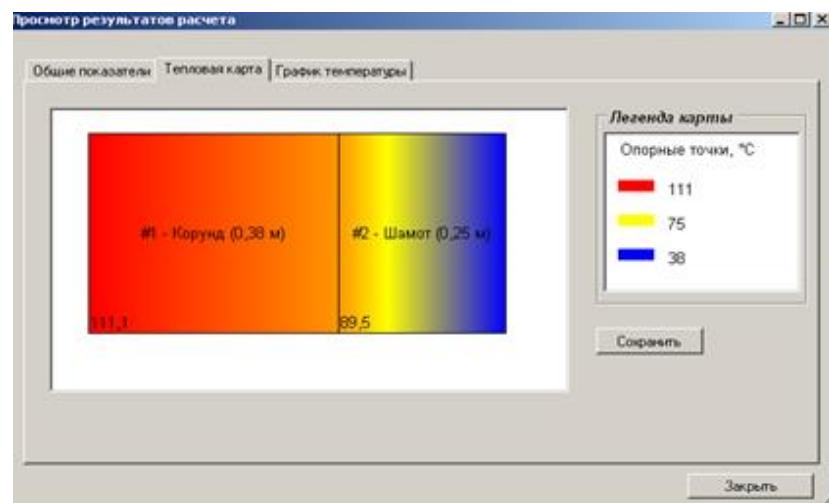


Рисунок 2.11 – Термовая карта слоя футеровки стенки бассейна

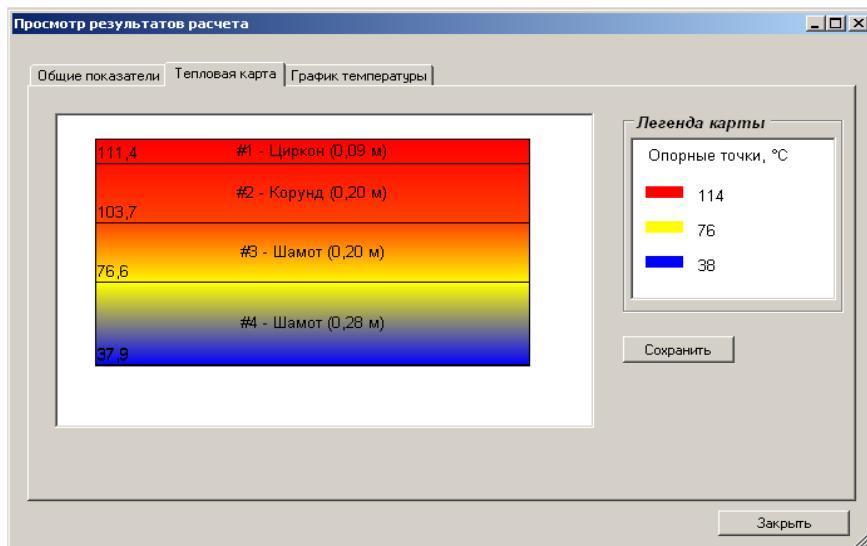


Рисунок 2.12 – Термовизионная карта пода при пустом бассейне

Таблица 2.4 – Расчетные данные по температурам поверхности футеровочной части

T выдержки, °C	Показатель	Конструктивная часть печи			
		Свод	Стенка бассейна	стенки пламенного пространства	Под
120	T ₁	110	111	111	114
	T ₂	37	38	39	38
245	T ₁	221	224	224	231
	T ₂	56	57	58	57
380	T ₁	339	346	345	357
	T ₂	74	76	77	75
840	T ₁	734	758	757	782
	T ₂	133	129	130	130
1200	T ₁	1 035	1 079	1076	1 113
	T ₂	175	163	166	167
1540	T ₁	1312	1 380	1376	1421
	T ₂	213	193	196	199

В таблице T₁ и T₂ – температуры внешней поверхности и внутренней соответственно.

2.3. План и методика проведения натурных экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металлического каркаса обвязки ванной стекловаренной печи

Выполнение экспериментальных исследований необходимы для оценки влияния факторов, связанных с технологическим процессом введения печи в эксплуатацию. Достоинством комплексного натурного эксперимента является получение количественных показателей измеряемых величин в реальном времени в соответствии с технологическими режимами работы печи.

В качестве модели выбрана натурная конструкция ванной стекловаренной печи с подковообразным направлением топливного факела. Размеры печи в плане составляют $17,78 \times 8,2$ м, с высотой варочного отсека 1,5 м. Печь имеет отдельную подвеску свода и стен газопламенного пространства. Действие распора свода от расширения огнеупорной кладки воспринимается тяжами, установленными на колоннах каждой плоской рамы каркаса обвязки, верхнее и нижнее защемление колонн жесткое. Конструкция каркаса в варочной части насчитывает 9 плоских поперечных рам и 2 пары продольных рам с гибкой регулировкой у торцевых стен.

Футеровка верхнего строения печи выполнена из огнеупорного материала с поперечными деформационными швами для релаксации кладки во время становления температурного режима.

Нижнее строение печи состоит из конструкции днища печи, образованное балочной системой [3, 4] и несущих опорных колонн круглого сечения.

В таблице 2.5 приведена характеристика применяемых материалов натурного объекта стекловаренной печи.

В основу исследуемой модели положено сечение колонны (боковой стойки поперечной рамы), как наиболее напряженного элемента конструкции (как внецентренно-сжатого элемента, воспринимающего возникающие усилия от распора свода).

Таблица 2.5 – Характеристика применяемых конструктивов и материалов стекловаренной печи

№ п/п	Конструктивы стекловаренной печи	Характеристика	
1	2	3	
1	Колонны днища	Труба прямошовная Ø273	
2	Связи	Швеллер с параллельными гранями полок 10п	
3	Прогоны	Спаренный двутавр 30	
4	Балки настила днища	Двутавр 26	
5	Колонны обвязки печи	Спаренный двутавр 30	
6	Тяжи	Круг стальной Ø30	
7	Ригели обвязки печи	Двутавр 26	
8	Футеровка печи (шамот)	E	1.80E+0.6
		V	0.2
		R_0 , (т/м ³)	1.93
9	Футеровка варочной части печи (бакор)	E	1.80E+0.6
		V	0.2
		R_0 , (т/м ³)	3.3

На рисунке 2.13, 2.14 представлен план и поперечный разрезы исследуемой стекловаренной печи.

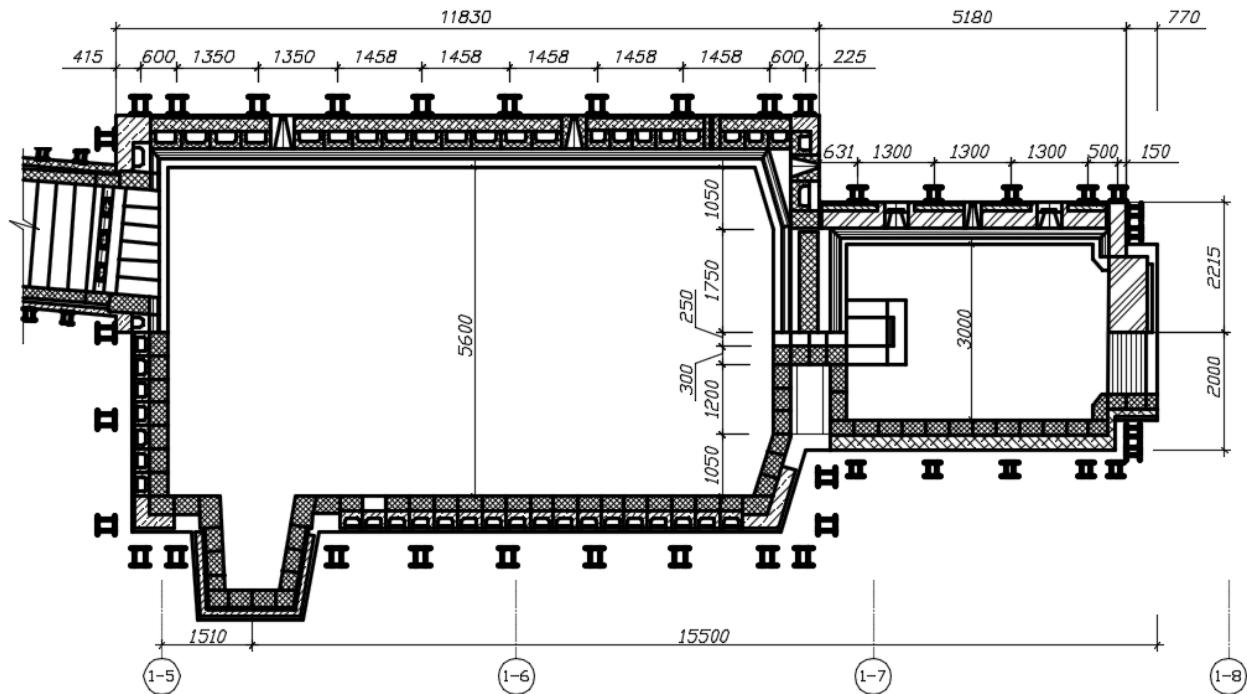


Рисунок 2.13 – План исследуемой стекловаренной печи

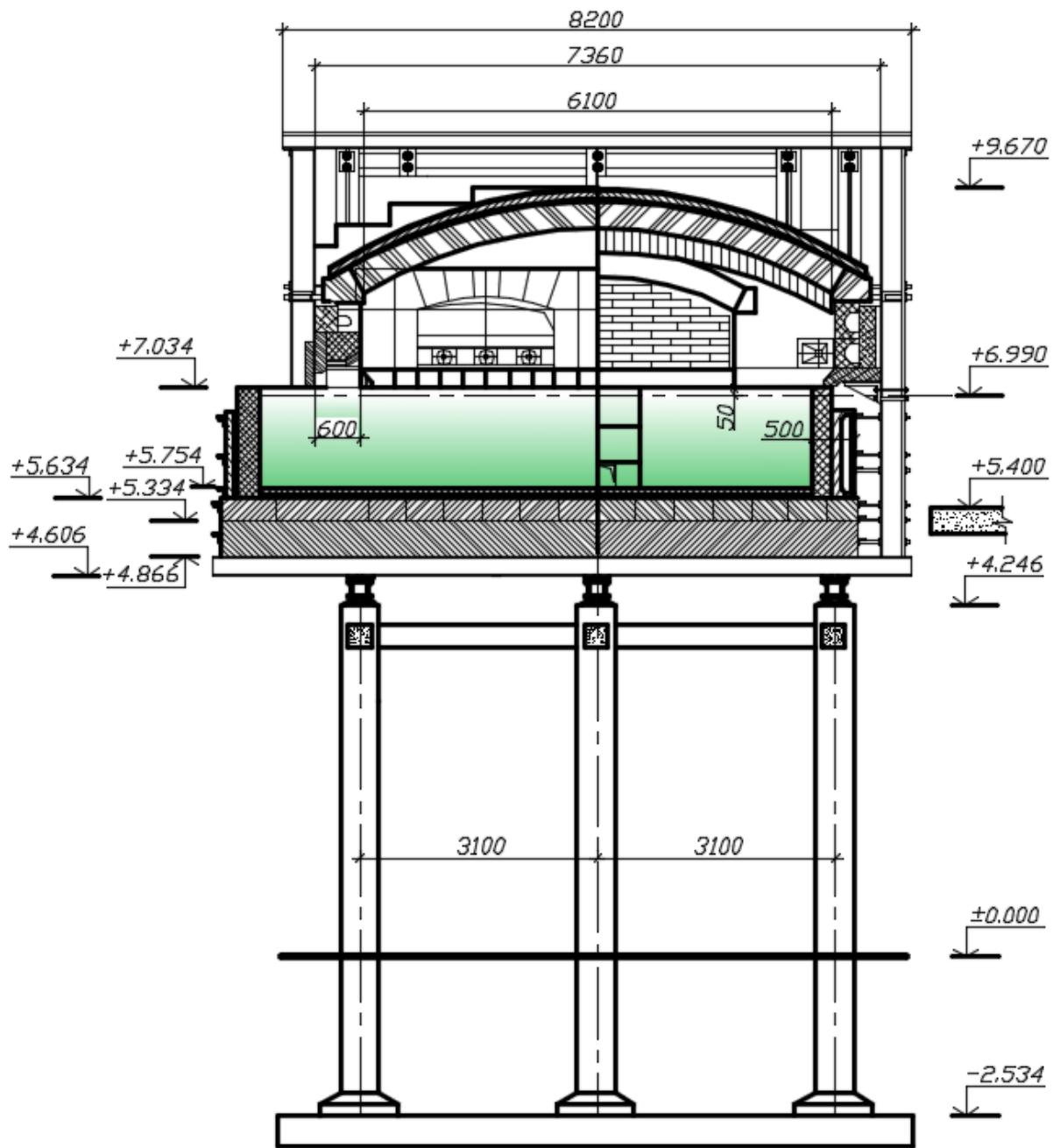


Рисунок 2.14 – Поперечный разрез исследуемой стекловаренной печи

Подбор необходимой аппаратуры осуществляется на основании возможности его применения в условиях проведения исследований на реальном объекте действующего цеха с учетом влияния повышенных температур.

Напряжения в системе определяются тензометрическим методом с помощью системы измерительной тензометрической на 100 каналов измерения. Для измерения деформаций использовались проволочные петлевые тензодатчики сопротивления с базой 20 мм на бумажной основе (модели ПКБ с электрическим

сопротивлением $R = 200,1 \pm 0,3$ Ом). Для наклейки тензодатчиков использовался термостойкий клей «Denex» с рабочим диапазоном температур до 204°C и коэффициентом линейного удлинения 1 %. Для проверки тензочувствительности и цены деления датчиков выполнена их контрольная тарировка на эталонной консольной балке. Средняя цена деления датчиков составила $C = 0,342$ МПа или $C = 3,42$ кгс/см².

Влияние температуры на показания датчиков

Изменение относительного сопротивления тензорезистора в эксперименте зависит от двух факторов: уровня измеряемой деформации и величины изменения температуры в месте установки датчика. Изменение температуры тензорезистора в месте его установки зависит как от колебаний температуры окружающей среды в процессе измерений, вызванных технологическим режимом стекловаренных печей, так и от саморазогрева датчика, вызываемого проходящим через него электрическим током. Так как влияние температуры является нежелательным фактором, следует максимально сократить его влияние на точность показаний.

Ограничение саморазогрева датчика

Разогрев датчика определяется количеством тепла, выделяемого на решетке током, и условиями охлаждения. В свою очередь, условия охлаждения зависят от размеров детали и ее теплопроводности, площади поверхности, занимаемой нитями решетки, отношения поверхности решетки к ее объему, толщины клеевого слоя и его теплопроводности, температуры окружающей среды и скорости движения потоков воздуха, «омывающего» деталь в месте размещения тензорезистора, и ряда других факторов

Способность датчика рассеивать тепловую энергию оценивается таким показателем, как удельная мощность рассеивания:

$$W = P/F,$$

где P – электрическая мощность, рассеиваемая датчиком;

F – площадь поверхности его тензорешетки.

Допустимая величина W определяет величину допустимого тока через тензорезистор. Удельная мощность рассеивания в первую очередь зависит от толщины детали и теплопроводности ее материала. Деталь выступает в роли теплового резервуара (радиатора).

Допустимая удельная мощность рассеивания для металла ветвей колонны лежит в пределах от 0,003 до 0,008 Вт/мм².

При изменении температуры датчика и конструкции наблюдаются следующие механизмы, способные влиять на результаты измерений:

– Изменение коэффициента тензочувствительности S материала тензорешетки. Для сплава константан эта зависимость представляет собой линейную функцию, показанную на графике зависимости (рис. 2.15).

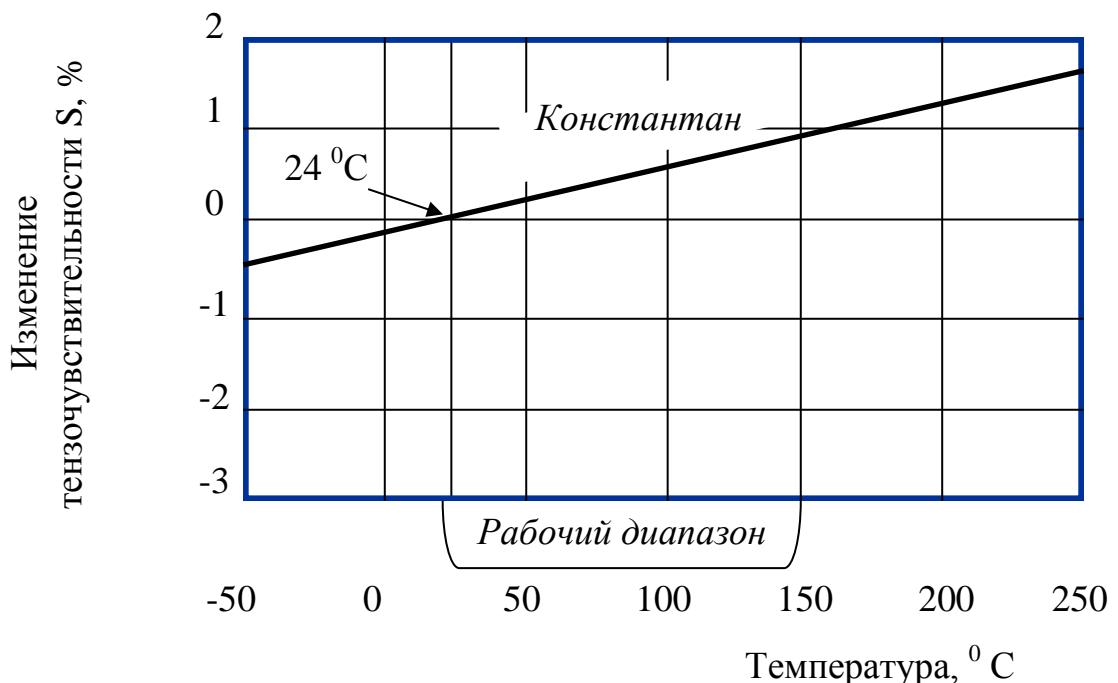


Рисунок 2.15 – График зависимости изменения тензочувствительности материала тензорешетки датчика от температуры

Коэффициент тензочувствительности константана изменяется от 0 до 1 % в диапазоне температур на металле колонны от + 20 до + 150 0C. Изменение коэффициента тензочувствительности на один градус очень мал и составляет +0,00735 для константана (изменение менее 1 % для $\Delta T = 100 0C$).

– Удлинение (или сокращение) решетки датчика $\Delta l_p = \alpha \Delta T l$ и конструкции $\Delta l_o = \beta \Delta T l$ при изменениях температуры.

Где: l – база тензорезистора,

α и β – коэффициенты теплового расширения материалов решетки и детали соответственно.

Поскольку жесткость исследуемой конструкции намного выше, чем жесткость тензорешетки, то в последней возникнет механическая деформация:

$$\varepsilon_t = (\Delta l_o - \Delta l_p)/l = (\beta - \alpha) \Delta T.$$

Датчик реагирует на деформацию ε_t точно так же, как и на деформацию образца ε , обусловленную нагрузкой, что порождает дополнительную компоненту выходного сигнала, соответствующую температуре.

– Температурное воздействие изменяет сопротивление тензорешетки:

$$\Delta R = \gamma R \Delta T,$$

где γ – температурный коэффициент сопротивления материала решетки.

Изменение сопротивления наклеенного на конструкцию датчика от температуры: $\Delta R/R = (\beta - \alpha) S \Delta T + \gamma \Delta T$.

Даже если коэффициенты теплового расширения материалов датчика и конструкции одинаковы $\alpha = \beta$, кажущаяся деформация не равна нулю и определяется вторым членом уравнения. Температурная компенсация датчика достигается лишь при условии, что оба члена в уравнении либо равны нулю, либо взаимно уничтожаются.

Учет температурной составляющей предусматривает установку термокомпенсационного тензорезистора на группу рабочих, расположенный в температурной среде, максимально приближенной к рабочей температуре тензодатчиков.

На рисунке 2.16 представлено расположение термокомпенсационного датчика на консоли колонны у опорного узла свода печи.

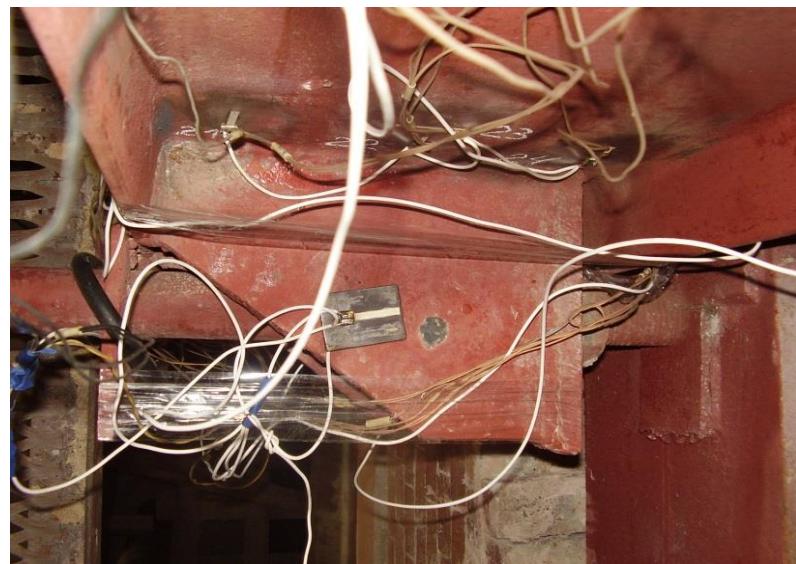


Рисунок 2.16 – Установка термокомпенсационного датчика на консоли колонны
(вид сверху)

Таблица 2.6 – Обоснование возможности применения контрольно-измерительного оборудования

№ п/п	Параметр	Инструментальное оборудование	Интервал снятия показаний	Выходной документ
1	2	3	4	5
1	Деформации, ϵ	СИИТ-3, 100 каналов	3 часа	Журнал
2	Температура в агрегате, T_p	Временные термопары	1 час	Журнал
		Постоянные термопары	1 час	Архивирование данных в Siemens PCS 7
3	Температура конструкции, (колонны) T_k	Термопары	1 час	Архивирование данных в Owen Report Viewer v.2.0a.
4	Температура конструкций, (днища, футеровки) T_k	Термометр Metermen IR608	По необходимости	Журнал
5	Рост свода, Δ	Маяки на своде	1 час	Журнал роста свода
6	Регулировка тяжей свода	–	–	Журнал регулировки тяжей
7	Заполнение бассейна			Журнал наварки стекломассы
	Загрузка шихты, G_{ct}	Контейнер- измеритель	1 час	
	Уровень в бассейне, h_{ct}	Датчик уровня расплава	1 час	
8	Влажность воздуха в цехе, ϕ	Психрометр	1 час	Журнал профсанитарии
9.9	Температура в цехе, T	Термометр	1 час	

2.4. Выводы по результатам II раздела

Проведенное обоснование методов, планируемых к применению в ходе численных и экспериментальных исследований, позволяют сделать следующие выводы:

1. Рациональным методом для уточнения действительного напряженно-деформированного состояния элементов системы металлического каркаса обвязки стекловаренной печи является МКЭ с моделированием эксплуатационных режимов работы печи.

Расчет предложенной пространственной расчетной модели металлического каркаса стекловаренной печи с постоянными нагрузками (от собственного веса) и длительно действующими (вес стекломассы и температура) показал доминирующее действие температуры в общих усилиях в элементах металлического каркаса.

В сочетании с постоянными нагрузками температура в 4–5 раз увеличивает возникающие усилия в металле. Исходя из этого, полученные в результате расчета сечения колонн, балок и тяжей незначительно отличаются от принятых в строительстве. На результаты расчета повлияли некоторые допущения, принятые в модели:

- неучет релаксации футеровочной кладки (перераспределения напряжений в результате ползучести и других физико-механических процессов);
- неучет компенсирующих кладочных швов;
- неучет технологических особенностей эксплуатации (подкрутка тяжей при росте свода) и все упрощения, которые требует МКЭ расчет.

Для создания адекватной модели, максимально приближенной к реальной конструкции необходимо провести комплекс экспериментальных исследований, с целью изучения технологических особенностей эксплуатации объекта печи. При создании уточненной модели печи следует ввести корректное проектирование тяжа с включением механизма его регулировки в соответствии с температурными площадками.

2. За точки температурного контроля при формировании расчетных сочетаний нагрузок приняты наиболее ответственные моменты при запуске печи для динасового свода. График подъема заданного температурного режима насчитывает 6 стационарных площадок. Исходя из этого составлена матрица формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи. Особенностью формирования является корректировка входных данных по результатам натурных экспериментальных исследований.

3. Для проведения экспериментальных исследований на натурных конструкциях рассматривается использование:

- для регистрации относительных деформаций элементов: в качестве первичных преобразователей – проволочные петлевые тензорезисторы с базой $l=20$ мм и номинальным омическим сопротивлением $R = 200,1 \pm 0,3$ Ом, вторичного преобразователя – системы измерительной тензометрической на 100 каналов измерения. Учет температурной составляющей предусматривает установку термокомпенсационного тензорезистора;
- для регистрации температуры на конструкции: Owen Report Viewer v.2.0a;
- для регистрации температуры в агрегате печи по постоянным термопарам: Siemens PCS 7.

– для контроля данных технологического процесса (график выводки печи в рабочий режим, контроль роста свода с технологией роспуска тяжей, заполнение бассейна стекломассой) по журналам технологического процесса.

Регистрация показаний планируется от момента нагнетания температуры и до полного заполнения бассейна стекломассой с минимально возможным интервалом регистрации показаний.

РАЗДЕЛ III. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ НА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСА

3.1. Исходные данные и методика моделирования исследования напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса

Инструментом для исследования напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса при нестационарных режимах эксплуатации с реализацией задачи в конечно-элементной постановке является программный комплекс ЛИРА-САПР.

В качестве модели выбрана натурная конструкция ванной стекловаренной печи с подковообразным направлением топливного факела. Размеры печи в плане составляют $17,78 \text{ м} \times 8,2\text{м}$, с высотой варочного отсека 1,5м. Печь имеет отдельную подвеску свода и стен газопламенного пространства. Действие распора свода от расширения огнеупорной кладки воспринимается тяжами, установленными на колоннах каждой плоской рамы каркаса обвязки, верхнее и нижнее защемление колонн жесткое. Конструкция каркаса в варочной части насчитывает 9 плоских поперечных рам и 2 пары продольных рам с гибкой регулировкой у торцевых стен. Футеровка верхнего строения печи выполнена из огнеупорного материала с поперечными деформационными швами для релаксации кладки во время становления температурного режима. Нижнее строение печи состоит из конструкции днища печи, образованное балочной системой [3, 4] и несущих опорных колонн круглого сечения. Характеристика применяемых конструктивов и материалов стекловаренной печи приведена в разделе 2. Для полного анализа напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса на этапе введения в эксплуатацию печи создана объемная расчетная модель системы каркаса верхнего и нижнего строения. Для адекватности расчетной схемы металлического каркаса реализована полная модель печи с учетом футеровочной части. Реализация модели осуществлена в

программном комплексе Лира САПР 2013. Используемые при формировании расчетной схемы КЭ представлены в таблице 3.2 [124].

Таблица 3.2 – Описание используемых КЭ для построения расчетной модели

№ п/п	Описание типа КЭ	Характеристика	Элемент в расчетной схеме
1	2	3	4
1	Тип КЭ № 10	Универсальный пространственный стержневой КЭ	Колонны днища, связи, тяжи, балки днища
2	Тип КЭ № 34	Универсальный шестиузловой изопараметрический КЭ	Стены днища
3	Тип КЭ № 41	Универсальный прямоугольный КЭ оболочки	Лист металла пода печи, балки лафета, свод варочной и выработочной части печи
4	Тип КЭ № 42	Универсальный треугольный КЭ оболочки	
5	Тип КЭ № 44	Универсальный четырехугольный КЭ оболочки	

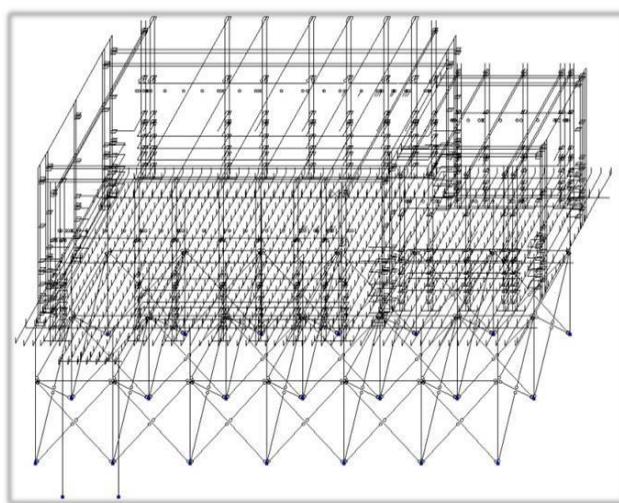


Рисунок 3.2 – Фрагмент расчётной схемы (построено с помощью КЭ 10)

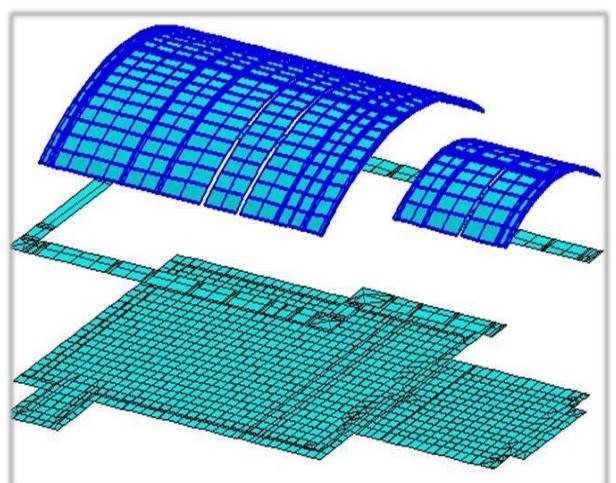


Рисунок 3.3 – Фрагмент расчётной схемы (построено с помощью КЭ 41, 42, 44)

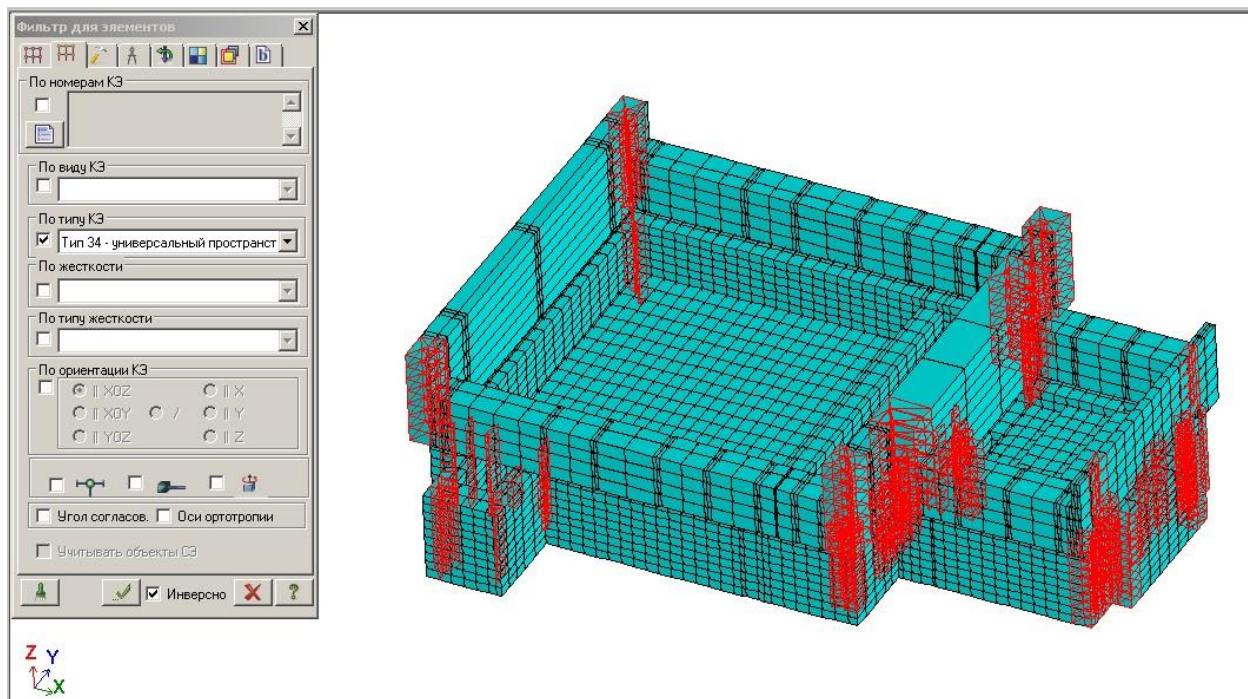


Рисунок 3.4 – Элемент № 34 в расчетной схеме

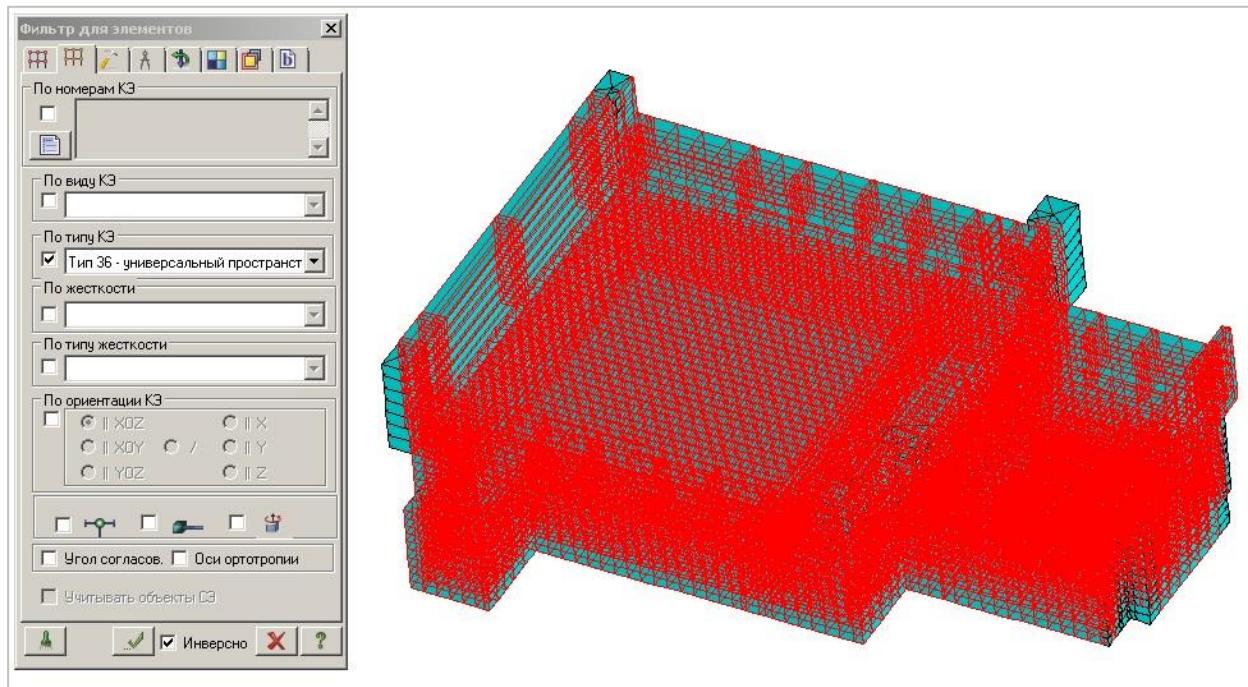


Рисунок 3.5 – Элемент № 36 в расчетной схеме

Среди особенностей расчетной схемы, помимо прочих, можно выделить следующие принятые допущения:

– В расчетной схеме компенсационные зазоры футеровочной части бассейна не учитывались, т. к. они компенсируются за счет линейного расширения огнеупорных слоев. Компенсационные швы при этом назначаются строго в соответствии с линейным расширением каждого слоя футеровки [144].

– При повышении температуры в рабочей камере печи при вводе в эксплуатацию и до момента начала подачи шихты стенки кладки работают совместно. Это допущение предусматривает отсутствие температурной нагрузки на стены варочного бассейна, т. к. швы предусмотрены для снятия напряжения в кладке от температурного расширения материала.

К прочим можно отнести все упрощения и пренебрежения присущие МКЭ и алгоритмам программы SCAD, являющимися одинаковыми для любой подобной задачи.

Решение проблемы, описанной в главе I, связанной с процессом регулирования тяжей колонн при температурном расширении свода в период ввода печи в эксплуатацию, обусловливает применение соответствующих методов исследования.

Для моделирования температурных режимов при вводе печи в эксплуатацию и регулирование НДС каркаса с использованием конструкции тяжей необходима разработка методики ввода в расчётную схему механизма роспуска тяжей свода печи.

3.2. Методика редуцирования напряжений в расчетной модели

Функциональное назначение. Важнейшим фактором работы тяжей в модели является сброс крутящего момента в колоннах обвязки с помощью своевременного регулирования и соответствующего центрирования колонны, включение тяжа с температурными графиками (площадки стационарного температурного режима, приеденных в таблице 2.2 раздела II).

Конструктивное решение. Тяж выполнен из болта М30, стали 40Х «Селект», класса прочности 12.9, длиной 500 мм.

На практике регулирование роста свода при нагреве осуществляется роспуском тяжей (рис. 3.6). Проектирование тяжа в расчетной модели сводится к корректному назначению его жесткостных характеристик, позволяющее регулировать податливость соединения в заданных пределах. По предложенной методике ослабление тяжей в расчетной модели могут варьироваться изменением жесткостной характеристики тяжа по закону Гука:

Моделирование в расчётной схеме. Жесткость элемента задана численным описанием с типом конечного элемента 10 (универсальный стержень).



Рисунок 3.6 – Тяж в конструкции

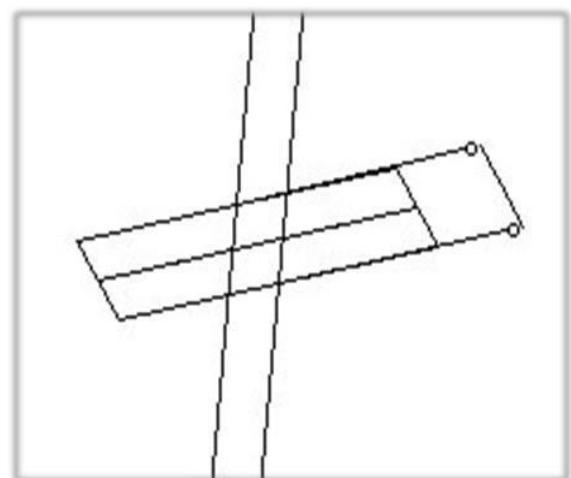


Рисунок 3.7 – Тяж в расчетной схеме

$$\frac{\Delta x}{X} = \frac{N}{EA}, \quad (3.1)$$

где N – усилие в тяже, кН;

Δx – геометрическое изменение длины тяжа, мм;

X – длина тяжа, мм.

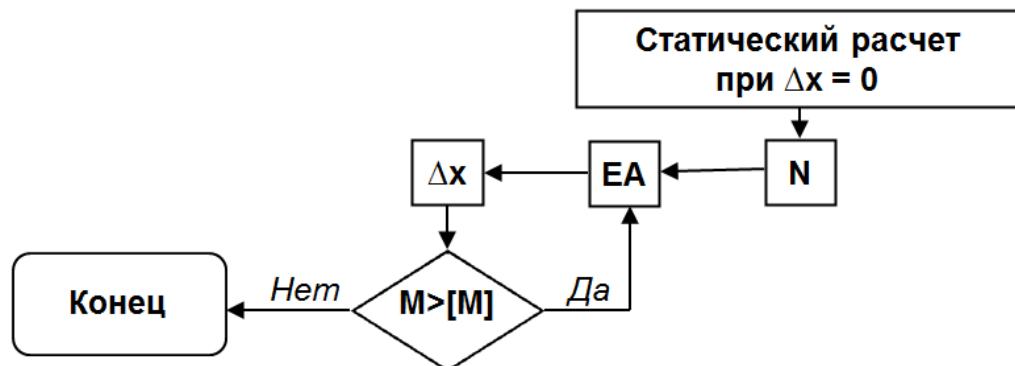


Рисунок 3.8 – Алгоритм учета регулировки тяжей в расчетной схеме.

Алгоритм учета регулировки тяжей в расчетной схеме предполагает изменение длины тяжа на Δx до стабилизации напряжений в колонне.

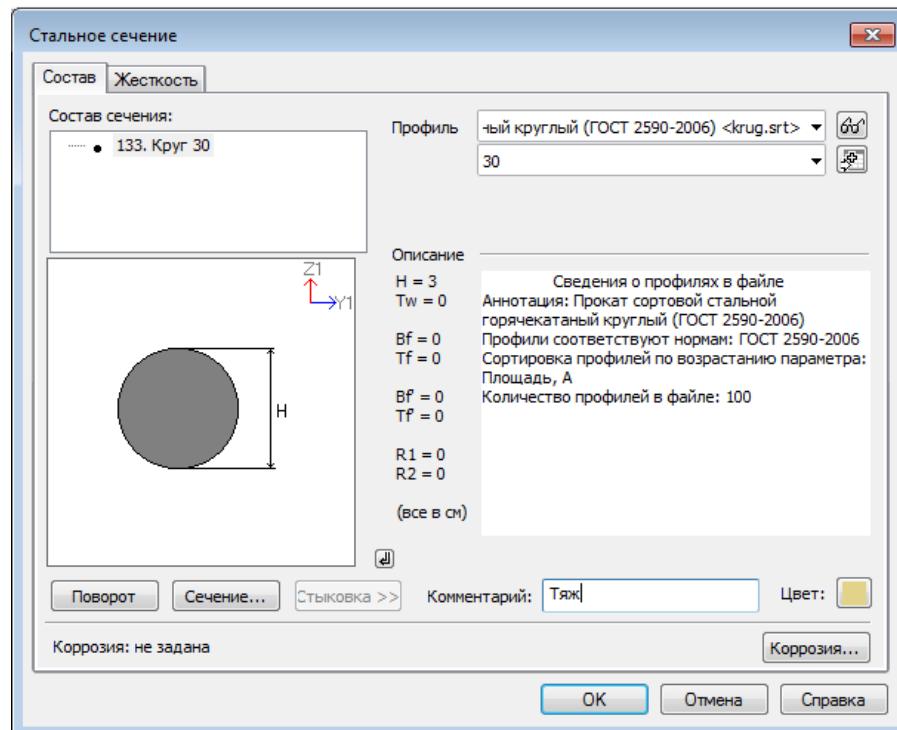


Рисунок 3.9 – Описание элемента тяжа в расчетной схеме

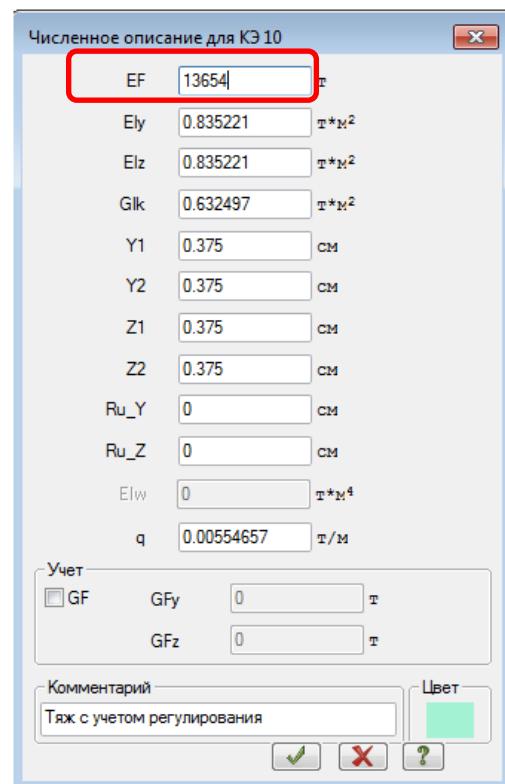


Рисунок 3.10 – Варьирование численного описания тяжа с учетом регулирования

3.3. Моделирование технологического процесса

Стекловарение – сложный физико-химический процесс, который протекает при изменяющихся высоких температурах в движущейся среде (стекломассе). В ванных печах непрерывного действия в отдельных частях печи (зонах) в один и тот же момент времени протекают все стадии варки, но в каждой из этих частей процесс во времени не изменен. Температура является основным фактором при вводе печи в эксплуатацию, ее наращивание ведется строго в соответствии с графиком «выводки» печи [177]. Для полного отображения влияния технологического цикла на металлоконструкции были созданы сочетания нагрузок, которые появляются на различных этапах ввода печи в эксплуатацию.

Особенностью расчёта является моделирование температурных режимов при вводе печи в эксплуатацию и регулирование НДС каркаса с использованием конструкции тяжей.

Для реализации этих особенностей к сформированной расчетной схеме прикладывались такие нагрузки, как:

- собственный вес конструкций (рис. 3.11);
- давление расплава стекломассы (рис. 3.12);
- температура внутри печи;
- температура на конструкциях.

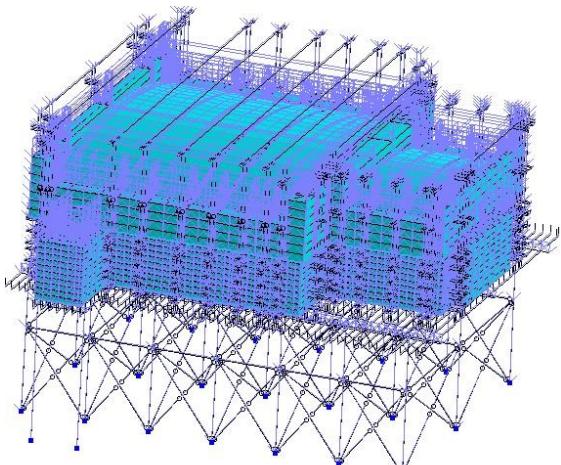


Рисунок 3.11 – Отображение собственного веса на расчётной схеме

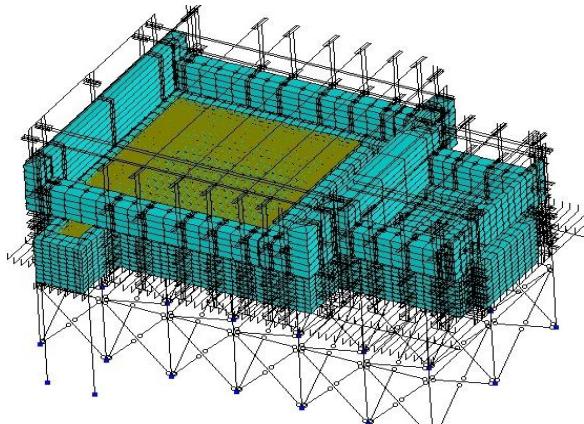


Рисунок 3.12 – Отображение давления расплава стекломассы на расчётной схеме

Изначально к расчетной схеме прикладывается лишь нагрузка от собственного веса конструкций и материалов. Далее в соответствии с технологическим процессом происходит прогрев печи. При прогреве печи происходит расширение огнеупорных материалов [159, 160, 166], что в свою очередь ведет к увеличению стрелы арки свода. При изменении стрелы свода печи в сооружении происходит перераспределение усилий в конструкциях. Это влияние наблюдается до полного прогрева печи ($1\ 540\ ^\circ\text{C}$). Так как огнеупор прогревается неравномерно, то на графике присутствуют ровные площадки выдержки огнеупора при одной температуре для полного равномерного его прогрева. После равномерного прогрева температуру в печи продолжают повышать до следующей площадки.

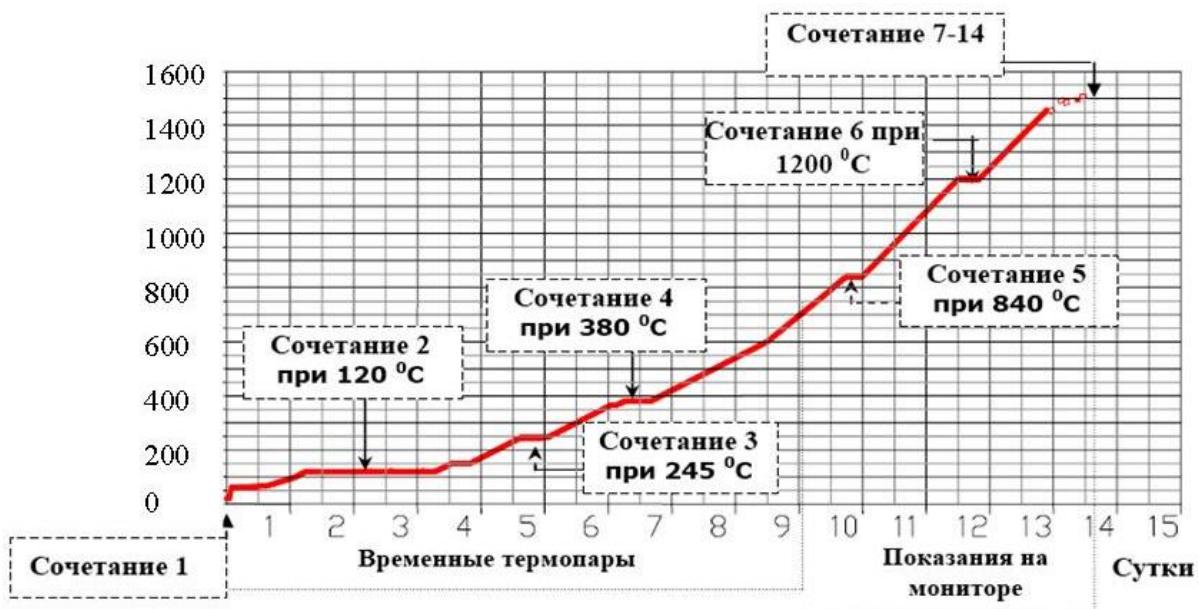


Рисунок 3.13 – График увязки технологического температурного режима выдержки стекловаренной печи и РСН в расчетной модели

Температурные площадки выдержки – $120, 245, 380, 840, 1\ 200, 1\ 560\ ^\circ\text{C}$. Далее сочетания нагрузок строятся таким образом: собственный вес конструкций и материалов плюс температура на определенном участке выдержки печи, которая прикладывается к своду печи. Также вводится значение коэффициента температурного расширения огнеупорного материала. Этот коэффициент находится по графику расширения огнеупорных материалов и имеет нелинейную

зависимость расширения от температуры [22, 24, 95, 153]. Для введения в расчет точного коэффициента расширения материала, найден коэффициент для каждого градуса от 1 до 1 600 $^{\circ}\text{C}$ и усреднен, тем самым нелинейный расчет переведен в линейный. Одним из немаловажных факторов является то, что температура по всей длине печи распределяется неравномерно, соответственно на определенных участках с температурной разницей материал расширяется неравномерно, при этом стрела арки свода также будет не одинакова на всех участках. Конструктивно между участками с различными температурами предусмотрены деформационные швы. Исходя из этого, свод печи принимается не как однородная целостная конструкция с приложением одного и того же температурного воздействия, а как пять различных конструкций. На каждый отдельный участок свода прикладываются различные температурные воздействия. Показатели температурных воздействий считаны с термопар, установленных в швах на своде печи по всей длине при введении печи в эксплуатацию (рис. 3.14).

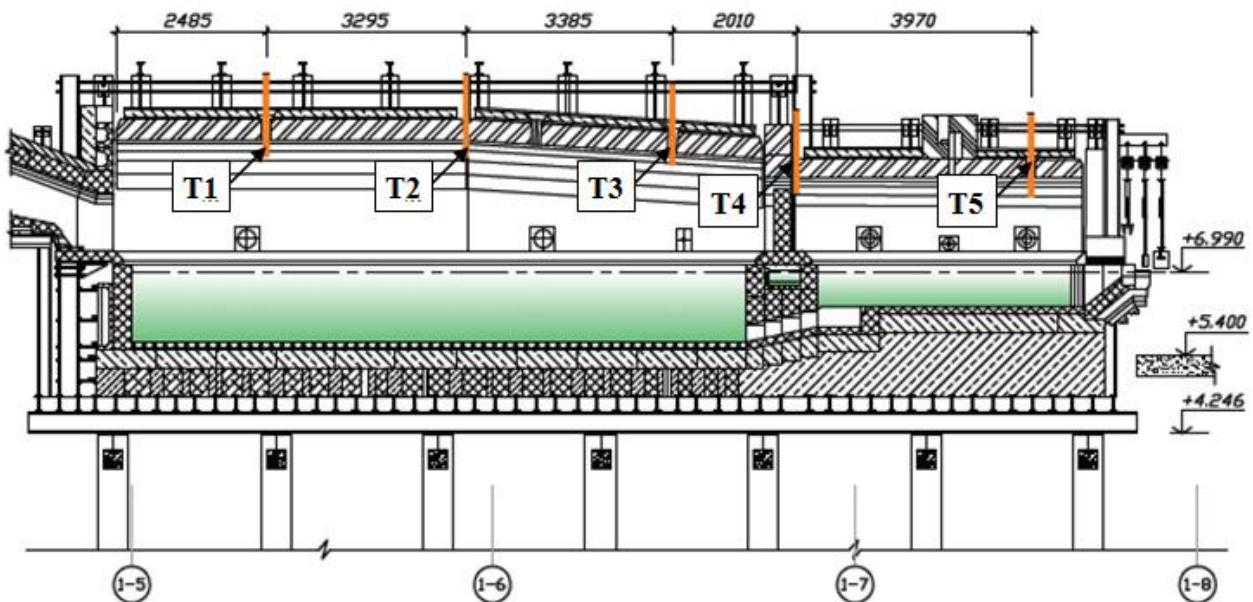


Рисунок 3.14 – Расположение термопар по длине печи

Данные получены при ранее проведенных экспериментальных исследованиях [177]. В таблице 3.3 приведено значение температур, полученных по пяти термопарам, и в таблице 3.4 представлены линейные расчетные коэффициенты расширения огнеупорного материала свода.

Таблица 3.3 – Показатели температур по термопарам

№ площадки выдержки	Номер термопары по журналу контроля				
	№1	№2	№3	№4	№5
1	120	121	122	123	125
2	245	260	254	261	261
3	380	380	368	375	353
4	840	854	840	823	744
5	1200	1210	1200	1076	936
6	1540	1434	1410	1210	1020

Таблица 3.4 – Показатели усредненного линейного коэффициента

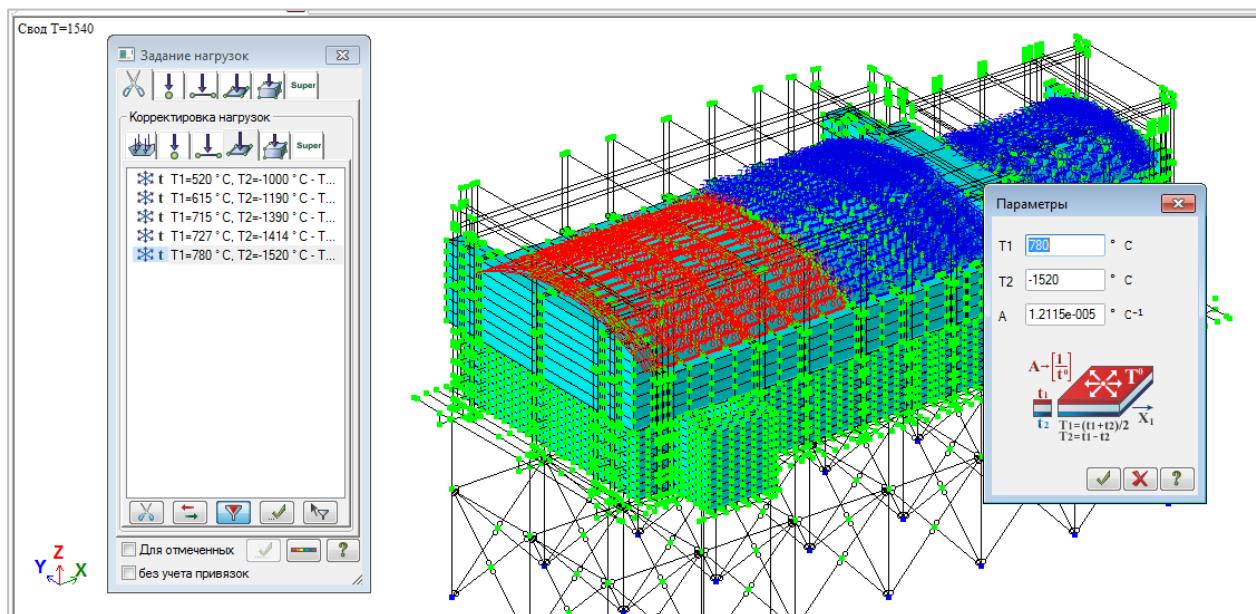
№ площадки выдержки	Номер термопары по журналу контроля				
	№1	№2	№3	№4	№5
1	1.06	1.07	1.09	1.105	1.132
2	3.188	3.512	3.38	3.534	3.534
3	5.863	5.863	5.664	5.781	5.404
4	10.058	10.128	10.058	9.97	9.52
5	11.399	11.426	11.399	11.028	10.603
6	12.115	11.926	11.88	11.426	10.833

В таблице 3.4 представлены расчетные данные усредненного линейного коэффициента для введения в программу Лира САПР на каждый температурный блок для каждой площадки выдержки печи (рис. 3.13). Температурная нагрузка прикладывается к оболочкам в местной системе координат по направлению оси Z. Значения температуры слоев футеровки получены при расчете теплопередачи слоев футеровки печи, при помощи программы Heat Transmission (расчет тепловых потерь через плоскую многослойную стенку) 1.02. Методика расчета описана в разделе II.

В таблице 3.5 приведены значения по температурным блокам, позволяющие задать температурную нагрузку (T_1 и T_2) и переменный коэффициент линейного расширения огнеупорной кладки (A) в расчетной модели.

Таблица 3.5 – Расчетные данные по температурным блокам

Температура выдержки, $^{\circ}\text{C}$	Входные данные	Номер термопары по журналу контроля				
		№1	№2	№3	№4	№5
120	T_1	70	70.5	71	71.5	72.5
	T_2	-100	-50.5	-51	-51.5	-52.5
	A	1.06	1.07	1.09	1.105	1.132
245	T_1	132.5	140	137	140.5	140.5
	T_2	-112.5	-120	-117	-120.5	-120.5
	A	3.188	3.512	3.38	3.534	3.534
380	T_1	200	200	194	197.5	186.5
	T_2	-180	-180	-174	-177.5	-166.5
	A	5.863	5.863	5.664	5.781	5.404
840	T_1	430	437	430	421.5	382
	T_2	-410	-417	-410	-401.5	-362
	A	10.058	10.128	10.058	9.97	9.52
1200	T_1	610	615	610	548	478
	T_2	-590	-595	-590	-528	-458
	A	11.399	11.426	11.399	11.028	10.603
1540	T_1	780	727	715	615	520
	T_2	-760	-707	-695	-595	-500
	A	12.115	11.926	11.88	11.426	10.833

Рисунок 3.15 – Приложение температурной нагрузки на блок свода (температура площадки 1 540 $^{\circ}\text{C}$)

После полного прогрева печи в нее порционно загружается шихта. Шихта принимается как нагрузка, равномерно распределенная по дну варочного бассейна. При температуре шихта расплывается и превращается в стекломассу, которая в свою очередь оказывает давление на стены варочного бассейна. Из этого следует, что нужно прикладывать не только равномерно распределенную нагрузку, но и гидростатическую нагрузку, действующую на стены бассейна печи.

Для объективности оценки влияния этой нагрузки и взаимной увязки с технологией вывода печи в рабочий режим процесс заполнения печи стекломассой разбит на 7 этапов.

- Первые три этапа – заполнение стекломассой основного варочного бассейна печи.
- Остальные четыре этапа – заполнение остальных технологических частей печи стекломассой.

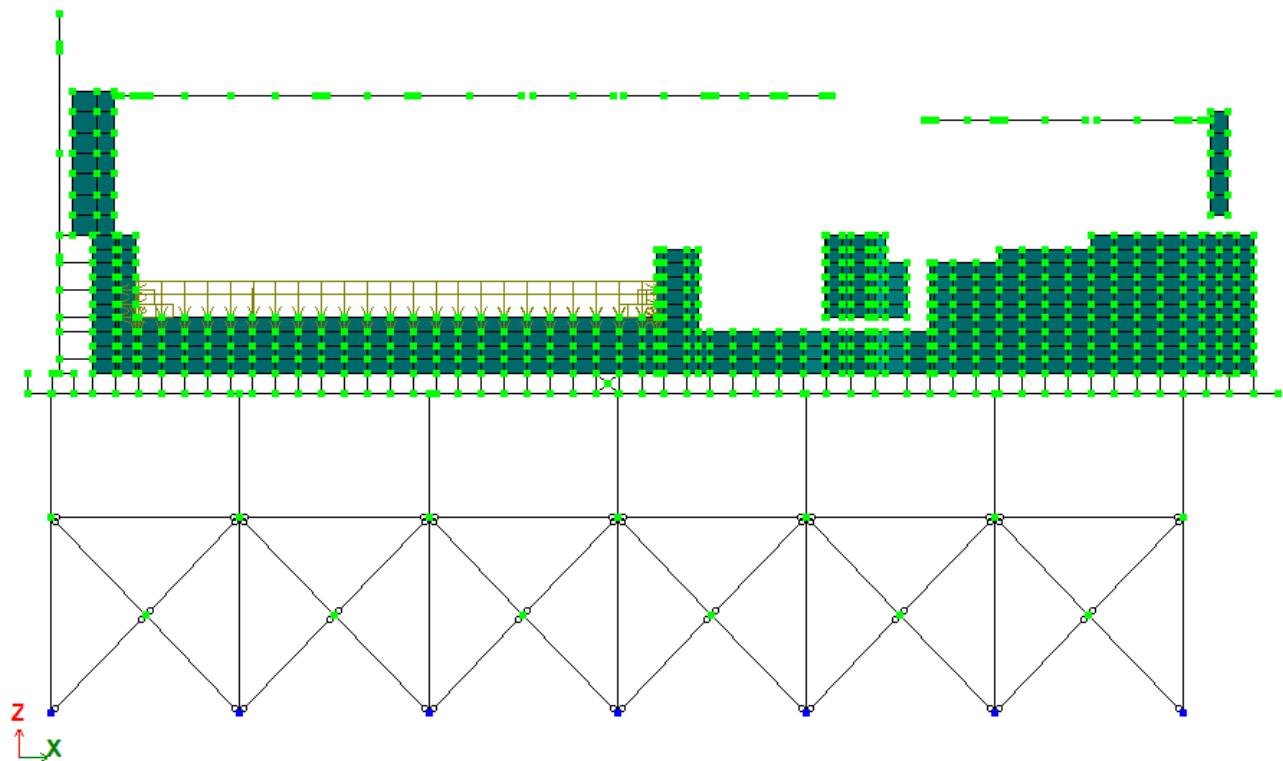


Рисунок 3.16 – Моделирование заполнения стекломассой основного варочного бассейна печи (Гидростатическая нагрузка 1 1/3)

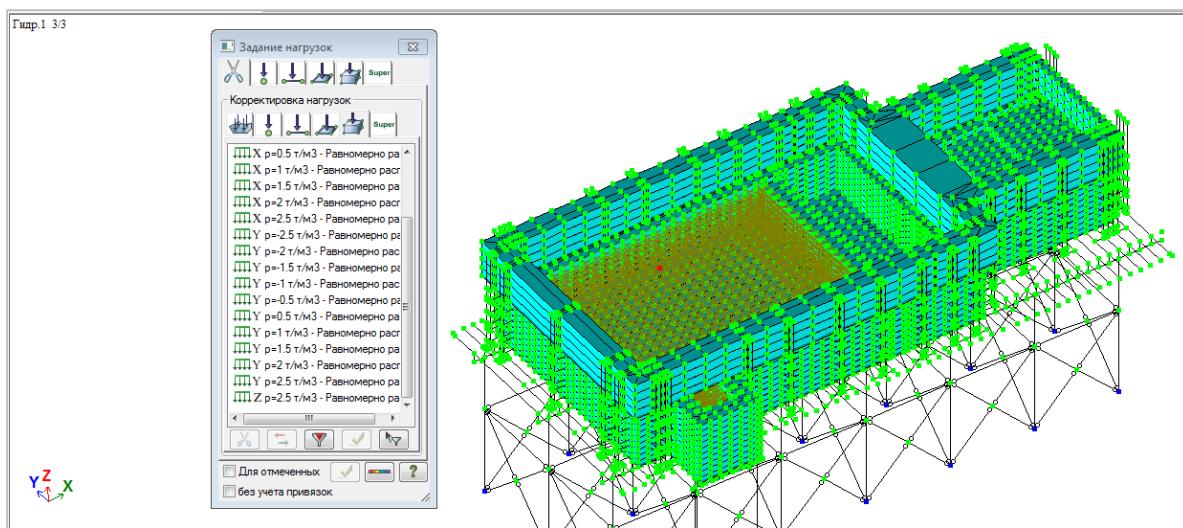


Рисунок 3.16 – Приложение гидростатической нагрузки из условия наполнения бассейна 1. 3/3

Так как говорилось ранее, все сочетание нагрузок задаются в соответствии с графиком ввода печи в эксплуатацию. Опираясь на график очевидно, что изначально к расчетной схеме прикладывается лишь нагрузка от собственного веса конструкций и материалов. Это сочетание наглядно отображено в таблице 3.6. Столбец 1.

Таблица 3.6 – Таблица сочетаний постоянных нагрузок

Далее в соответствии с технологическим процессом происходит прогрев печи. При прогреве печи происходит расширение огнеупорных материалов, что в свою очередь ведет к увеличению стрелы арки свода. При изменении стрелы свода печи в сооружении происходит перераспределение усилий в конструкциях. Это влияние будет наблюдаться до полного прогрева печи в 1540°C .

3.4. Анализ результатов расчета

Расчет на указанные нагрузки и воздействия выполнен в линейной постановке.

Без учета подкрутки тяжей напряжения в конструкциях превышают допустимые значения в 7 раз.

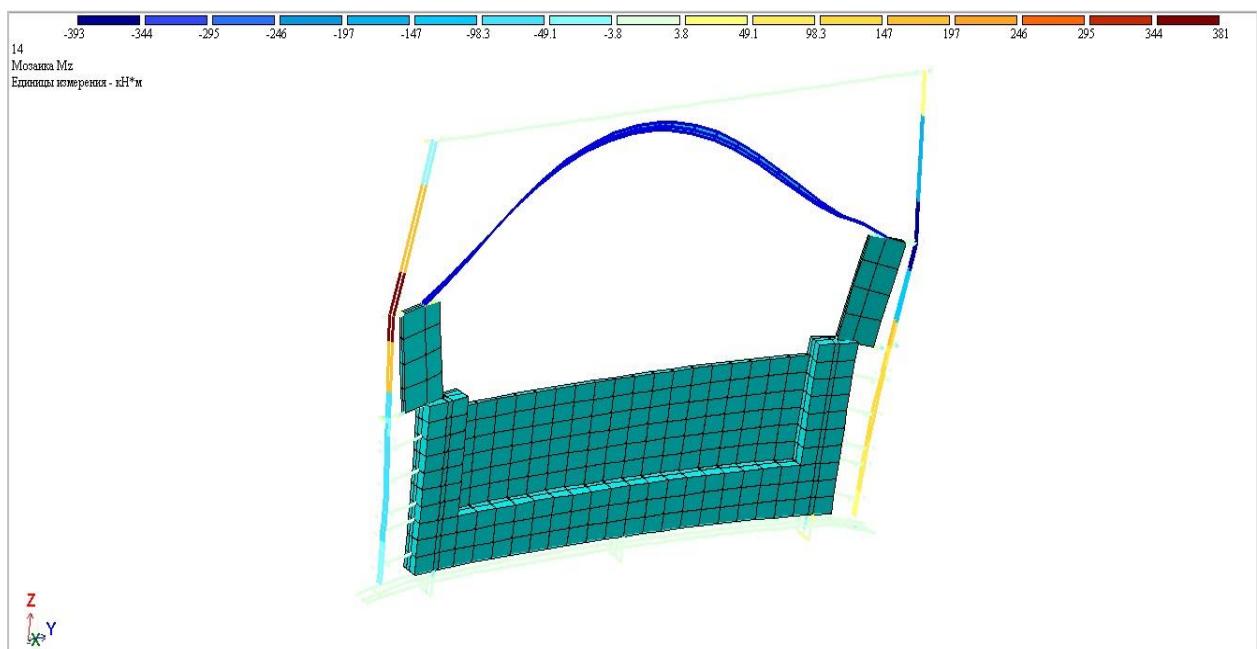


Рисунок 3.17 – Эпюра Mz без учета регулировки тяжей свода

На рисунке 3.17 изображена эпюра Mz без введения в расчетную схему регулировки тяжей, предусмотренное на практике (отображение максимальных напряжений без учета подкрутки тяжей). На этом этапе расчета включается механизм регулировки тяжей по вышеизложенному алгоритму.

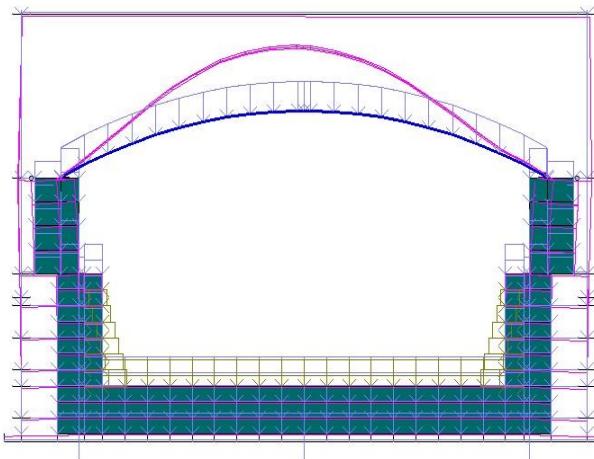


Рисунок 3.18 – Схема деформирования без учета регулировки тяжей

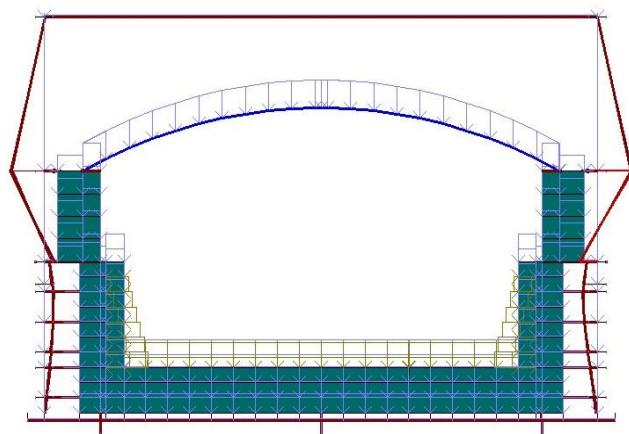


Рисунок 3.19 – Схема деформирования с учетом регулировки тяжей

На рисунках 3.20–3.21 представлены графики роста напряжений в колонне каркаса без учета регулировки тяжей и с включением механизма регулировки. 9. (Предел прочности 178 кН, запас 30 %).

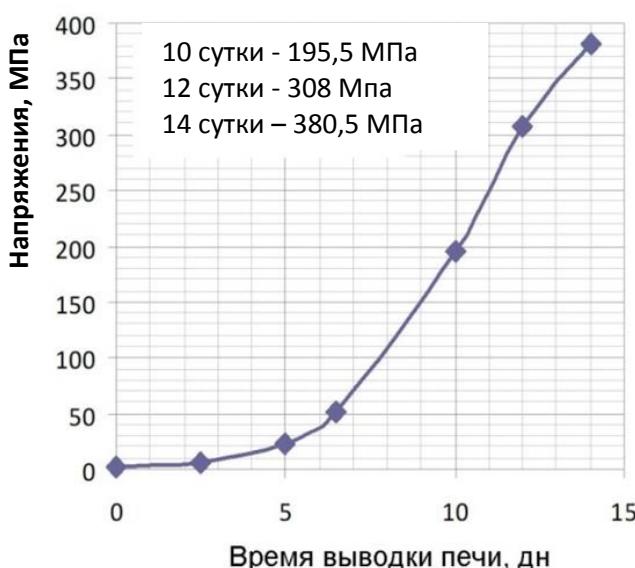


Рисунок 3.20 – Напряжения в колоннах рамы 7 без учета регулировки тяжей

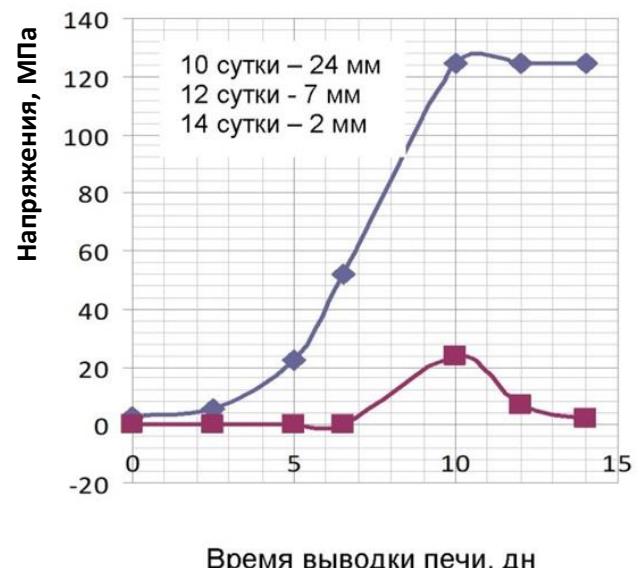


Рисунок 3.21 – Напряжения в колоннах рамы 7 с учетом регулировки тяжей

Влияние механизма регулировки на перемещения кладки свода представлены на графиках 3.22–3.23.



Рисунок 3.22 – Рост свода без учета регулировки тяжей

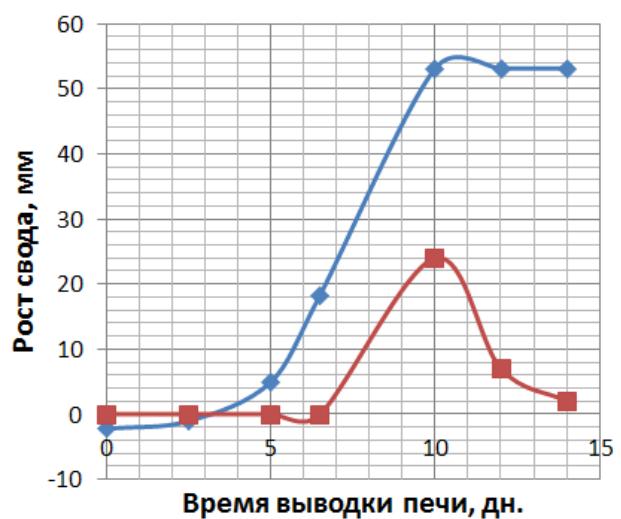


Рисунок 3.23 – Рост свода с учетом регулировки тяжей

Проведен анализ результатов и для более корректного анализа НДС исследуемого объекта создана дополнительная расчетная схема плоской рамы из пластинчатых элементов (рис. 3.24) для анализа усилий и напряжений, возникающие в колонне.

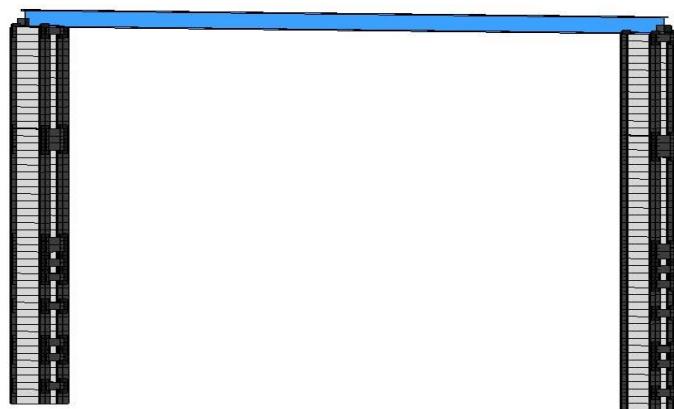


Рисунок 3.24 – Расчетная схема из пластинчатых элементов

К построенной расчетной схеме приложены усилия полученные из первоначальной расчетной схемы и получили такие результаты (приложение 17 рис. 1-7): $N_x=11,1 \text{ kH/cm}^2 < R_y \gamma_c$; $N_y=8,15 \text{ kH/cm}^2 < R_y \gamma_c$; $T_{xy}=0,754 \text{ kH/cm}^2 < 0,58 R_y \gamma_c$; поворот относительно $UY = 0,986^\circ$; перемещения по оси $X = 0,494 \text{ мм} < h/500$; перемещения по оси $Y=6,28 \text{ мм} < h/500$; четвертая теория прочности эквивалентные напряжения ($11,1 \text{ kH/cm}^2 < 1,15 R_y \gamma_c$). Проверка на прочность в

соответствии с [150] и [57].

Запас прочности в %: $N_x = 51,32 \%$; $N_y = 64,25 \%$; $T_{xy} = 94,3 \%$;
перемещения по оси X = 93,5 %; перемещения по оси Y = 17,37 %.

Четвертая теория прочности эквивалентные напряжения (57,67 %).

В результате полученных данных и анализа выяснено, что в колонне возникает кручение. Кручение связано с неравномерным распределением давления от распора свода. Такое явление как скручивание колонны относительно плоскости UY не благоприятно влияет на колонну в целом.

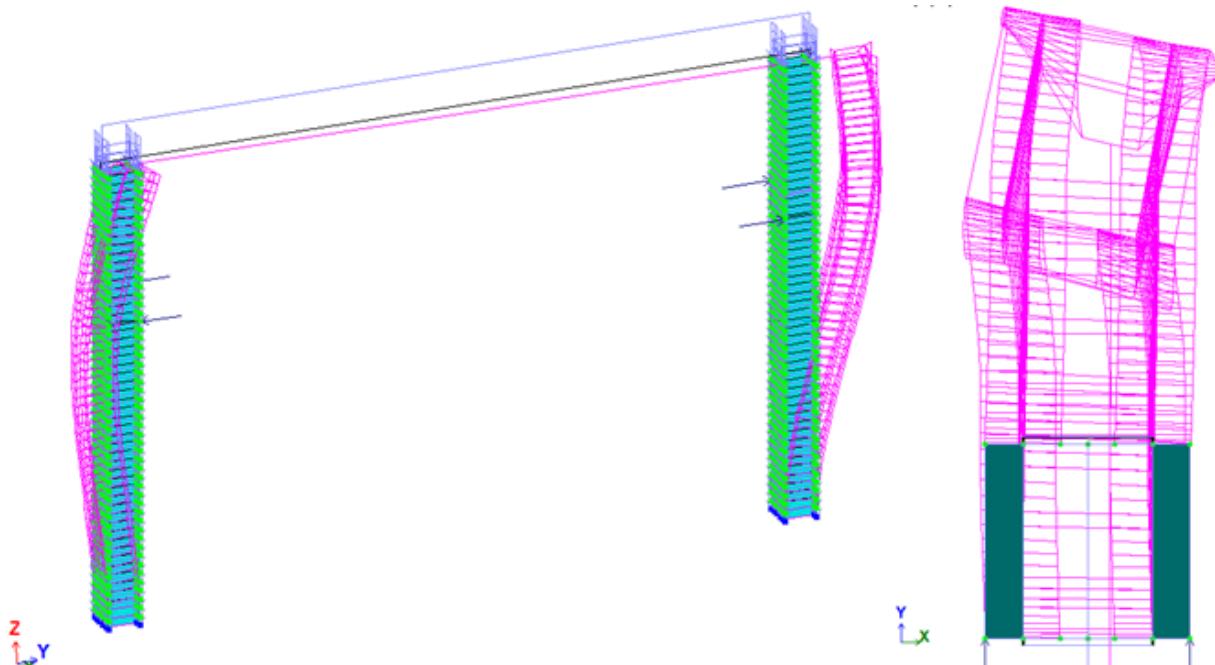


Рисунок 6 – Перемещения элементов каркаса рамы 7 пространственной модели без учета регулирования тяжей

Важнейшим фактором работы тяжей в модели является сброс крутящего момента в колоннах обвязки с помощью своевременного регулирования и соответствующего центрирования колонны, включение тяжа с вышеизложенными температурными графиками.

Для уменьшения поворота просчитаны такие варианты как уравновешивание давления от распора свода с помощью покрута тяжей. На рисунке 3.25–3.26 представлены графики с уравновешенными значениями усилий.

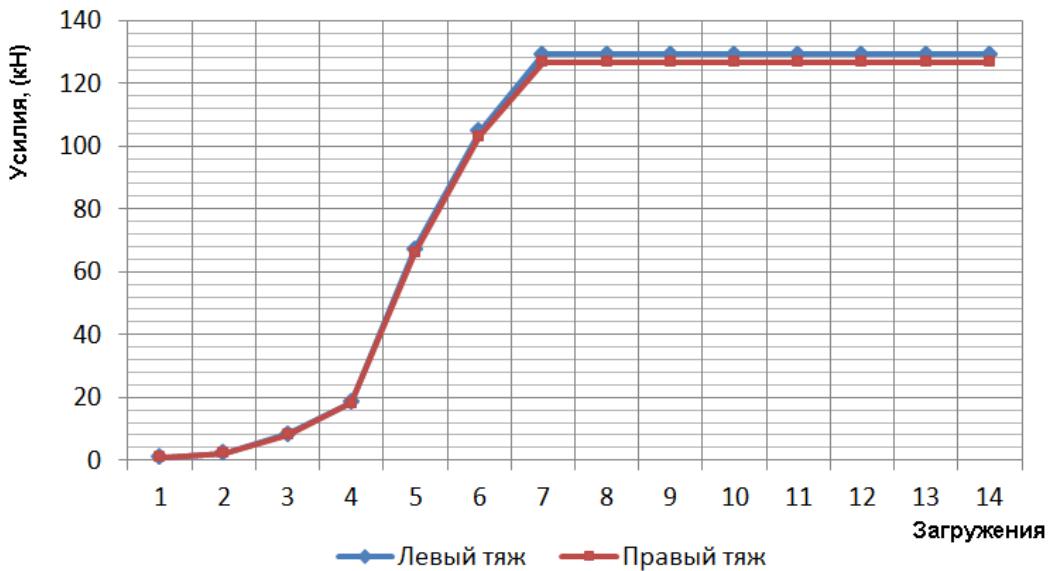


Рисунок 3.25 – Усилия (N) в тяжах (сечение № 1) рамы 7

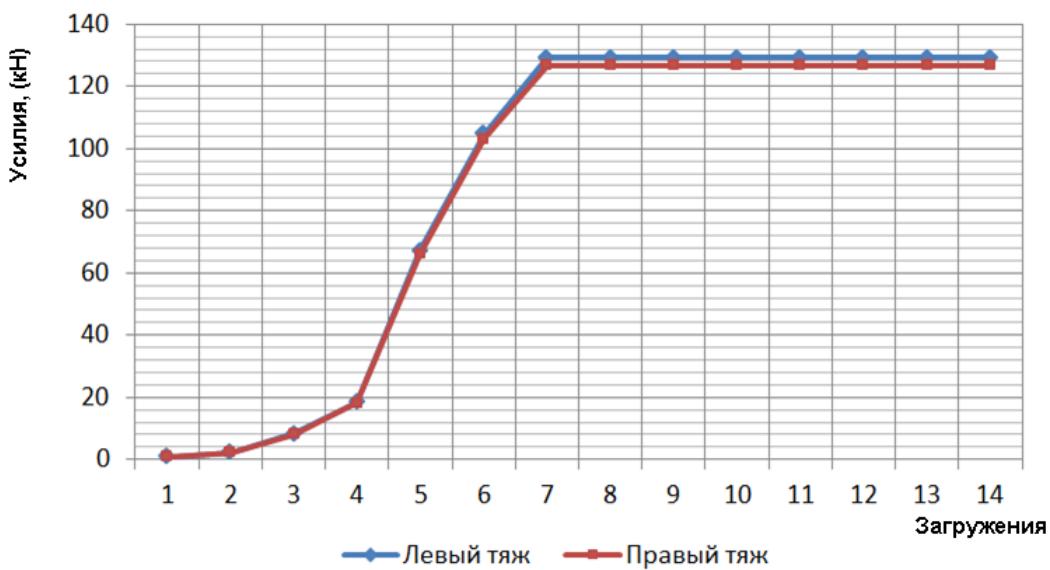


Рисунок 3.26 – Усилия (N) в тяжах (сечение № 2) рамы 7

В результате получено уменьшение поворота на 2,9 % и понижение эквивалентных напряжений на 10 %. Просчитан вариант с установкой двух диафрагм жесткости в месте приложения нагрузки от распора свода и в месте крепления балки раммы. В результате получено снижение усилий в колонне: $N_x = 7,2\%$; $N_y = 85,03\%$; $T_{xy} = 15,25\%$; перемещения по оси $X = 47,97\%$; перемещения по оси $Y = 14,01\%$; Четвертая теория прочности эквивалентные напряжения = 7,2 %.

Найдено максимально загруженные колонны без учета вышеперечисленных мероприятий и просчитаны усилия и напряжения, возникающие в них. Максимальный поворот относительно UY = 9.167°.

На рисунках представлены изополя касательных напряжений, полученные в ходе расчета без учета регулировки (рис. 3.29) и с учетом регулировки тяжей (рис. 3.30).

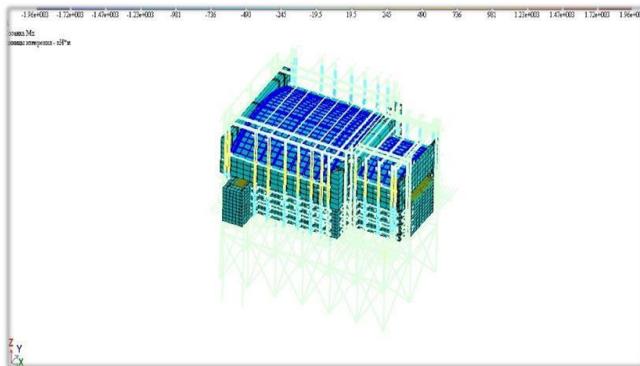


Рисунок 3.27 – Расчётная модель без учёта регулирования тяжей

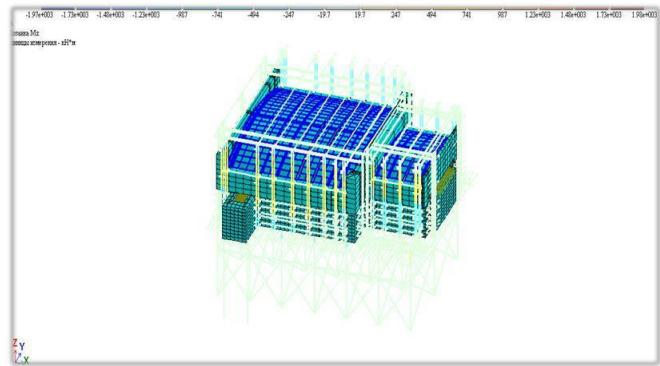


Рисунок 3.28 – Расчётная модель с учётом регулирования тяжей

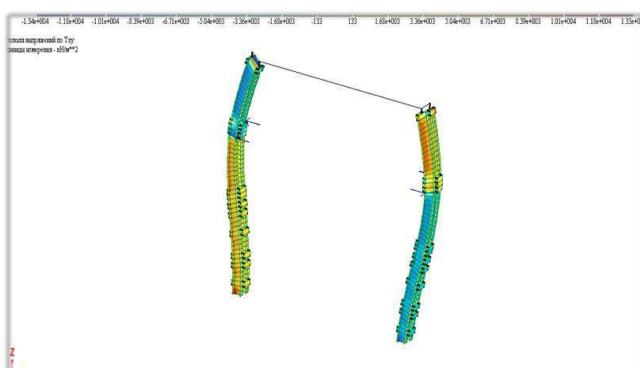


Рисунок 3.29 – Изополя напряжений τ_{xy} в колоннах рамы К7 без учёта регулирования тяжей

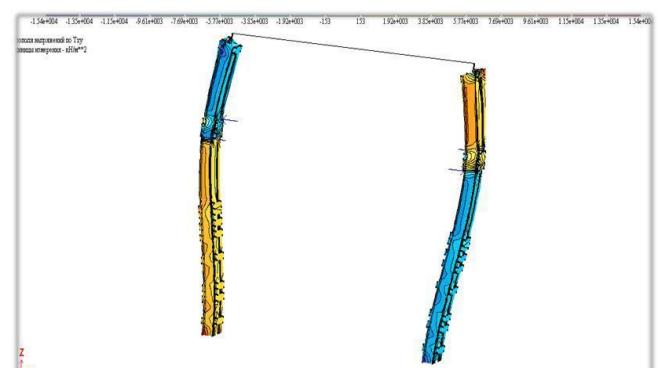


Рисунок 3.30 – Изополя напряжений τ_{xy} в колоннах рамы К7 с учётом регулирования тяжей

3.5. Выводы по результатам III-го раздела

На основании выполненных численных исследований влияния технологического процесса этапов жизненного цикла стекловаренной печи на напряженно-деформированное состояние конструкций каркаса можно сформулировать следующие выводы:

1. Сформирована уточнённая расчётная схема пространственной модели каркаса печи, которая позволяет учесть разность перепада температур в различных температурных блоках свода, что в дальнейшем позволило произвести уточняющий расчёт несущих конструкций колонн каркаса.

2. Составлены РСН для каждой температурной площадки этапов ввода печи в эксплуатацию. Без учета подкрутки тяжей нормальные напряжения в конструкциях превышают допустимые значения в 7 раз.

3. Выявлена депланация сечения колонны обвязки ванной стекловаренной печи. Создание дополнительной уточненной расчетной модели из пластинчатых элементов позволило отследить и разработать способ регулирования НДС в колоннах обвязки ванной стекловаренной печи. Максимальный поворот относительно UY составляет 9.167° . В результате уравновешивания давления от распора свода с помощью алгоритма покрута тяжей, основанного на изменении жесткостных характеристик тяжа, путем изменения EF в численном описании элемента, получено уменьшение поворота на 2,9 % и понижение эквивалентных напряжений на 10 %.

4. В результате поверочных расчетов с учетом переменного модуля упругости кладки из огнеупорного кирпича, а также по результатам натурных наблюдений за работой свода с учетом технологического приема роспуска тяжей, коэффициенты принятые в инженерной практике для учета роста свода при температуре не подтвердились и являются не корректными (разрушение свода произойдет еще при 120°C).

5. По предложенной методике расчета стальной обвязки каркаса печи с учетом фактических сечений экспериментального объекта установлен значительный запас прочности, что позволяет оптимизировать сечения конструкций.

РАЗДЕЛ IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ОБВЯЗКИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

4.1. Цели и задачи экспериментальных исследований определения напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса обвязки ванной стекловаренной печи

Цель экспериментальных исследований заключается в экспериментальной проверке и подтверждении результатов численных исследований, проведенных в III-м разделе работы.

Основной задачей при проведении комплексных натурных исследований является определение переходного и эксплуатационного напряженно-деформированного состояния каркаса обвязки ванной стекловаренной печи.

4.2. Общие сведения о натурном эксперименте

В качестве объекта экспериментальных исследований принята натурная конструкция колонны обвязки ванной стекловаренной печи ЦППС завода ООО «Стройстекло-трейдинг» в г. Константиновка. Печь построена по чертежам китайских специалистов стекольной технологической компании «ТУЧЭН», имеющей 11 государственных патентов. Печь представляет собой крупную (съем стекломассы 100 т/сутки) ванную стекловаренную печь непрерывного действия. По способу использования тепла отходящих газов печь является регенеративная с подковообразным направлением топливного факела. Конструкция печи прокатного цеха приближена к конструктивам, применяемым в настоящее время немецкой компанией HORN. Проведение экспериментальных исследований неотъемлемо связано с периодом пуска печи. Пуск печи включает операции сушки, разогрева и наварки стекломассы. Процесс сушки и разогрев печи до рабочей температуры называется «выводкой». В процессе сушки и разогрева печи

по мере повышения температуры огнеупорные материалы, составляющие футеровочный слой печи, увеличиваются в объеме. Расширение это неравномерно и зависит от минералогического и химического состава, структуры, плотности и теплопроводности огнеупорных материалов. Увеличение в объеме от части, компенсируется естественными и специально оставляемыми в кладке температурными швами и ослаблением натяжения продольных связей, и регулированием упорных болтов поперечных рам.



Рисунок 4.1 – Натурная модель печи с подковообразным направлением пламени, производительностью 100 т/сут.

График выводки печи ЦППС с нанесением наиболее ответственных моментов представлен на рис. 4.2. Процесс выводки печи в рабочее состояние, связанный с осуществлением подъема температуры в ее рабочей камере, оказывает влияние на напряженно - деформированное состояние металлического каркаса ее обвязки за счет прироста огнеупорных материалов, создающего дополнительный распор свода, который в свою очередь ведет к колебаниям деформаций в металле элементов каркаса. Разогрев печи ведется осторожно по определенному графику и тщательно контролируется.

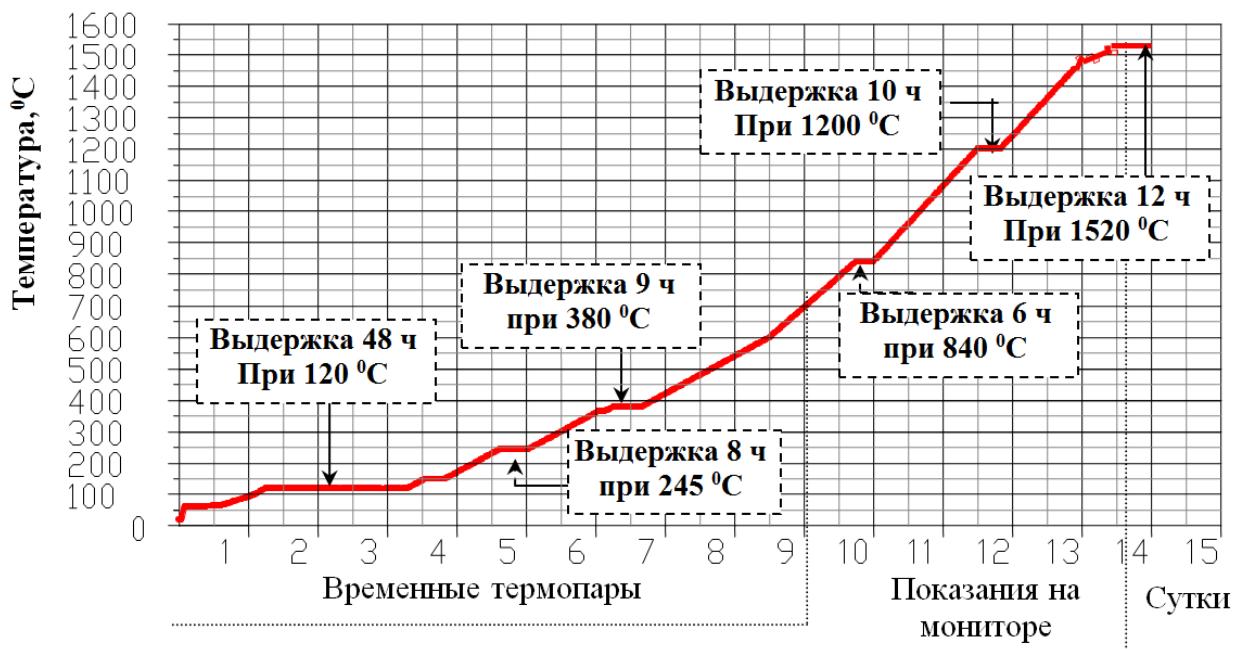


Рисунок 4.2 – График «выводки» печи ЦППС производительностью 100 т/сут.

4.3. Исследования технологических параметров

4.3.1. Контроль температурного режима

Для контроля температуры в температурных швах между секциями, а также у загрузочного кармана, в регенераторах, фидерах и машинном канале были установлены термопары (рис. 4.3).

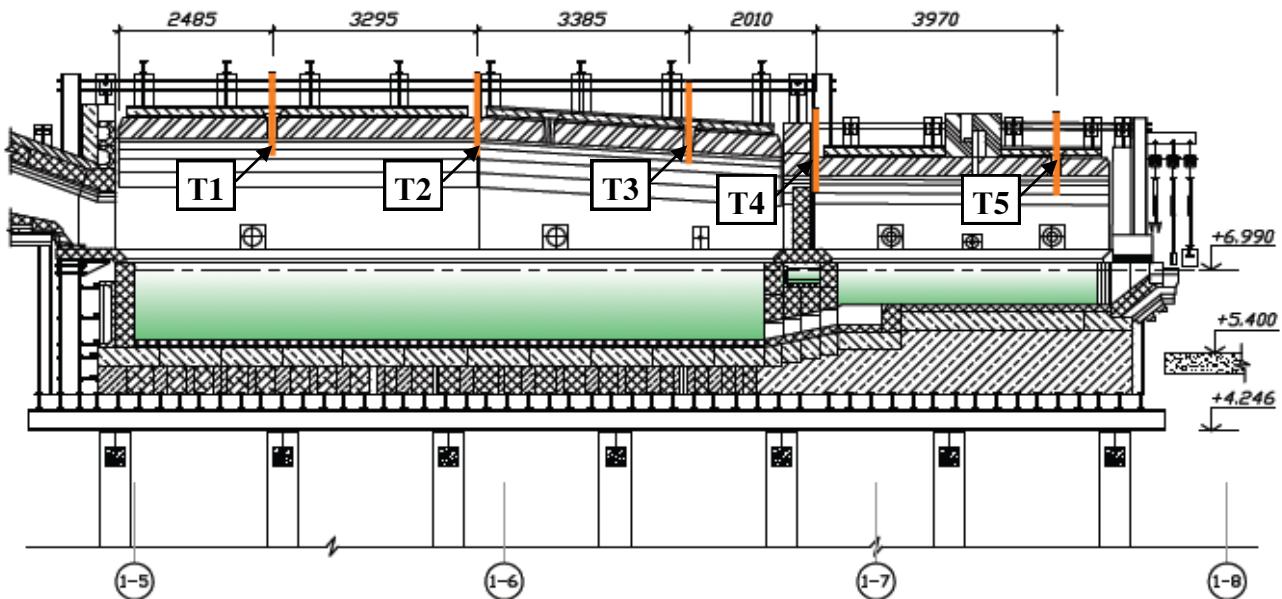


Рисунок 4.3 – Точки временного температурного контроля выводки ванной печи ЦППС

Термопары установленные в пространстве печи использовались в диапазоне температур до 600 °C при достижении температуры в пространстве печи выше 600 °C временные термопары были устраниены. После устраниния временных термопар температура в печи контролировалась при помощи автоматизированной системы управления производством стекла (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Контроль температурных параметров

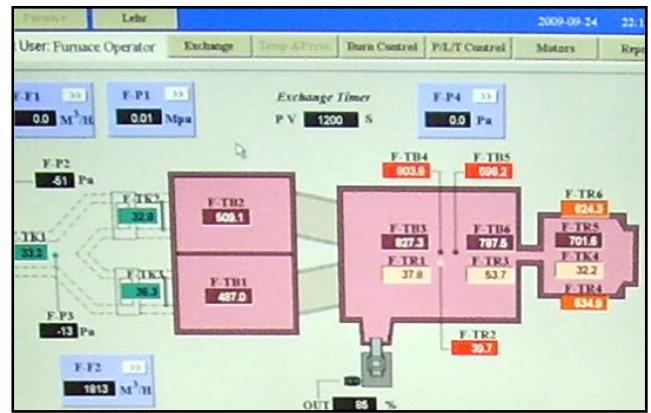


Рисунок 4.5 – Мнемосхема температурного контроля

Дальнейшие снятия показаний осуществлялись при помощи мнемосхем выведенных на экран монитора (рис.4.5.).

На основании данных контроля температурного режима печи построен график (рис. 4.6) нарастания температуры в агрегате печи в период ее «выводки».

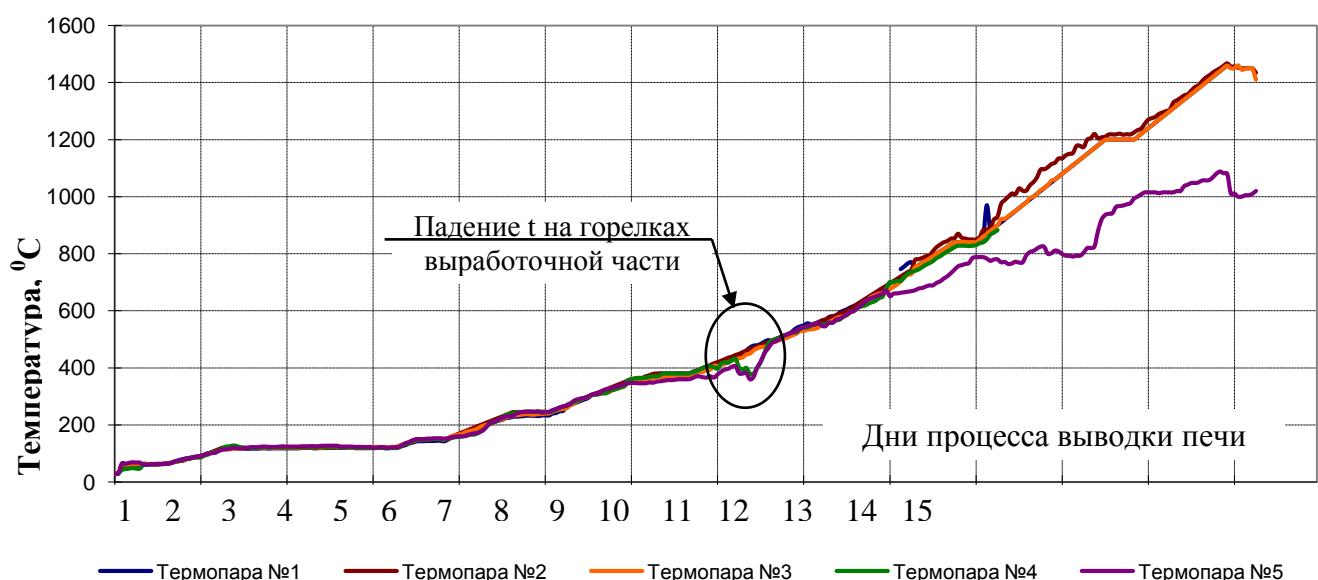


Рисунок 4.6 – График температурного режима печи

На графике 4.6 перепад температур по длине печи во время выводки не превышает 10°C . Отклонение по 5 термопаре обусловлено технологически заданным режимом, предусматривающим более низкую температуру в выработочной части.

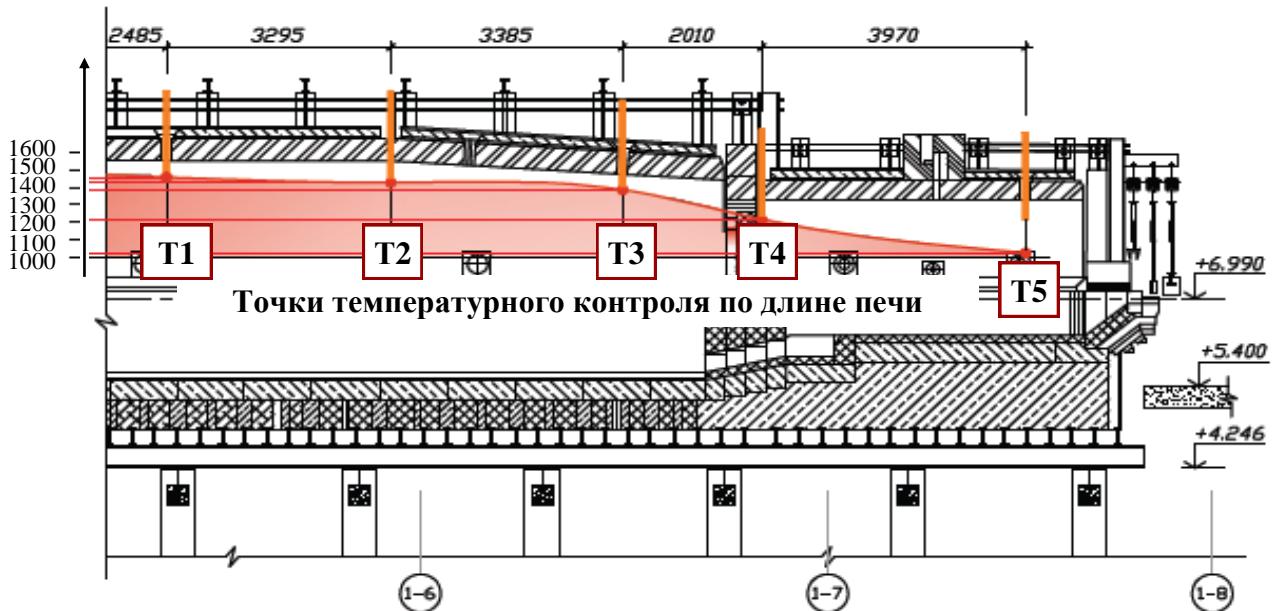


Рисунок 4.7 – Распространение температуры по длине печи в период ее «выводки»

Исследования области температурного режима в агрегате печи в период запуска необходим для выявления закономерностей передачи тепла металлическому каркасу ее обвязки, установления взаимодействия между температурой в печи и расширением огнеупорной кладки динасового свода, который в свою очередь создает дополнительный распор в конструкции металлического каркаса.

4.3.2. Контроль роста свода печи

Во время выводки печи особое внимание уделялось контролю роста свода. В интервале температур (117 и 230°C) в результате превращения кремнезема (SiO_2) в тридимит, кристобалит и кварц резко увеличивается объем динасового огнеупора. Для контроля роста свода в начале и конце каждой секции были установлены линейки (маяки) с делениями через каждый сантиметр (рис. 4.10). Продольные связи металлического каркаса обвязки печи при выводке ослаблены,

их подтягивают по окончании выводки (рис. 4.11). Каждый час производится проверка роста свода, снятие показаний с фиксацией в журнале. При необходимости производится регулировка связей.

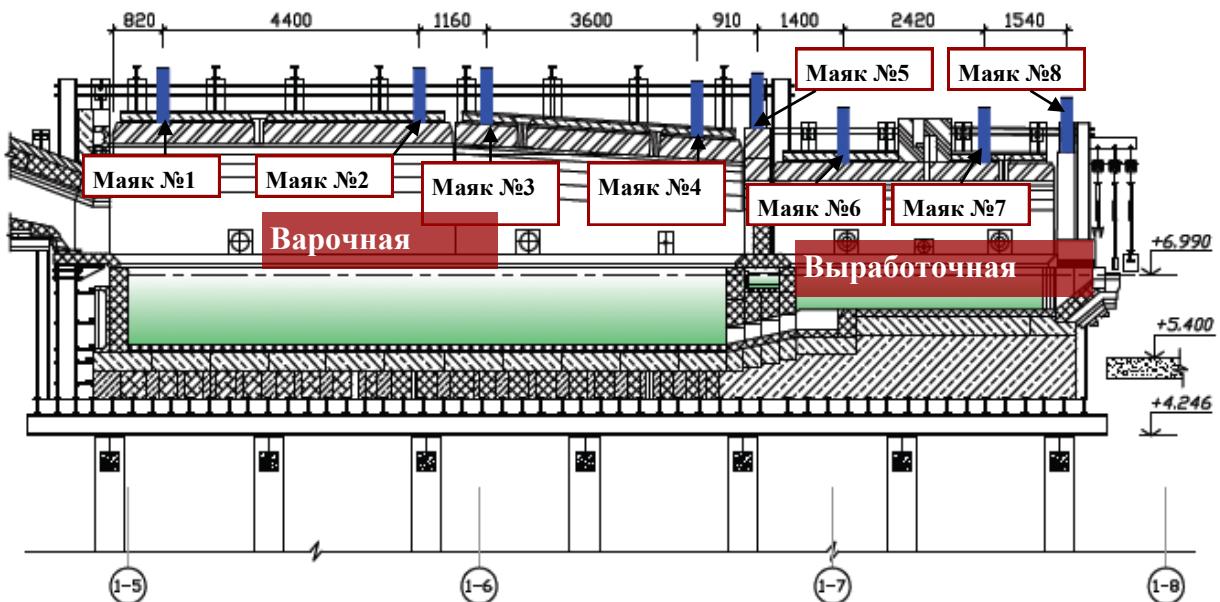


Рисунок 4.8 – Расположение маяков на своде варочной и выработочной частях ванной печи при выводке в ЦППС

Рост свода начинается при $120\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ и продолжается до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (справочные данные). В начале связи поддерживают в ослабленном состоянии, так как при резком росте свода возможен разрыв чрезмерно затянутых связей.



Рисунок 4.9 – Расположение контрольного маяка на наклонной секции главного свода стекловаренной печи

Для проверки справочных данных о линейном расширении динасового огнеупора, на основании зафиксированных показателей построен график зависимости роста свода от температуры в агрегате печи. За шкалу температуры взяты показатели контрольной термопары.

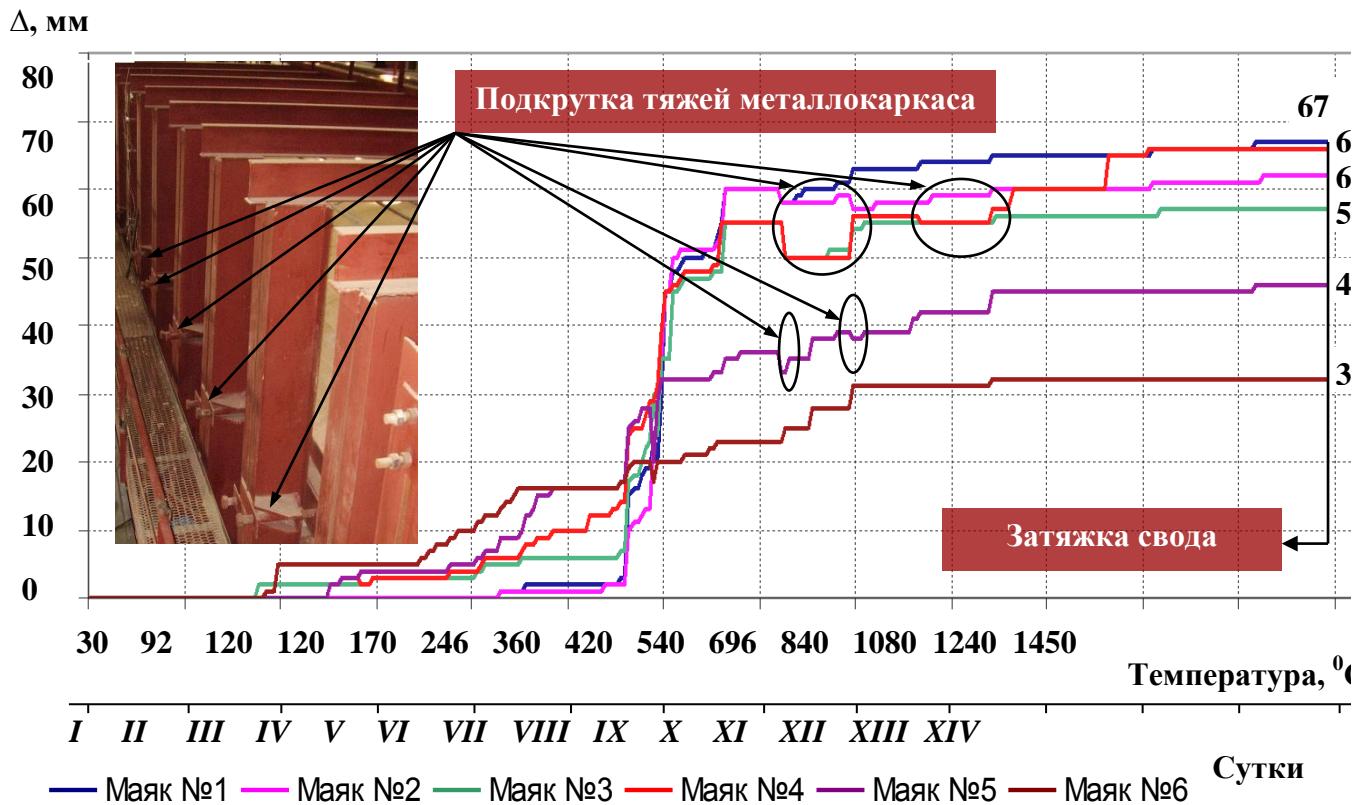


Рисунок 4.10 – График зависимости роста свода от температуры

Из графика (рис. 4.10) видно, что рост свода начался на второй день «выводки» на 41 час после поднятия температуры в пространстве агрегате печи. Рост свода по всем маякам начался при достижении в печи 118–121 °C, плавно по 1–2 мм в час. Резкий скачок роста наблюдался при температуре 300–310 °C по всем контрольным точкам на 10 мм, продолжался около 12 часов. Следующий скачок на 5–7 мм по маякам № 2, 3, 4 произошел при температуре 380 °C. При 820 °C свод увеличился на 4 мм, и при заданной температуре в печи 990 °C наблюдался скачок контрольного маяка № 4 на 5 мм. После достижения максимальных заданных температур по контрольным термопарам была произведена окончательная затяжка свода.

Падение показателей роста свода при температуре 340 $^{\circ}\text{C}$ по маякам № 5 и 6, объясняется ослаблением тяжей, регулирующих распор свода. При 430 $^{\circ}\text{C}$ было произведено ослабление тяжей по всем контрольным точкам кроме маяка № 6. Наибольшее падение роста в 5мм наблюдается у контрольного маяка № 4. Последняя раскрутка тяжей у контрольного маяка № 4 была произведена при температуре в печи 620 $^{\circ}\text{C}$, падение не значительное 1 мм.

Исследования действительного поведения огнеупорного материала свода подтвердили справочные данные о температуре, при которой происходит начальный рост свода. Начало роста свода, в среднем, по всем маякам, начался при 118–121 $^{\circ}\text{C}$. Неравномерность во временном интервале, связана с последовательным наращиванием температуры по длине печи и технологическими особенностями теплового режима. Выявлены основные пики роста огнеупорной кладки свода, насчитывается 3 – первый при $t = 300^{\circ}\text{C}$, второй при $t = 380^{\circ}\text{C}$ и третий при $t = 820^{\circ}\text{C}$. Выяснено, чем больше температура в печи, тем интенсивнее происходит деформация свода. Из графика 4.12 видно, что наименьший прирост огнеупора свода наблюдался в выработочной части печи, где температура ниже почти на 400 $^{\circ}\text{C}$ чем в варочной части печи. Также можно сделать вывод о неравномерности расширения секций свода. После окончательной затяжки свода разность в начале и конце секций, то есть между показателями маяка № 1 и маяка № 2 составила 5 мм, разница между показателями маяков № 4 и № 3 составила 9 мм. Эта неравномерность может быть оправдана нерегулируемым показателем ослабления тяжей металлического каркаса обвязки печи. Полученные показатели и неравномерная динамика роста свода по длине, подтвердили правильность выбора исследуемого объекта. Исследуемый объект находился между контрольными точками № 3 и № 4, где зафиксированы наибольшие перепады Δ по длине секции и деформации свода во время роспуска тяжей.

Распор свода является важнейшей составляющей при сборе нагрузок при создании расчетной схемы каркаса печи, поэтому ценность полученных результатов заключается в определении зависимости температурного режима

печи и роста свода, получением численных показателей роста свода, пиковых значений роста свода, закономерностей регулировки тяжей металлического каркаса обвязки технологами цеха по обслуживанию печи. Учет этих факторов в расчетной схеме каркаса позволит, помимо определения экстремальных напряжений от распора свода, дать рекомендации по своевременной регулировки тяжей в процессе «выводки» печи в рабочее состояние.

4.3.3. Определение деформаций.

Объектом экспериментальных исследований принята конструкция колонны обвязки ванной печи ЦППС.

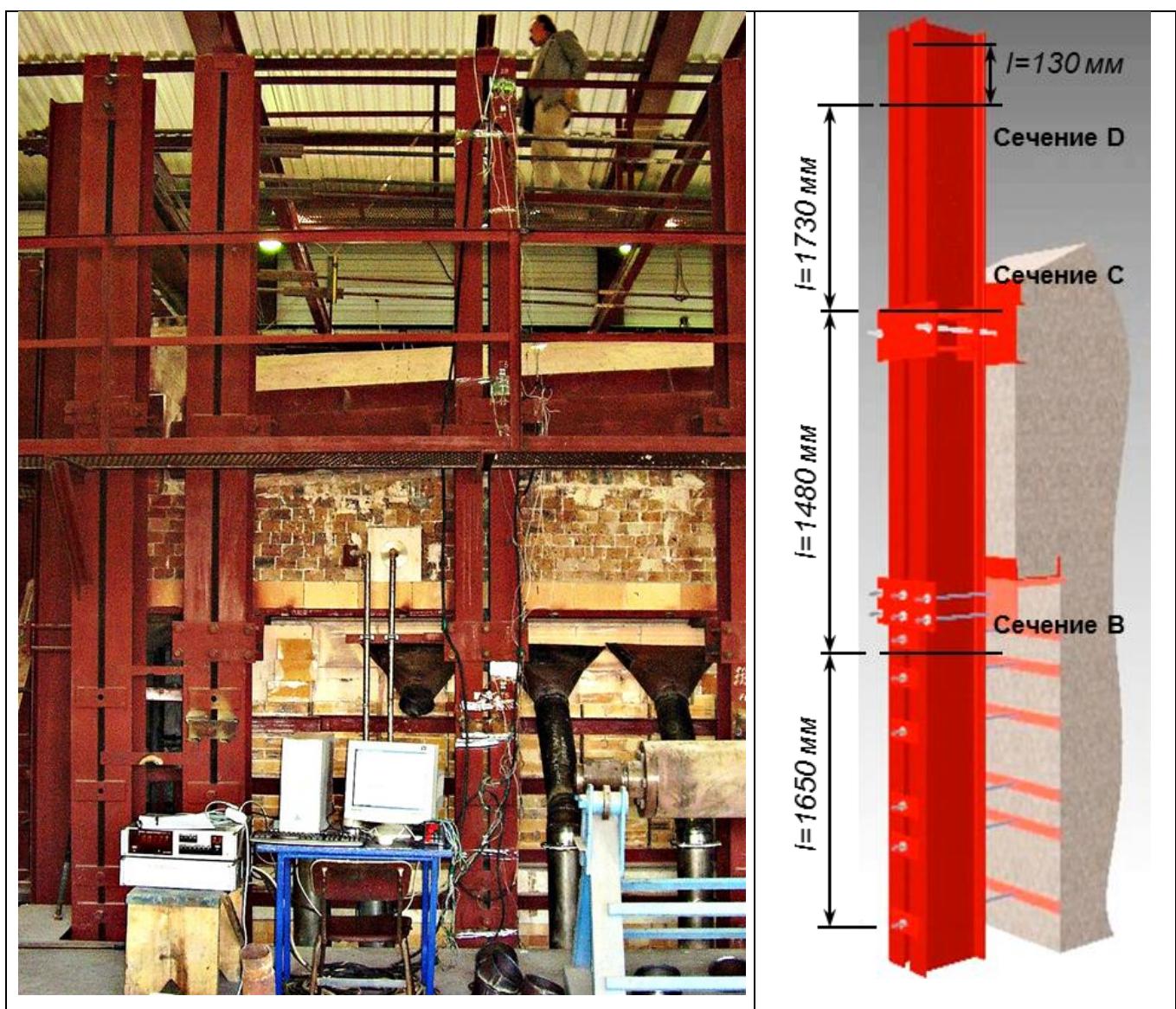


Рисунок 4.11 – Общий вид проведения исследований

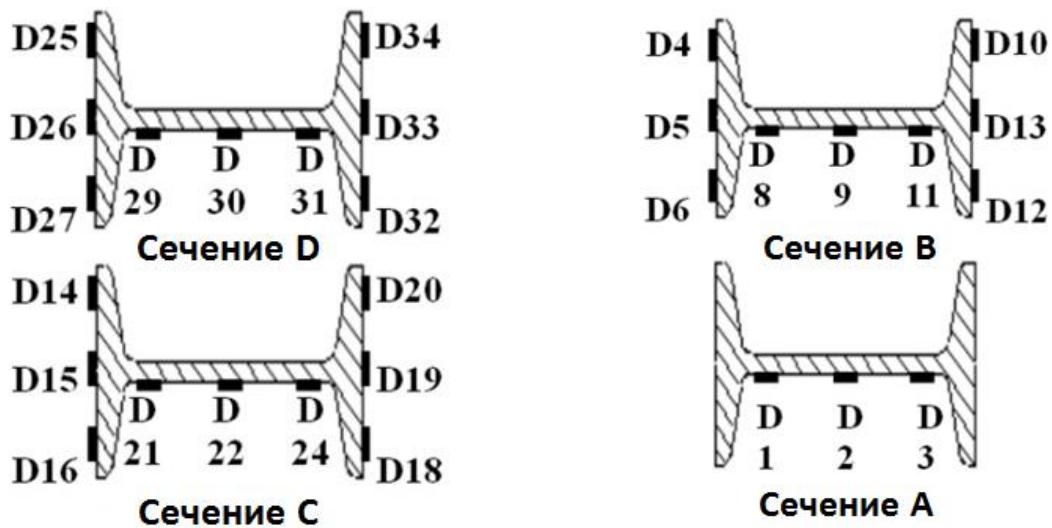


Рисунок 4.12 – Схема установки тензодатчиков по сечениям

Колонна состоит из 2-х двутавров спаренных между собой соединительными планками. Конструкция колонны представлена на рис. 4.11.

Деформации определялись тензометрическим методом с помощью системы измерительной тензометрической на 100 каналов измерения. Для измерения деформаций при испытаниях использовались проволочные петлевые тензодатчики сопротивления с базой 20 мм на бумажной основе (марки ПКБ с электрическим сопротивлением $R = 200,1 \pm 0,3$ Ом).

Для наклейки тензодатчиков использовался термостойкий клей «Denex» с рабочим диапазоном температур до 204°C и коэффициентом линейного удлинения 1 %. Для проверки тензочувствительности и цены деления датчиков выполнена их контрольная тарировка на эталонной консольной балке. Средняя цена деления датчиков составила $C = 0,342$ МПа или $C = 3,42$ кгс/см². Исследования проводились в 4-х сечениях по высоте колонны. Показания снимались каждый час на протяжении 14 суток.

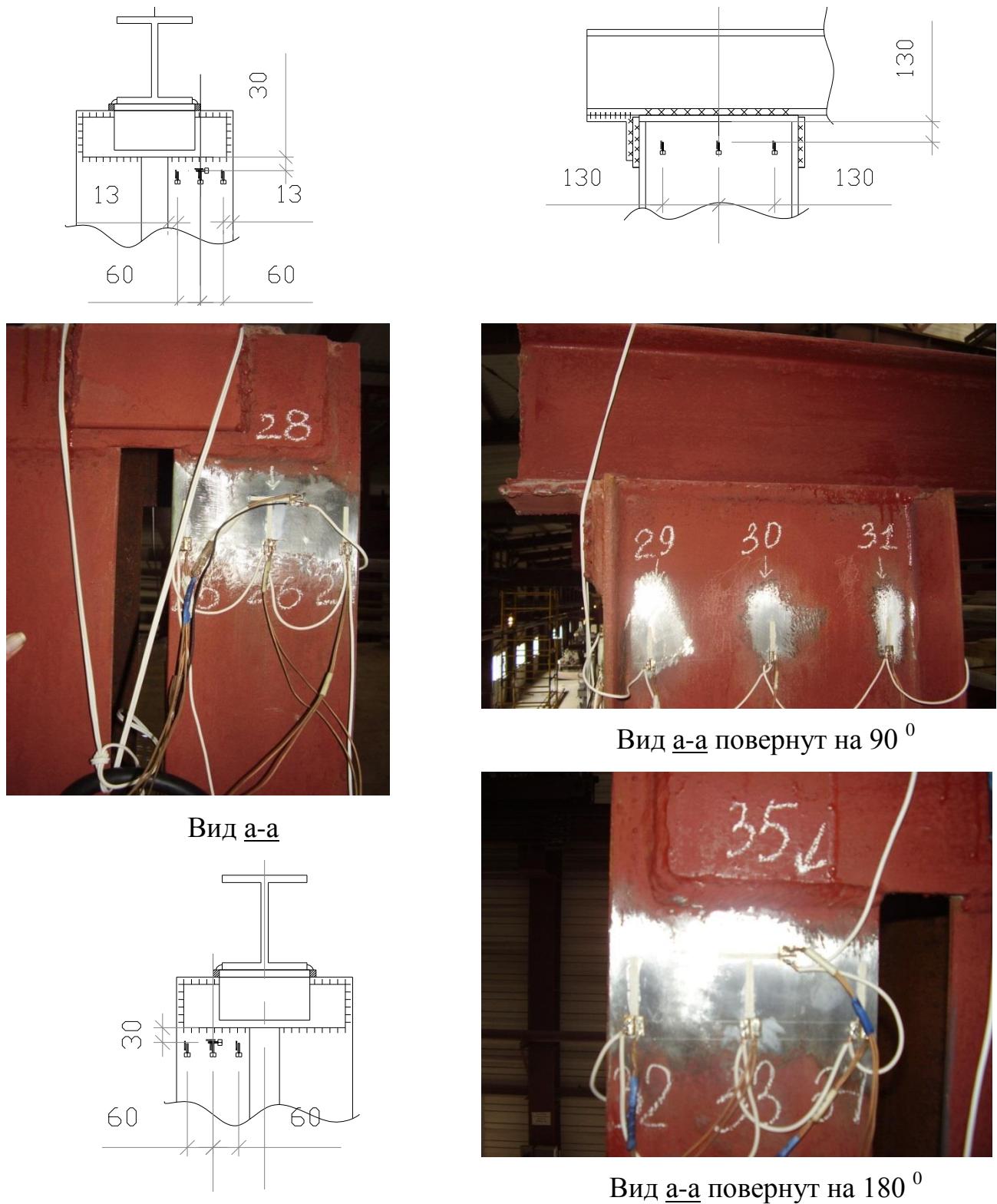


Рисунок 4.16 – Расклейка тензодатчиков в сечении «D»

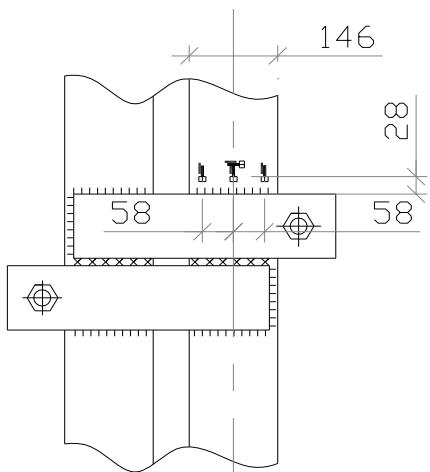
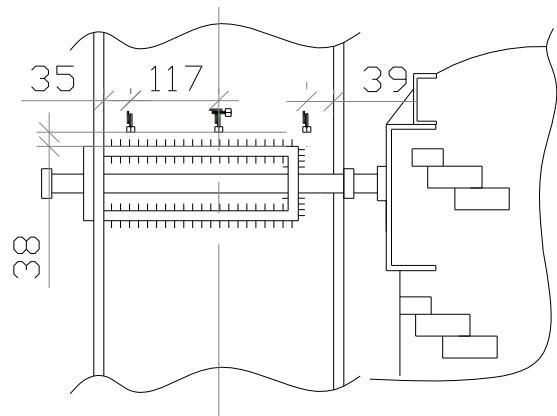
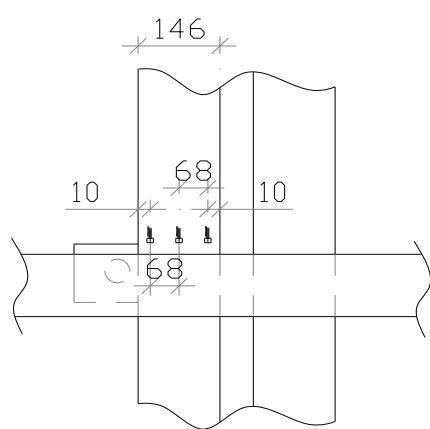
Вид а-аВид а-а повернут на 90°Вид а-а повернут на 180°

Рисунок 4.17 – Расклейка тензодатчиков в сечении «С»

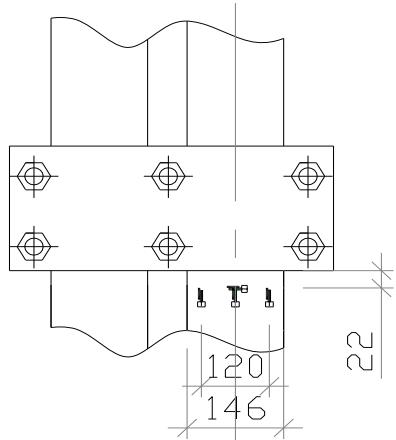
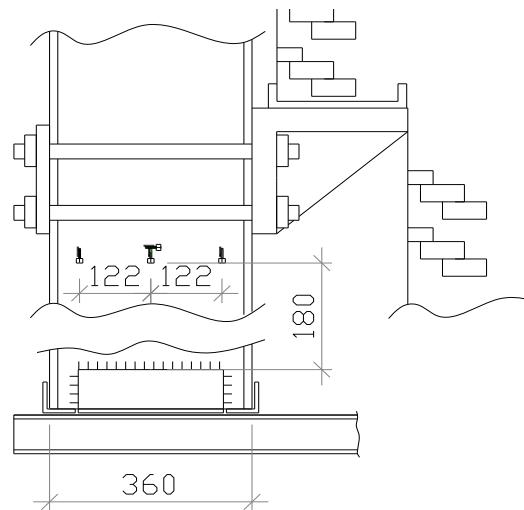
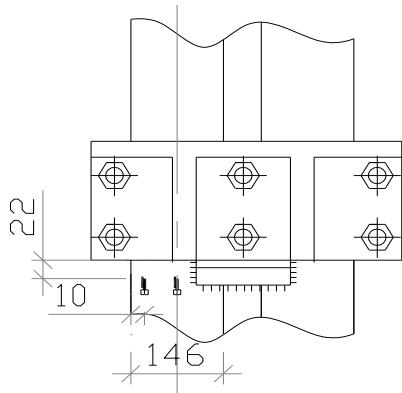
Вид a-aВид a-a повернут на 90°Вид a-a повернут на 180°

Рисунок 4.18 – Расклейка тензодатчиков в сечении «В»

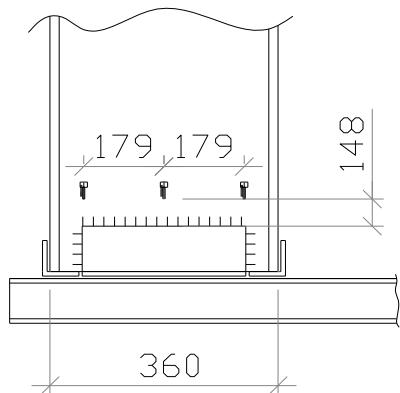


Рисунок 4.19 – Расклейка тензодатчиков в сечении «А»

4.2.5. Определение температурных воздействий

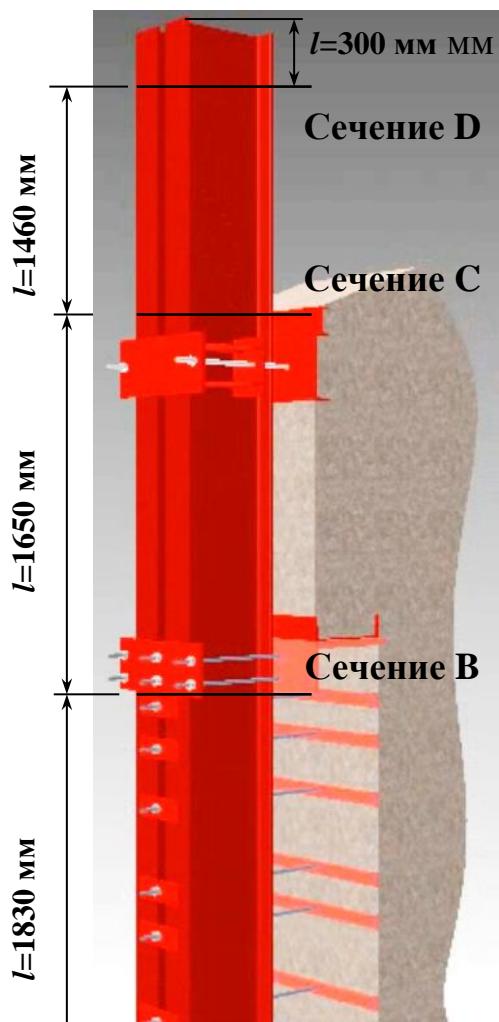


Рисунок 4.20 – Схема установки термопар

Температура на металле колонны измерялась в трех сечениях 6 термопарами при помощи системы автоматического контроля технологических процессов программы «Owen Process Manager v.2.0a». Она позволила осуществить сбор, отображение и архивирование данных, поступающих от приборов ОВЕН на ПК.

Организация интерфейса связи приборов с ПК

Перед началом работы с ОПМ v.2.0a прибор ОВЕН был подключен к свободному СОМ-порту ПК через соответствующий адаптер интерфейса. Схема подключения прибора к ПК показана на рис. 4.23. Достоинства программы «Owen Process Manager v.2.0a»: отображение значений параметров приборов в виде графиков;

установка периода опроса для каждого параметра в отдельности; архивирование в реальном времени значений параметров приборов с заданной периодичностью; просмотр архива измерений за любой промежуток времени в табличном и графическом виде с помощью программы Owen Report Viewer v.2.0a.

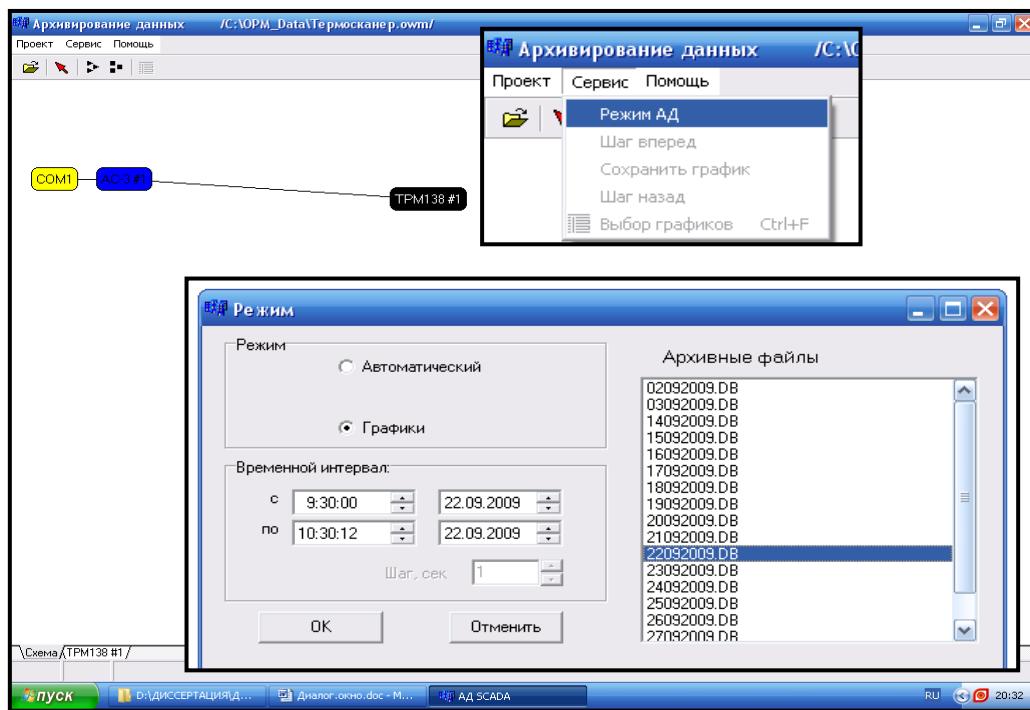


Рисунок 4.23 – Выбор параметров просмотра результатов данных с помощью программы «Owen Report Viewer v.2.0a.» в архиваторе данных

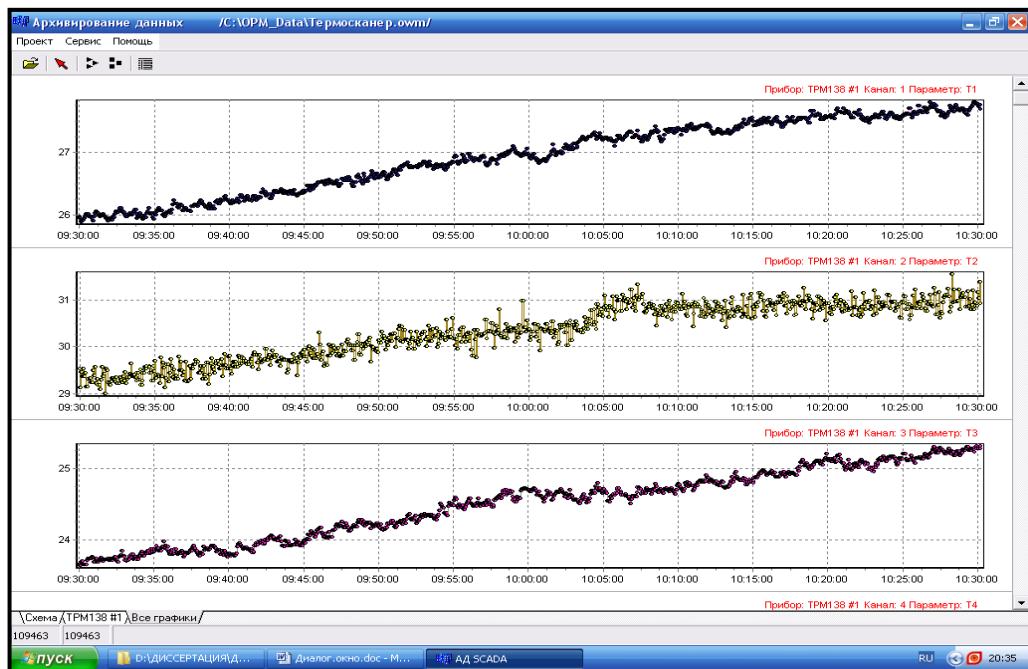
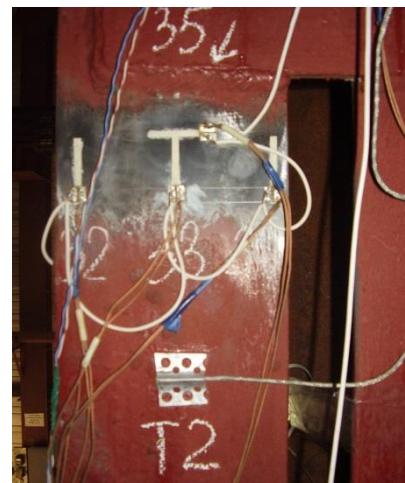
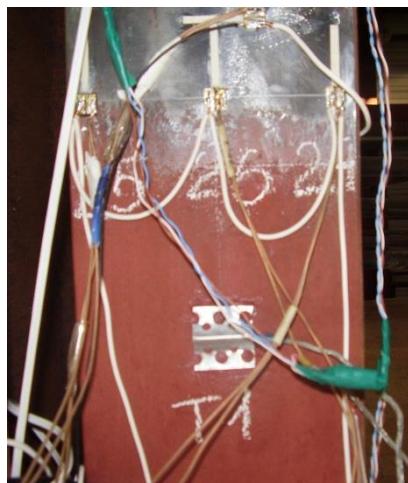


Рисунок 4.24 – Просмотр архивных данных по термопарам Т1-Т3 за период 1 час



Расположение термопар на колонне Сечение D



Расположение термопар на колонне Сечение C



Расположение термопар на колонне Сечение B

Рисунок 4.26 – Установка термопар по сечениям

Измерение температуры на металле конструкций днища велись при помощи инфракрасного термометра с лазерным указателем. Измерения проводились в двух пролетах в каждом шаге опорных столбов.

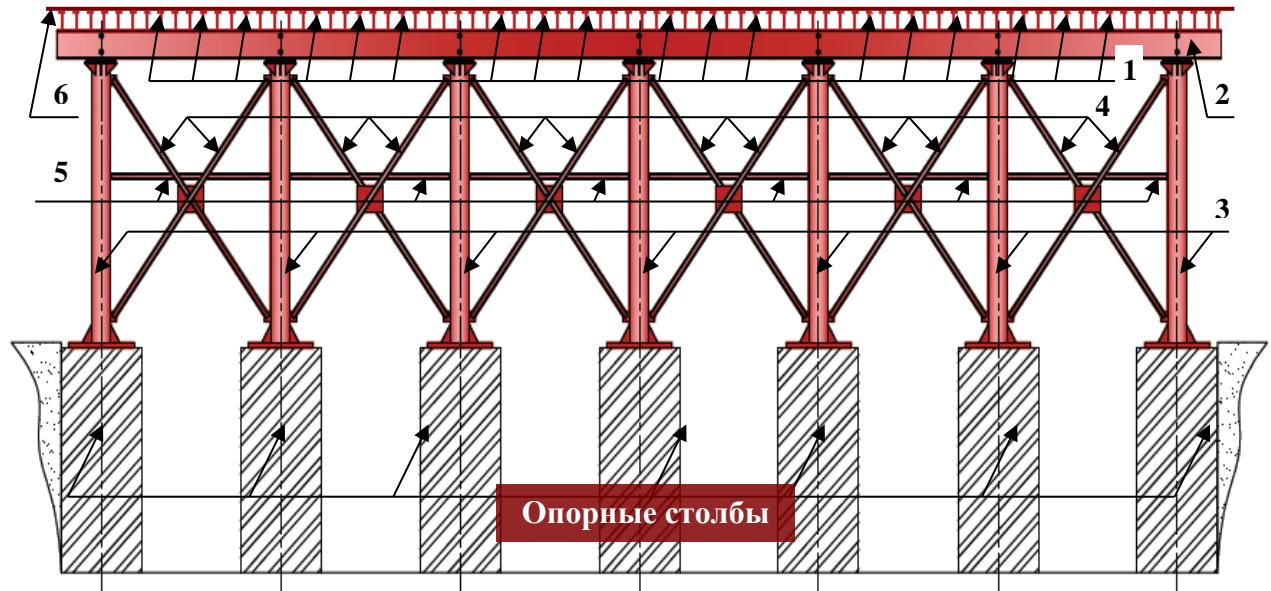


Рисунок 4.27 – Конструктивная схема днища стекловаренной печи (продольный разрез): 1 – продольные балки; 2 – поперечные балки; 3 – колонны днища; 4 – продольные связи; 5 – площадки для обслуживания; 6 – металлический плоский лист

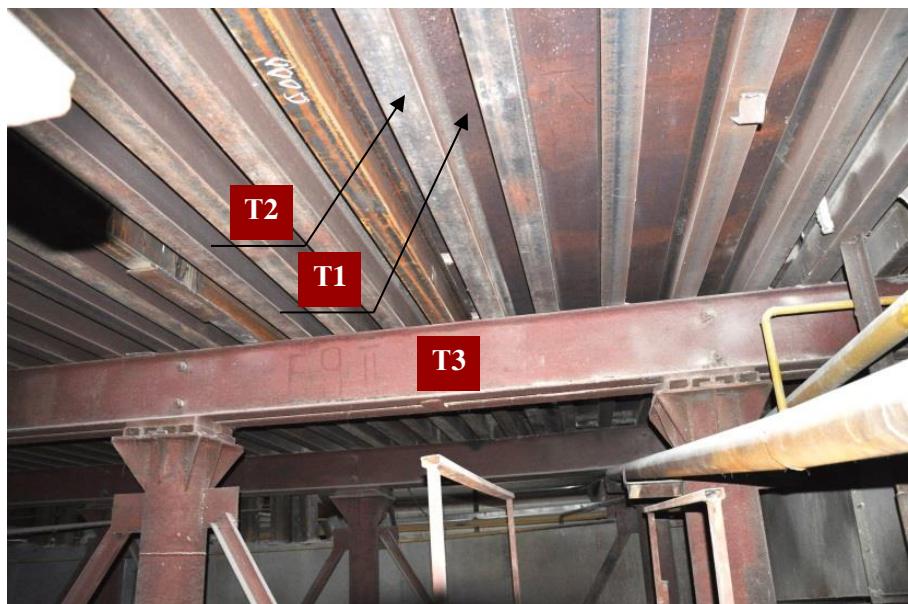


Рисунок 4.28 – Точки контроля температуры днища

Для контроля были выбраны точки (рис. 4.28):

- средняя зона нижних полок поперечных балок днища, расположенных в центре пролета;
- центральная точка на стенке продольной балки днища со стороны оси печи;
- лист в центре пролета в каждом шаге продольных балок.

Измерение температуры на металле конструкций днища велись при помощи инфракрасного термометра с лазерным указателем Metertmen IR608, действующего в диапазоне температур от -18°C до 400°C , погрешностью 2°C . Измерения проводились в двух пролетах в каждом шаге опорных столбов.

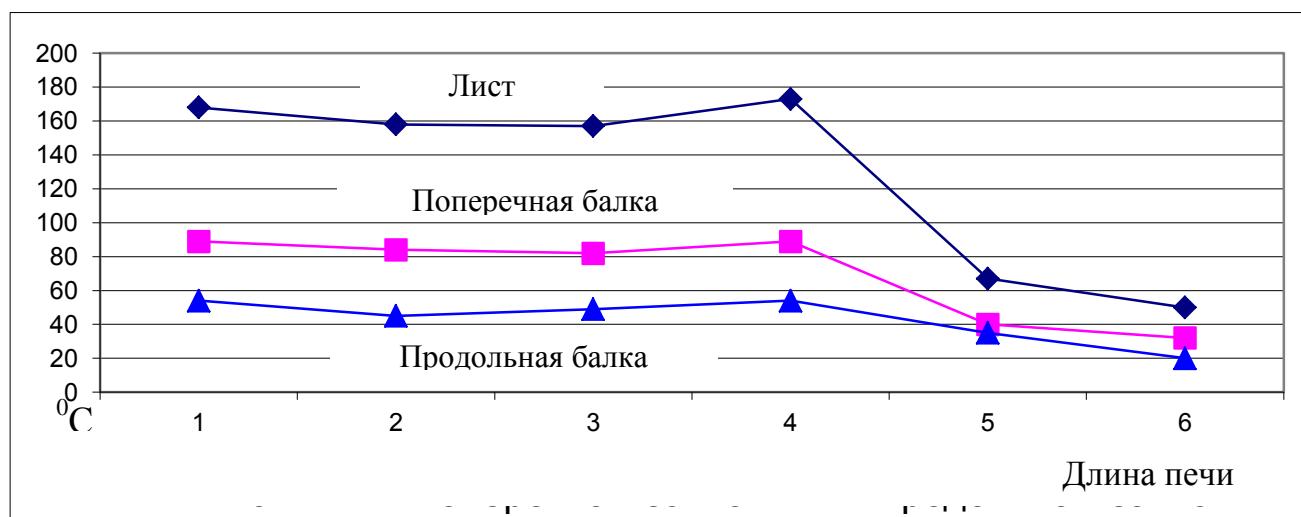


Рисунок 4.29 – Температурные показатели конструкций днища печи

Для контроля были выбраны следующие контрольные точки: ТК1 – лист в центре пролета в каждом шаге продольных балок; ТК2 – средняя зона нижних полок поперечных балок днища, расположенных в центре пролета; ТК3 – центральная точка на стенке продольной балки днища со стороны оси печи.

Показатели по температуре постепенно возрастают в варочной части и снижаются в выработочной части печи. Максимальные параметры температуры составляют: $+177^{\circ}\text{C}$ на металле листа (ТК1), $+92^{\circ}\text{C}$ на нижних гранях полок поперечных балок (ТК2), $+63^{\circ}\text{C}$ на продольных балках (ТК3). Максимальная разница температур по пролетам несущих колонн конструкции днища составляет: лист $\pm 14^{\circ}\text{C}$; поперечные балки $\pm 8^{\circ}\text{C}$; продольные балки $\pm 11^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальные исследования температурных показателей отличаются от теоретических на 5–10 %, это объясняется некоторыми факторами. В

некоторых случаях огнеупоры, отвечающего требованиям одного и того же стандарта, но изготовленные на разных заводах, различаются по теплопроводности в зависимости от особенностей технологии и месторождения сырья. В процессе длительной службы в условиях примерно постоянных температур теплопроводность всех огнеупорных изделий повышается на 10 – 15 %. Выводка печи в рабочий режим осуществляется по методу «насухо», загрузка шихты через загрузочный карман в рабочую камеру начала осуществляться при достижении 1540°C . Наварка стекломассы осуществлялась строго по графику «Наварки стекловаренной печи по производству прокатного стекла». Количество стекломассы в бассейне до начала наварки составляло – 24,3 т (уровень расплава – 166,4 мм). Первые 4 дня загружения в печь поступали по 1,6 т., затем по 0,685 т до полного наполнения ванны бассейна. Окончательные показатели составили: $g_{\text{ст}} = 208,4$ т, $h_{\text{ст}} = 1,2$ м.

Достоинством проведенных комплексных экспериментальных исследований является и то, что все снятия показаний осуществлялись в одном интервале времени с периодичностью в 1 час.

4.4. Обработка результатов исследований

При обработке результатов экспериментальных исследований выявлены изгибающие моменты (M_z) из плоскости рамы.

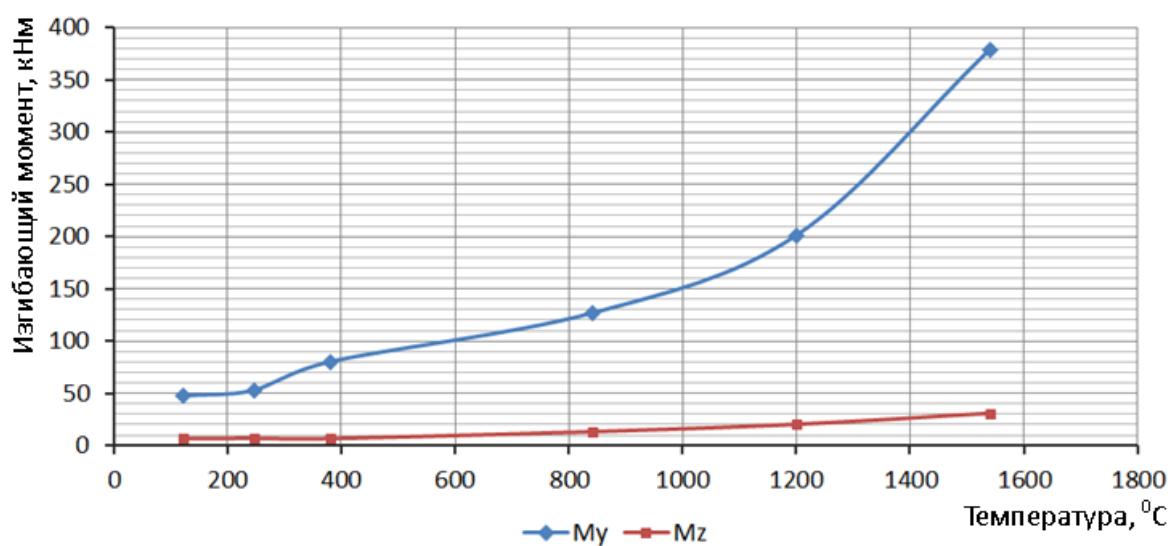


Рисунок 4.30 – Значения изгибающих моментов в сечении «В»

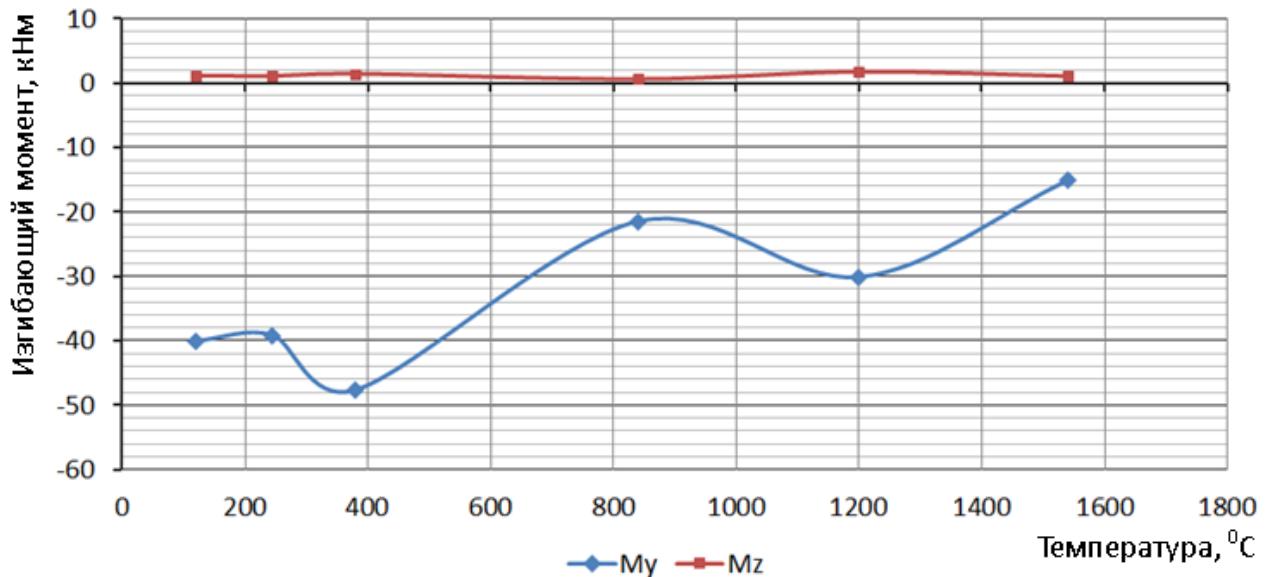


Рисунок 4.31 – Значения изгибающих моментов в сечении «D»

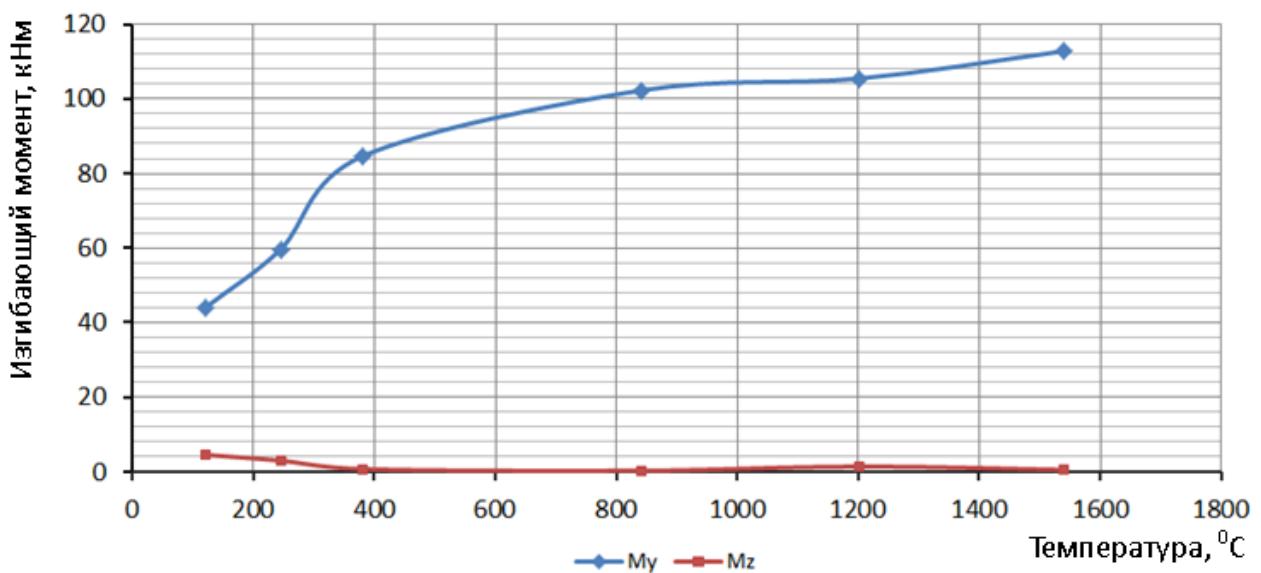


Рисунок 4.32 – Значения изгибающих моментов в сечении «C»

4.5. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений моментов показал хорошее совпадение результатов исследования. Расхождения составляют менее 1,5%. В таблице 4.1 приведены сравнительные показатели изгибающих моментов численных и экспериментально полученного массива данных при учёте различных температурных режимов.

Таблица 4.1 – Сравнительные показатели изгибающего момента в сечении С при температурных режимах

№ РСН	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Изгибающий момент в плоскости рамы, кНм		$\Delta, \%$
		Экспериментальные значения	Расчетные значения	
1	2	3	4	5
2	120	5.72	5.8	1.40
3	245	22.34	22.6	1.16
4	380	51.34	51.9	1.09
5	840	102.28	103.32	1.02
6	1200	105.45	106.21	0.72
14	1540	112.82	112.75	0.06

По результатам экспериментальных исследований, подтвержденных теоретическим анализом (сходимость 99 %), подтверждена высокая эффективность использования в системе каркаса обвязки тяжей-компенсаторов, снижающих крутящий момент в колонне.

4.6. Выводы по результатам IV-го раздела

1. В результате экспериментальных исследований на натурном объекте при введении его в эксплуатацию уточнены параметры технологического режима и произведена корректировка входных данных при создании расчетных сочетаний нагрузок в расчетной схеме стекловаренной печи.

2. Уточнены температуры эксплуатации внутривечной среды, установлена температура поверхности металлоконструкций, исследована динамика роста свода из огнеупорного материала, установлено неравномерное расширение секций свода и максимальный подъем составил: $\Delta h_{\text{эк.}} = 67$ мм.

3. По результатам экспериментальных исследований, подтвержденных теоретическим анализом (сходимость 99 %), подтверждена высокая эффективность использования в системе каркаса обвязки тяжей-компенсаторов, снижающих крутящий момент в колонне. Получены значения изгибающих моментов в плоскости рамы при учёте различных температурных режимов, при этом максимальное значение составляет 113 кНм на температурной площадке 1540 $^{\circ}\text{C}$.

РАЗДЕЛ V. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ОБВЯЗКИ ПЕЧИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ СВОДА

Отличительной особенностью предложенной методики от традиционной являются подходы к расчету несущей способности конструкций с возможностью управления напряженно-деформированным состоянием системы, основанные на:

- расчете несущей способности колонн каркаса при снятии в них напряжений с помощью «тяжей-компенсаторов» с помощью своевременного регулирования и соответствующего центрирования колонны, включение тяжей с температурными графиками (площадки стационарного температурного режима);
- учета разности перепада температур в различных температурных блоках свода, что позволяет произвести уточненный расчёт несущих конструкций колонн каркаса для каждой температурной площадки этапов ввода печи в эксплуатацию;
- сохранении допустимого значения эксцентриситета продольной силы в своде при нагреве при учете изменчивости средней линии свода с увеличением стрелы подъема при учете переменного значения коэффициента температурного расширения огнеупорной кладки свода при его переменных значениях для заданных температурных интервалов.

5.1. Напряженно-деформированное состояние свода

Наиболее деформируемой частью печи является её свод. Кирпичный свод является распорной конструкцией. Основными нагрузками свода являются собственный вес и температура. Поскольку по производственной технологии нагрев печи осуществляется длительное время с площадками выдержки, то температура рассматривается одинаковой как на внутренней, так и на наружной

гранях. Конструкция свода рассматривается как внецентренно нагруженный элемент. При нагреве изменяется средняя линия свода с увеличением стрелы подъема. При этом увеличивается эксцентриситет приложения продольной нагрузки. Бесконтрольное повышение температуры неизбежно приведет к разрушению свода. Для сохранения допустимого значения эксцентриситета продольной силы в своде, распор регулируется опорными металлическими элементами рамы обвязки печи. Таким образом, задачей этого раздела является определение оптимальных температур свода, при которых требуется осуществление отпуска опор свода.

Таблица 5.1 – Основные свойства материала свода марки Д1 (ГОСТ 3910-75)

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Марки камня по прочности	M200
2	Коэффициент Пуассона	0,09
3	Модуль упругости	$0,93 \times 10^6$ МПа
4	Удельный вес	23,7 кН/м ³

При нагреве модуль деформации резко снижается, происходит «размягчение» огнеупорного материала. Температура размягчения для динасовых изделий составляет (массовая доля SiO_2 не менее 95 %) $1\,650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальное значение рабочей (технологической) температуры $1\,540\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее рассматривается постоянное значение модуля упругости со значением, описанным выше в таблице 5.1 [53].

При нагреве формованные огнеупорные изделия из динаса имеют переменный коэффициент температурного расширения, который зависит от интервала температур [67].

Таблица 5.2 – Коэффициенты температурного расширения в зависимости от интервала температур

№ п/п	Интервал температур, градус	Коэффициент температурного расширения $\alpha, 10^{-5}$
1	0–380	3,2
2	380–1000	1,7
3	1 000–1 540	1,15

Термическое расширение динаса характеризуется рядом особенностей, обусловленных модификационными эффектами. В расчетах принимается для интервала температур с соответствующим значением коэффициента температурного расширения.

Интервалы температур выбраны по результатам дискретизации диаграммы изменения коэффициента линейного расширения динасовых изделий при повышении температуры. В таблице 5.2 представлены коэффициенты температурного расширения (а) для трех характерных интервалов температурного режима эксплуатации. Дискретные участки приняты по принципу равенства приращения на предыдущем и последующем участках.

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 кладки происходит их конденсация. Последствием взаимодействия жидкой фазы с огнеупором является образование свищей и каверн. В результате развития этого процесса в своде по швам кладки образуются сквозные прогары, для устранения которых требуется проведения ремонтных работ. Отсюда вытекают повышенные требования к геометрии изделий и первичному нагреву кладки (регулирование связей свода для компенсации усилий сжатия, которому подвергаются огнеупорные изделия при первичном нагреве кладки). Кладка секций ведется вперевязку с использованием прямых и клиновых кирпичей (стеновая сборка свода). При этом камни притираются и шов минимальный. При работе свода по всей поверхности камня обеспечивается соприкосновение. Кладка сводов произведена после затяжки связей каркаса. Шов не имеет прослойки (слоя раствора), которая под нагрузкой вызывает растягивающие напряжения в кирпиче, что приводит к его разрушению. И чем ниже прочность раствора, тем меньше расчетное значение прочности кладки на сжатие. Так как основная зависимость прочности кладки связана с прочностью её компонентов, а именно прочности огнеупора и прочности раствора, в расчетах принимается условно с раствором марки по прочности, соответствующий марки огнеупора М200. Таким

образом, сопротивление каменной кладки на сжатие [121] определяется как:

$$R^H = A \cdot R_1 \left(1 - \frac{a}{b + \frac{R_2}{2 \cdot R_2}} \right), \quad (5.1)$$

где $R_1=200$ кг/см², прочность кирпича на сжатие; $R_2=200$ кг/см², прочность раствора на сжатие; A – конструктивный коэффициент, зависящий от прочности и вида камня:

$$A = \frac{100 + R_1}{100 \cdot m + n \cdot R_1}, \quad (5.2)$$

В таблице 5.3 приведены значения эмперических коэффициентов, зависящих от вида кладки.

Таблица 5.3 – Коэффициенты к формулам 1 и 2 [18, с. 50]

Эмперические коэффициенты, зависящие от вида кладки			
m	n	a	b
1.25	3.0	0.2	0.3

$$R^H = 0,413 \cdot 200 \cdot \left(1 - \frac{0,2}{0,3 + 0,5} \right) = 61,95 \text{ кг/см}^2.$$

Расчетное сопротивление кладки на сжатие равно $R=R_h/2=3\,100$ кПа. В соответствии с действующими нормами на проектирование каменных и армокаменных конструкций [140] условие прочности внецентренно сжатого кирпичного элемента имеет вид:

$N \leq m_g \cdot \phi_I \cdot R \cdot A_c \cdot \omega$ [19, формула 7.4] для прямоугольного кирпичного элемента 1 000×300 (h) мм, условие прочности имеет вид:

$$N \leq m_g \cdot \phi_I \cdot R \cdot A \cdot \left(1 - 2 \frac{e}{h} \right) \cdot \omega, \quad (5.3)$$

где m_g – коэффициент, определяемый по формуле 7.7 [140], R – расчетное сопротивление кладки; A – площадь сечения элемента; h – высота сечения в плоскости действия изгибающего момента; e_0 – эксцентриситет расчетной силы N относительно центра тяжести сечения; ϕ_I – коэффициент продольного изгиба: $\phi_I=(\phi+\phi_c)/2$, где ϕ – коэффициент продольного изгиба для всего сечения в

плоскости действия изгибающего момента, определяемый по расчетной высоте элемента l_0 ; ϕ_c – коэффициент продольного изгиба для сжатой части сечения, определяемый по фактической высоте элемента H в плоскости действия изгибающего момента при отношении: $\lambda_{hc} = H/h_c$ или гибкости: $\lambda_{ic} = H/i_c$, где h_c и i_c – высота и радиус инерции сжатой части поперечного сечения Hc в плоскости действия изгибающего момента. Для прямоугольного сечения: $h_c = h - 2e_0$.

Внутренние усилия в своде определяются как для шарнирно оперты арки. Расчетная схема свода приведена на рисунке 5.1. На рисунке 5.2 представлено расчетное сечение свода толщиной 300 мм.

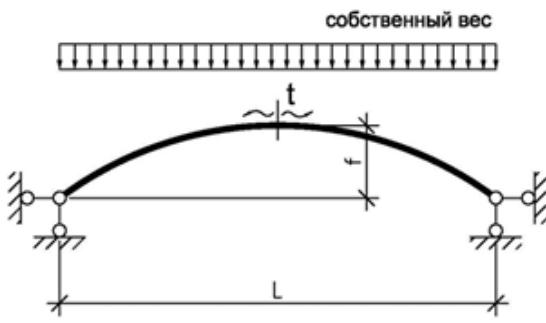


Рисунок 5.1 – Расчетная схема
свода печи

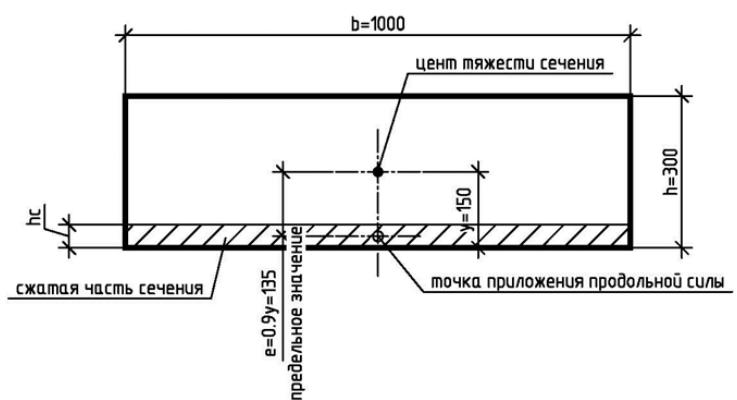


Рисунок 5.2 – Расчетное сечение свода

В работе рассматриваются своды пролетом от 4,2 до 7,1 м. При этом отношение пролета к стреле прогиба сохраняется одинаковым, согласно экспериментальной схеме $L/f = 7.4$.

Расчет внутренних усилий выполняется методом конечных элементов. Расчет выполняется по двум загружениям:

- первое загружение – собственный вес;
- второе загружение – температура.

При этом шаг температурной нагрузки n принят 5^0C . Рассматривались отдельные модели, для каждого расчетного значения коэффициента температурного расширения и для каждого пролета. Рассмотрена 21 модель, полученные результаты внутренних усилий проверялись по условию прочности

на внецентренное нагружение и определялась температура, при которой в своде возникало предельное состояние. Ограничением является эксцентризитет, который не должен превышать условие $e < 0,9y = 0,9 \times 150 = 135$ мм, схема к определению представлена на рисунке 5.2, а продольная сила не более чем правая часть условия прочности (формула 5.3).

По результатам расчета (табл. 5.4) получены зависимости температуры отпуска опор свода от пролета свода (L). Графики построены для трех характерных интервалов температур технологического процесса. Определены температуры возникновения предельного состояния в кладке свода, при которых требуется включение механизма регулирования.

На рисунке 5.3 представлен график зависимости температуры роспуска опоры свода в зависимости от пролета свода. Основным критерием для построения данного графика является достижение предельного состояния в кладке.

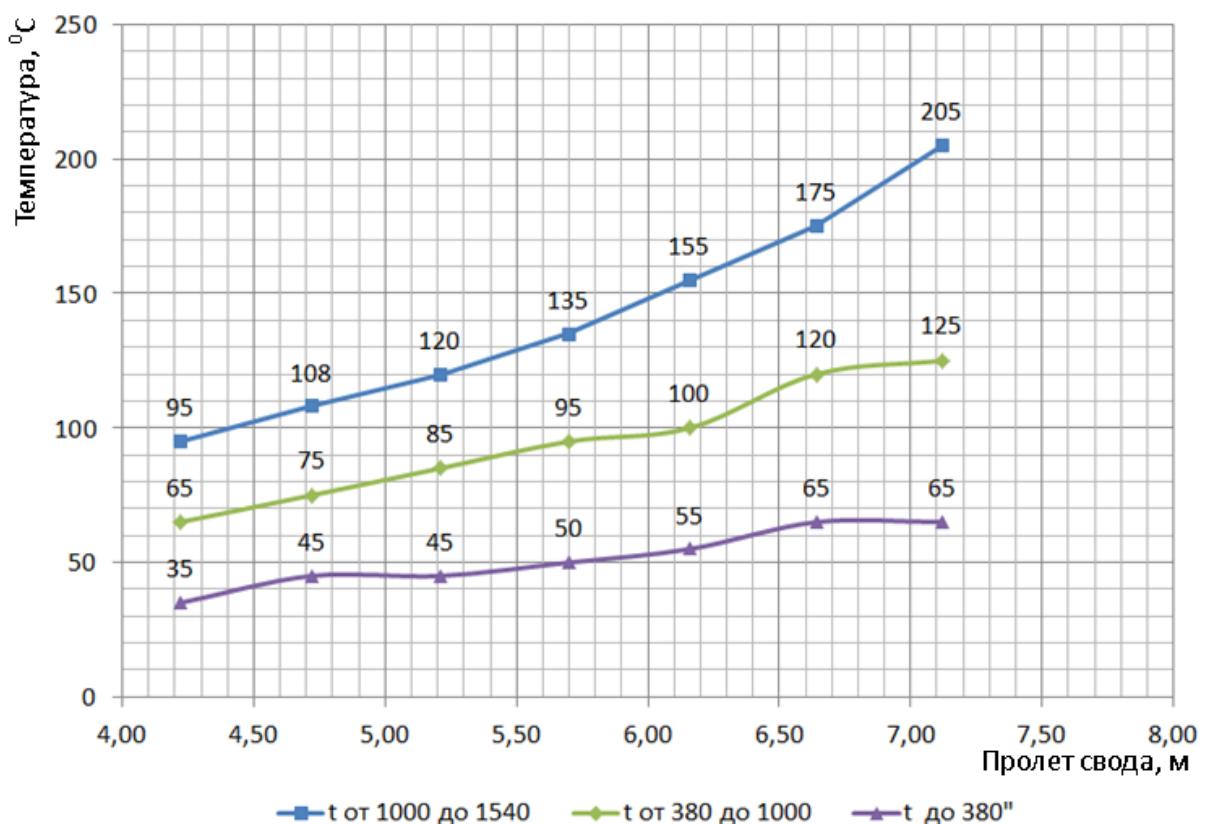


Рисунок 5.3 – График зависимости температуры роспуска тяжей от пролета свода

Таблица 5.4 – Частные значения температур роспуска тяжей свода при соотношении $L/f = 7,4$

№ п/п	Пролет, м	Собственный вес		Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент температурного расширения* 10^{-5}	Нагрев		Суммарные усилия		Экспентризитет приложения N, м	Температура открытия
		N, кН	M, кНм			N, кН	M, кНм	N, кН	M, кНм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	4,22	42,33	1,66	1 000–1 540	1,15	27	10,12	69,33	8,46	0,122	95
				380–1 000	1,7	27,31	10,23	69,64	8,57	0,123	65
				до 380	3,3	27,685	10,38	70,015	8,72	0,125	35
3	4,72	43,52	1,39	1 000–1 540	1,15	20,19	9,55	63,71	8,16	0,128	108
				380–1 000	1,7	20,505	9,655	64,025	8,265	0,129	75
				до 380	3,3	10,42	8,485	53,94	7,095	0,132	45
4	5,21	44,1	1,21	1 000–1 540	1,15	14,74	8,58	58,84	7,37	0,125	120
				380–1 000	1,7	15,445	8,72	59,545	7,51	0,126	85
				до 380	3,3	15,36	8,945	59,46	7,735	0,130	45
5	5,7	44,27	1,09	1 000–1 540	1,15	11,47	8,05	55,74	6,96	0,125	135
				380–1 000	1,7	11,935	8,37	56,205	7,28	0,130	95
				до 380	3,3	11,78	8,29	56,05	7,2	0,128	50
6	6,16	44,2	1,03	1 000–1 540	1,15	9,35	7,78	53,55	6,75	0,126	155
				380–1 000	1,7	9,772	8,125	53,972	7,095	0,131	100
				до 380	3,3	9,285	7,78	53,485	6,75	0,126	55
7	6,64	44,02	1,01	1 000–1 540	1,15	7,84	7,68	51,86	6,67	0,129	180
				380–1 000	1,7	7,912	7,759	51,932	6,749	0,130	123
				до 380	3,3	7,896	7,7174	51,916	6,7074	0,129	65
8	7,12	43,68	1,05	1 000–1 540	1,15	6,53	7,46	50,21	6,41	0,128	205
				380–1 000	1,7	7,722	7,566	51,402	6,516	0,127	120
				до 380	3,3	8,1479 ₂	7,7305 ₆	51,83	6,68	0,129	65

На рисунке 5.5 представлено моделирование процесса стабилизации напряжений в кладке свода по найденным значениям температуры роспуска тяжей в трех интервалах температурного режима. График на рисунке 5.5

демонстрирует рост нормального напряжения в кладке при нагреве и снижение напряжения при ослаблении опор свода. При этом постоянной величиной напряжения 208 кПа является напряжение от собственного веса кладки без учета температуры.

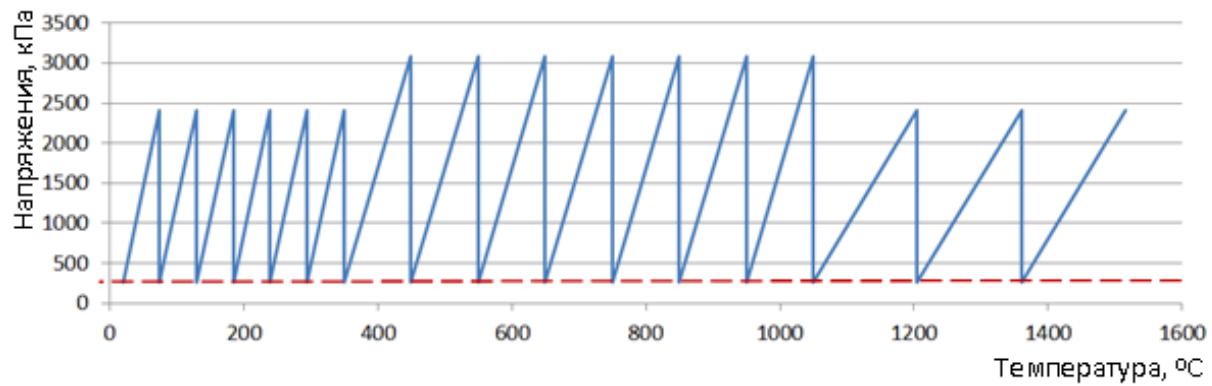


Рисунок 5.5 – График оценки уровня напряжения в кладке свода пролетом $L=7,12$ м при соотношении $L/f=7,4$

Практическая ценность полученных результатов – возможность быстрого подбора параметров свода, а именно пролета и температуры отпуска опор свода. Для практического применения в период ввода печи в эксплуатацию для регулирования опор пят свода в период наращивания температурного режима найдены количественные значения параметров отпуска тяжей. Количество витков n_6 , необходимого отпуска тяжей определяется как $\Delta l/2\pi D$. В таблице 5.5 представлены значения количества витков n_6 , необходимого для стабилизации напряжений в своде с учетом его пролета L в температурном интервале.

Для возможности визуальной оценки напряженно-деформированного состояния свода определены предельно допустимые значения перемещения кладки свода в замке (Δh), в соответствии с определенным температурным интервалом при соответствующем коэффициенте температурного расширения кладки свода для пролетов от 4,2 до 7,2 м, для последнего подъем свода по средним значениям не должен превышать 20,5 мм. На графике 5.6 приведены усредненные значения Δh , полученные расчетным путем в соответствии с определенным температурным интервалом при соответствующем коэффициенте температурного расширения кладки свода.

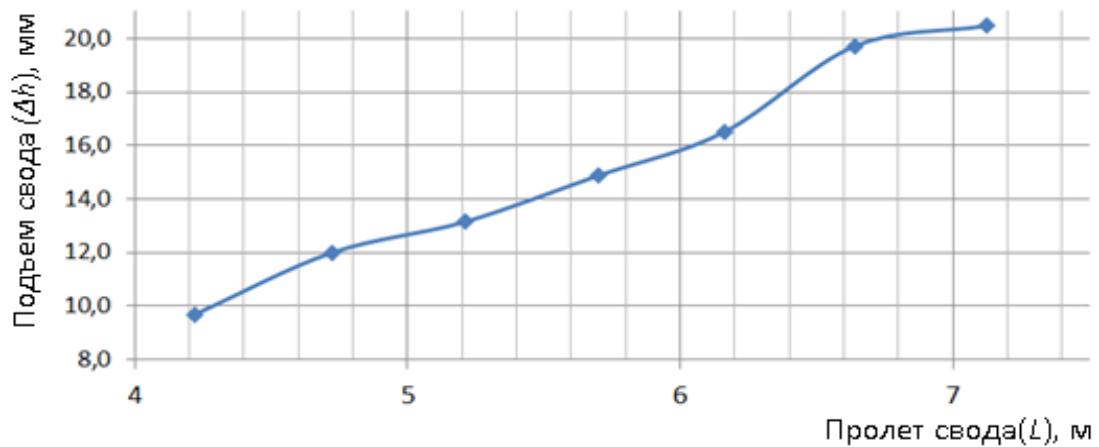


Рисунок 5.6 – Зависимости допустимых значений роста свода от пролета

Таблица 5.5 – Частные значения отпуска тяжей при соотношении $L/f=7,4$
(экспериментальная схема)

№ п/п	Пролет L , м	Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Температура открутки	Удлинение, Δl , мм	Кол-во витков М30	
					с крупным шагом (3 мм)	с мелким шагом (2 мм)
1	2	3	4	5	6	7
2	4,22	1 000–1 540	95	4,8	1,6	2,4
		380–1 000	65	4,8	1,6	2,4
		до 380	35	5,1	1,7	2,5
3	4,72	1 000–1 540	108	6,1	2,0	3,0
		380–1 000	75	6,3	2,1	3,1
		до 380	45	7,3	2,4	3,6
4	5,21	1 000–1 540	120	7,5	2,5	3,7
		380–1 000	85	7,8	2,6	3,9
		до 380	45	8,0	2,7	4,0
5	5,7	1 000–1 540	135	9,2	3,1	4,6
		380–1 000	95	9,6	3,2	4,8
		до 380	50	9,8	3,3	4,9
6	6,16	1 000–1 540	155	11,4	3,8	5,7
		380–1 000	100	10,9	3,6	5,4
		до 380	55	11,6	3,9	5,8
7	6,64	1 000–1 540	180	14,3	4,8	7,1
		380–1 000	123	14,4	4,8	7,2
		до 380	65	14,8	4,9	7,4
8	7,12	1 000–1 540	205	17,5	5,8	8,7
		380–1 000	120	15,1	5,0	7,6
		до 380	65	15,9	5,3	7,9

Алгоритм определения оптимальных температурных интервалов приведен в виде блок-схемы на рисунке 5.7

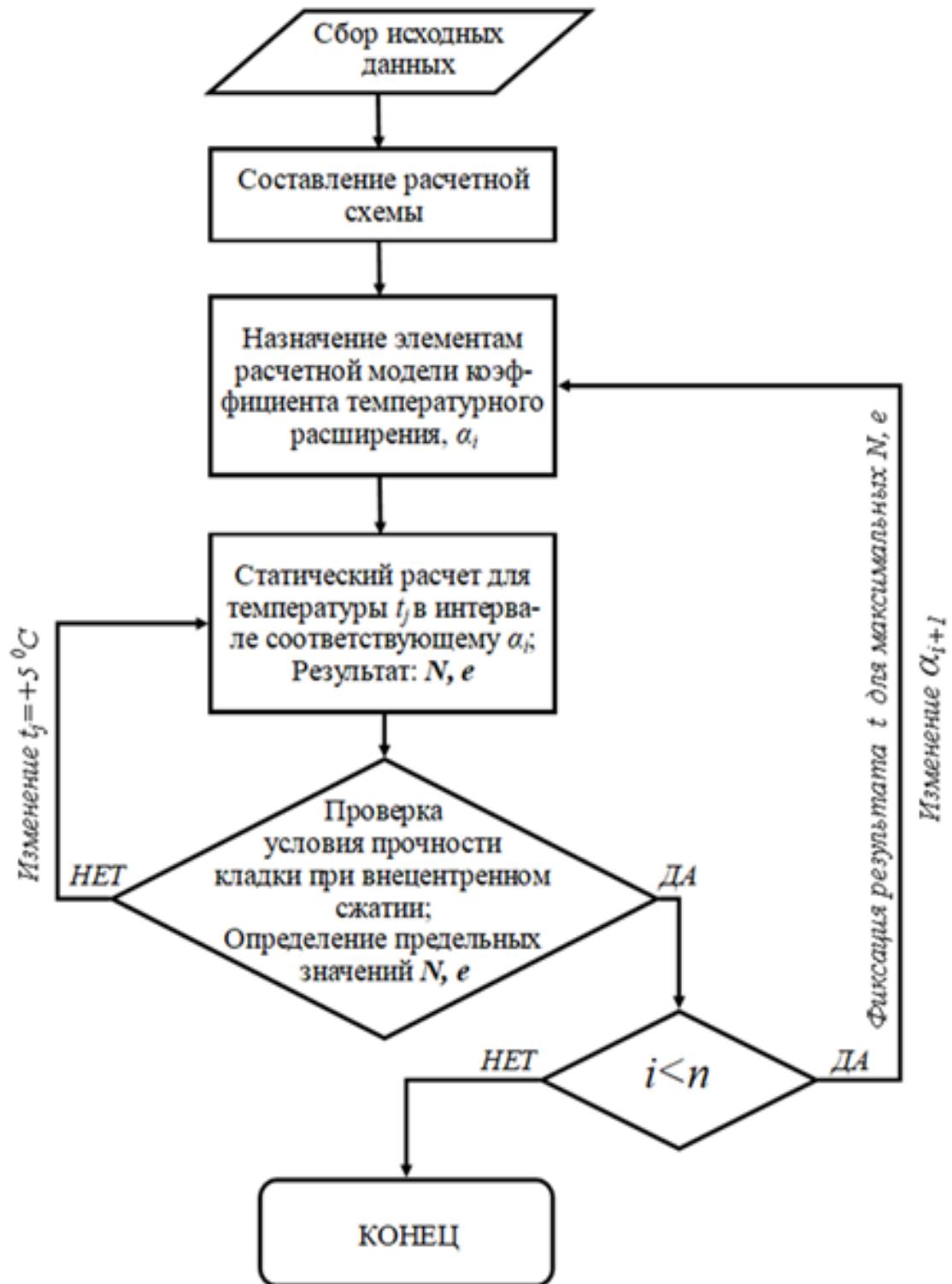


Рисунок 5.7 – Алгоритм определения оптимальных температурных интервалов роспуска тяжей

Задача сводится к поиску температурных интервалов печи при которой возникает предельное состояние кладки свода печи.

5.2. Методика расчета стальной обвязки стекловаренной печи

Расчет стальной обвязки печи выполняется отдельно от кирпичного свода, который испытывает основные технологические нагрузки – нагрев. От расчета кирпичного свода, работа которого рассмотрена выше в зависимости от температурного интервала, принимается нагрузка в точке сопряжения с обвязкой. Геометрическая схема приведена на рисунке 5.8. Нагрузки разделены на две группы: первая группа – единичная нагрузка от распора кирпичного свода, который в опорной части направлен под углом 29 градусов к горизонтали. Схема единичной нагрузки приведена на рисунке 5.9. Вторая группа нагрузок – вес кирпичной кладки (рис. 5.10).

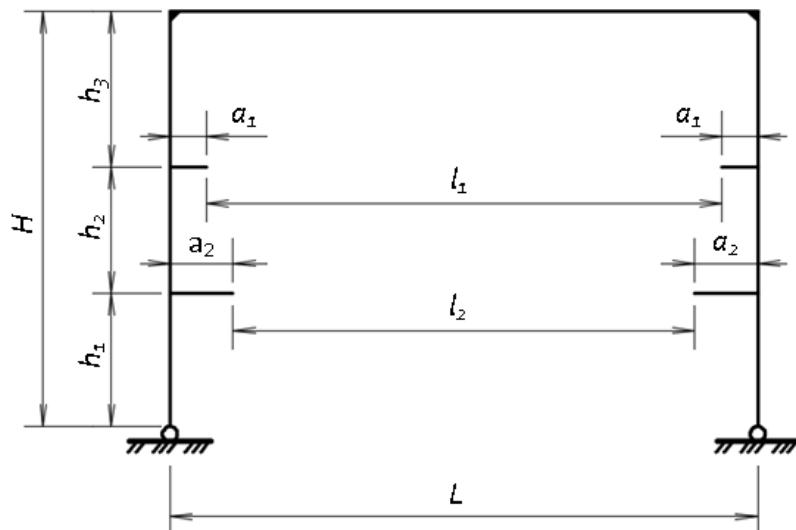


Рисунок 5.8 – Геометрическая схема плоской одиночной рамы каркаса обвязки стекловаренной печи: a_1 – расстояние между точкой приложения силы осью колонны; a_2 – расстояние от точки приложения веса кладки под сводом и вертикальной составляющей распора до оси колонны; h_1 – высота кронштейна, воспринимающего вес стены; h_2 – высота точки приложения силы над подошвой колонны; h_3 – высота колонн от опоры свода до верхней затяжки; H – высота колонны; L – расстояние между колоннами; l_1 – пролет свода; l_2 – расстояние между осями стен

Расчет плоской поперечной рамы можно выполнить различными методами строительной механики. Эпюры продольных сил и изгибающих моментов приведены на рисунках 5.11–5.14 получены методом конечных элементов.

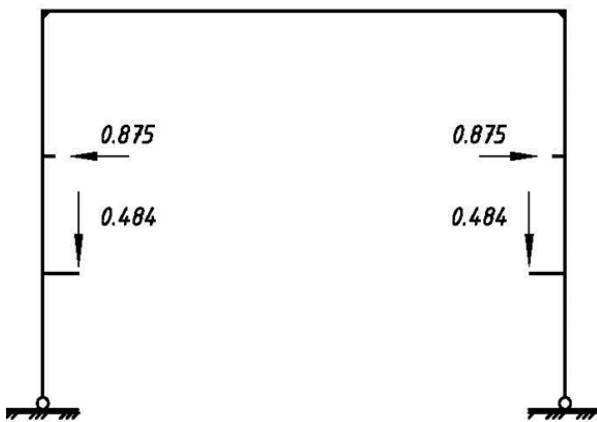


Рисунок 5.9 – Схема единичной нагрузки

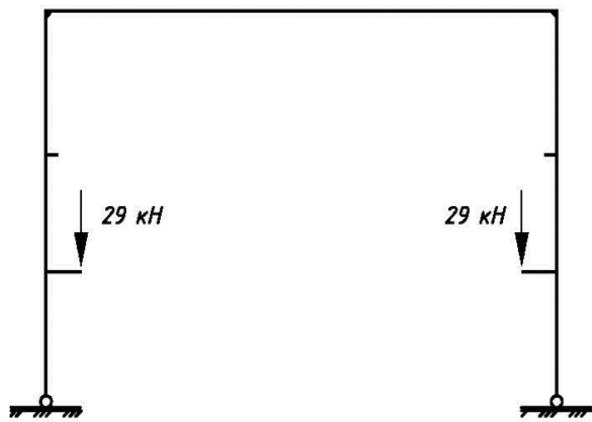


Рисунок 5.10 – Схема нагрузки собственным весом кирпичной кладки под сводом

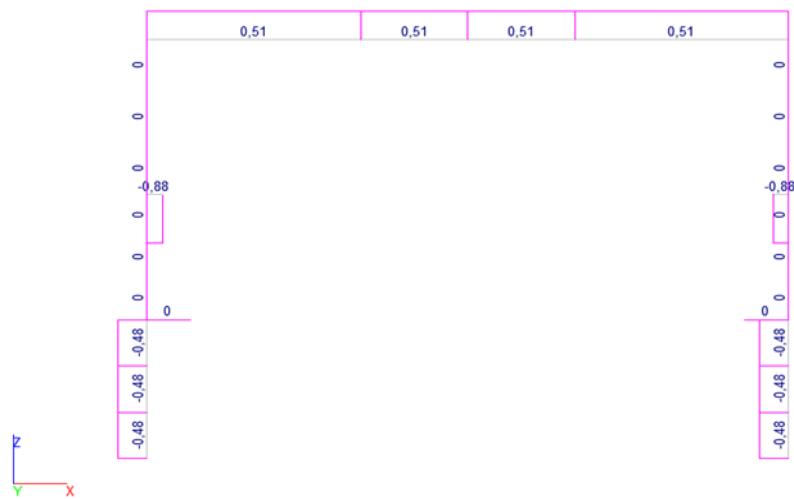


Рисунок 5.11 – Эпюра продольных усилий от единичной нагрузки, кН.

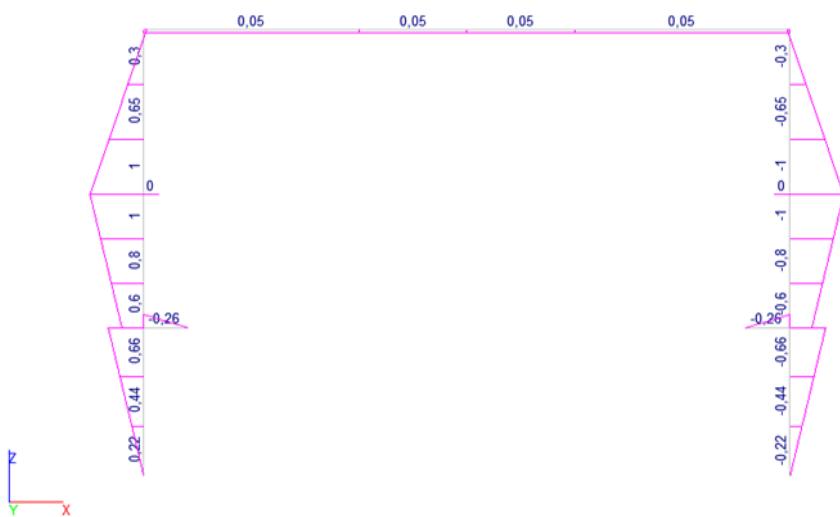


Рисунок 5.12 – Эпюра изгибающих моментов от единичной нагрузки, кНм.

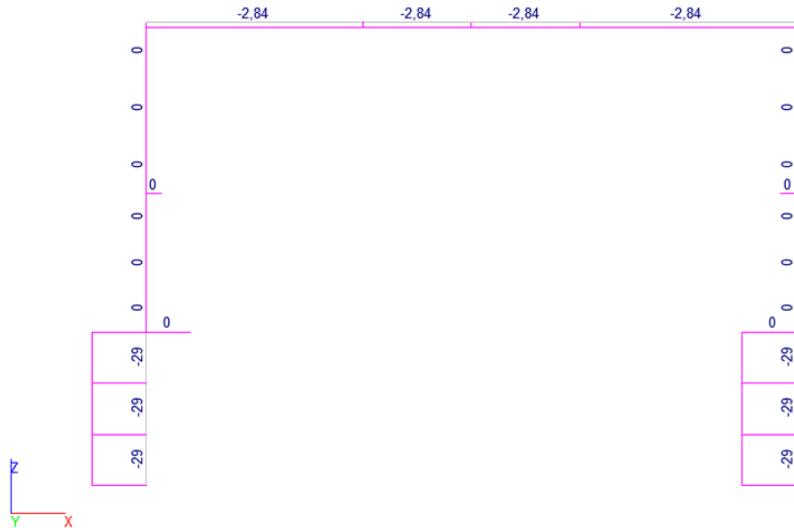


Рисунок 5.13 – Эпюра продольных усилий от веса кирпичной кладки, кН.

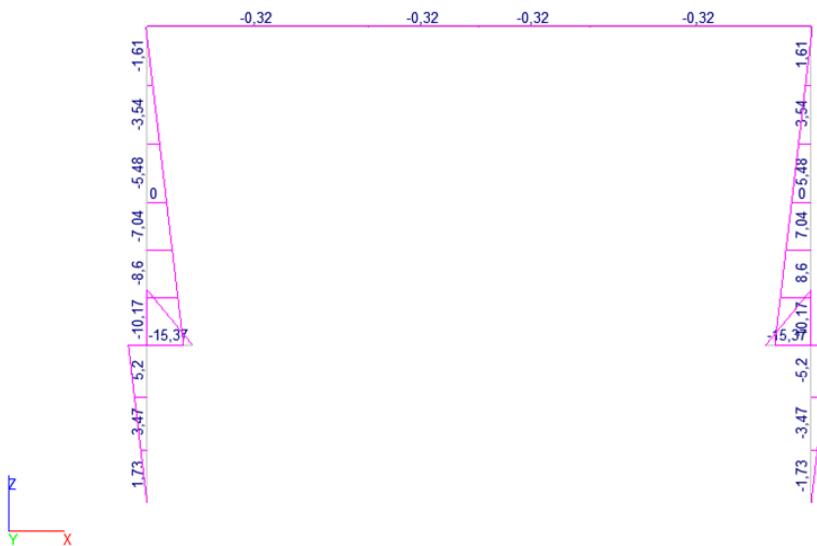


Рисунок 5.14 – Эпюра изгибающего момента от веса кирпичной кладки, кНм.

Для определения внутренних усилий в элементах обвязки необходимо суммировать соответствующие эпюры, предварительно умножив единичную эпюру на значение распора в кирпичном своде с учетом ширины грузовой площади (расстояния между рамами (1,34 м)).

В результате получены внутренние усилия в характерном сечении элементов обвязки. Ниже рассмотрена боковая стойка обвязки, а расчетное сечение рассматривается под нижней консолью.

Распор в своде (R) без учета действия температур составляет 44,2 кН. При действии температуры, с учетом роспуска тяжей распор составит:

- до 380 $^{\circ}\text{C}$ 53,48 кН;
- от 380 до 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 53,97 кН;
- от 1 000 до 1 540 $^{\circ}\text{C}$ 53,55 кН.

Таким образом, внутренние усилия в рассматриваемом сечении будут равны значениям, в таблице 5.7. Проверка фактических сечений стоек из двух двутавров 36М выполняется в соответствии с [57], т. к. $\sigma = N/A_n \leq 0,1 R_y$,

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \pm \frac{M_x}{I_{xn} R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_{yn} R_y \gamma_c} x \leq 1 \quad (5.4)$$

Из формулы (5.4) выносим за скобки расчетное сопротивление и в результате получаем формулу для определения нормального напряжения:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} + \frac{M_x}{W_x} \times \gamma_T \quad (5.5)$$

$\gamma_T = 1,23$ – поправочный коэффициент, учитывающий регулировку опор свода. Коэффициент получен как отношение продольного усилия в своде печи с учетом превышения температуры на 12 градусов (задержка отпуска в течение одного часа) к продольному усилию с учетом своевременного регулирования.

Таблица 5.6 – Стационарные площадки графика подъема заданного температурного режима

№ площадки	Температура выдержки, $^{\circ}\text{C}$	Скорость подъема, $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$	Время выдержки, ч
1	2	3	4
1	30–95	2,6	–
2	95–120	5	48 ч при 120
3	120–245	3,2	8 при 245
4	245–380	4,4	9 при 380
5	380–600	5	–
6	600–840	9	6 при 840
7	840–1 200	10	10 при 1 200
8	1 200–1 540	12	–

В соответствии с технологическим процессом введения стекловаренной печи в эксплуатацию, 12 градусов принято, как максимальное значение температурного скачка за час на графике «выводки» печи – время обхода всех опорных винтов (ориентировочно), что составляет 23 % от усилия на ступени регулирования (определяющим время регулирования является усилие в своде) (53,55 кН).

Колонны имеют площадь поперечного сечения $147,6 \text{ см}^2$, момент сопротивления составляет 1704 см^3 . Нормальные напряжения приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Нормальные напряжения в сечении

Температурный интервал	Значения внутренних усилий от веса кладки под сводом		Значение единичной эпюры		Значение распора в кирпичном своде, кН	Ширина грузовой площади, м	Значения внутренних усилий от распора кирпичного свода		Суммарные значения внутренних усилий		Нормальные напряжения в колонне, МПа
	N, кН	M, кНм	N	M			N, кН	M, кНм	N, кН	M, кНм	
20	29	5,2	0,48	0,66	44,2	1,34	28,4	39,1	57,4	44,3	26,4
до 380	29	5,2	0,48	0,66	53,48	1,34	34,4	47,3	63,4	52,5	31,2
от 380 до 1 000	29	5,2	0,48	0,66	53,98	1,34	34,7	47,7	63,7	52,9	31,5
от 1 000 до 1 540	29	5,2	0,48	0,66	53,55	1,34	34,4	47,4	63,4	52,6	31,3

Для оценки уровня напряжения полученные результаты необходимо сравнить с расчетным сопротивлением стали. Сравнение выполнено на графике (рис. 5.15) в зависимости от температуры в печи.

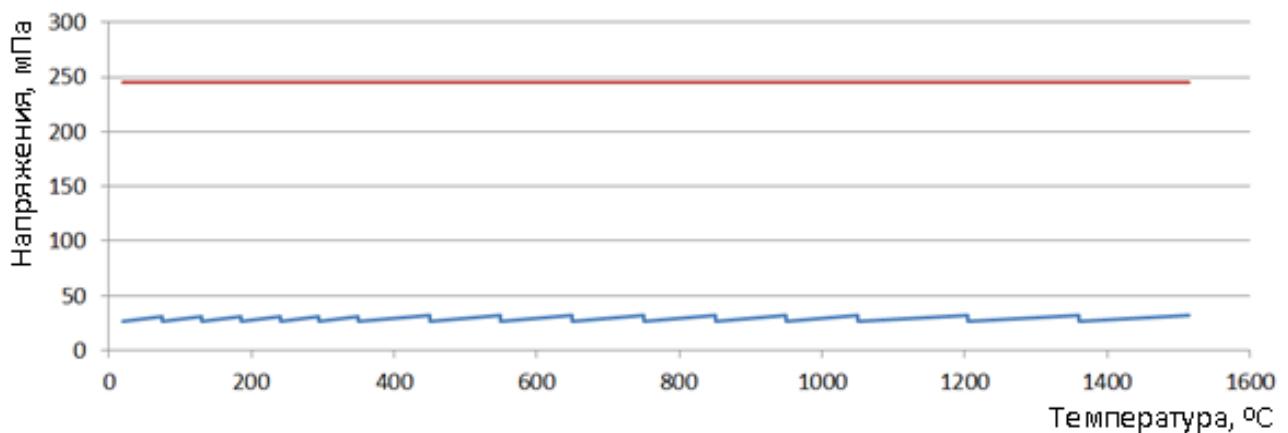


Рисунок 5.15 – График оценки уровня напряжения в характерном сечении элементов обвязки:

- напряжения в колонне, мПа;
- расчетное сопротивление стали, мПа.

Общий алгоритм расчета конструкций металлического каркаса обвязки стекловаренной печи представлен в виде блок схемы на рисунке 5.16.

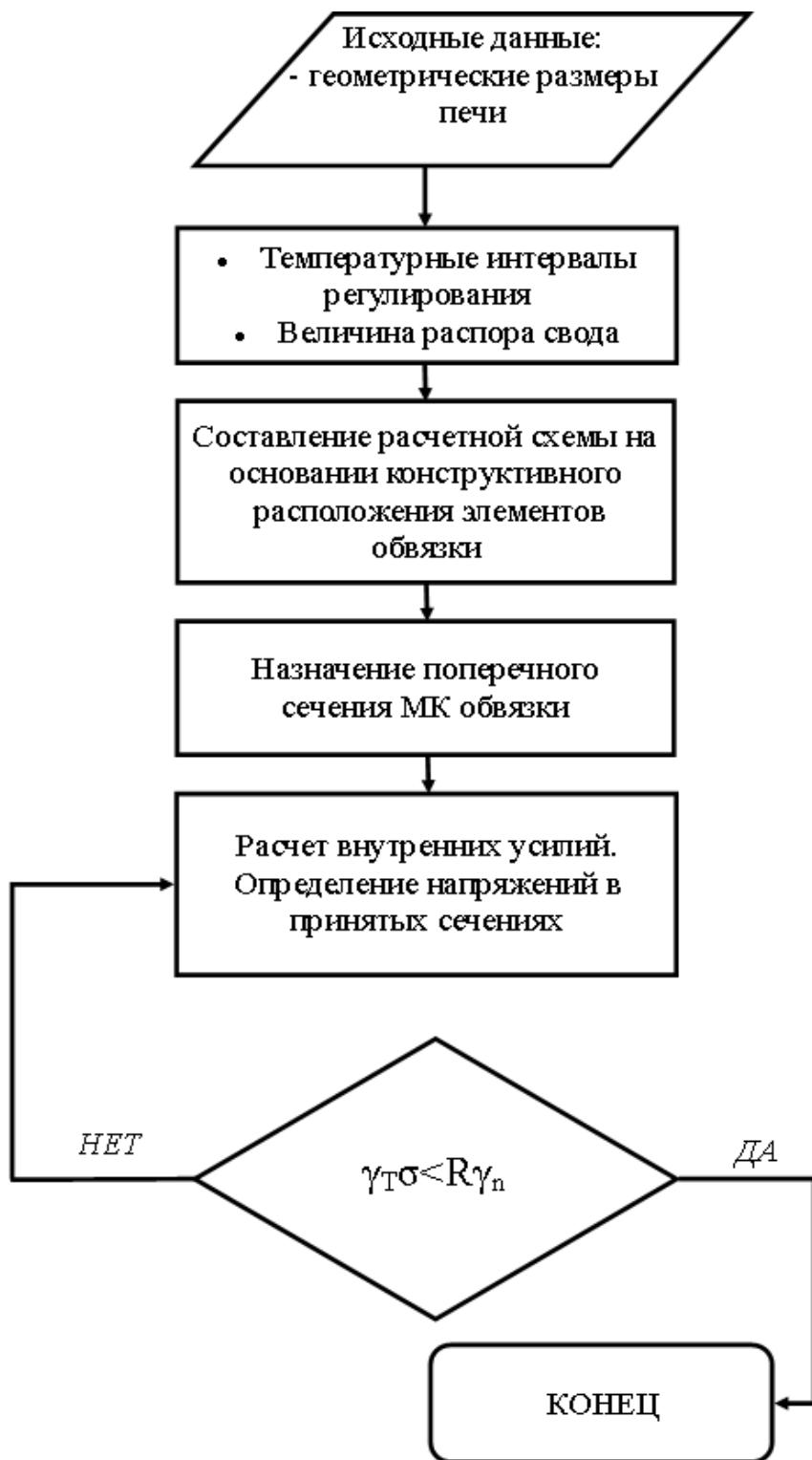


Рисунок 5.16 – Блок схема алгоритма расчета конструкций металлического каркаса обвязки стекловаренной печи

5.3. Выводы по результатам V-го раздела

1. Разработанная методика расчета каркаса обвязки ванных стекловаренных печей отличается от существующих методик подходами к управлению напряженно-деформированным состоянием конструкций с учетом параметров жизненного цикла. По предложенной методике расчета несущей способности колонн каркаса при снятии в них напряжений с помощью «тяжей-компенсаторов» достигается значительное сокращение металлоемкости каркаса (до 30 %).

2. Разработан алгоритм определения оптимальных температурных интервалов технологического процесса эксплуатации печи, при которой возникает предельное состояние кладки свода печи, характеризующееся превышением эксцентризитета $e = 135$ мм, и условиям прочности на внецентренное нагружение для каждого температурного интервала с соответствующим коэффициентом температурного расширения с шагом температурной нагрузки $n = 5^{\circ}\text{C}$. Найдены зависимости температуры роспуска тяжей от пролета свода от 4,2 до 7,2 м при постоянной толщине свода 300 мм и фиксированном соотношении пролета к стреле подъема свода ($L/f = 7,4$).

3. В результате численного анализа получены значения распора свода (R), без учета действия температур составляет 44,2 кН, при действии температуры, с учетом роспуска тяжей для установленных температурных интервалов, выбранных по результатам дискретизации диаграммы изменения коэффициента линейного расширения динасовых изделий при повышении температуры, распор составит: до 380°C 53,48 кН; от 380 до $1\ 000^{\circ}\text{C}$ 53,97 кН; от 1 000 до $1\ 540^{\circ}\text{C}$ 53,55 кН.

4. На этапе определения расчетного сопротивления для учета управления параметрами конструкций в период введения в эксплуатацию предложено введение поправочного коэффициента ($\gamma_T=1,23$), учитывающего регулировку опор свода.

5. На основе численного анализа напряженно-деформированного состояния кладки свода установлены температурные интервалы и величина отпуска тяжей с численными значениями на каждом температурном интервале, что на практике обеспечит его целостность и сохранность формы в период первичного нагрева кладки.

6. Для практического применения при регулировании опор свода в период наращивания температурного режима найдены количественные значения параметров отпуска тяжей. Получены значения количества витков n_e , необходимого для стабилизации напряжений в своде с учетом его пролета L в зависимости от температурных интервалов. Для возможности визуальной оценки напряженно-деформированного состояния свода определены предельно допустимые значения перемещения кладки свода в замке (Δh), в соответствии с определенным температурным интервалом при соответствующем коэффициенте температурного расширения кладки свода для пролетов от 4,2 м до 7,2 м., для последнего подъем свода по средним значениям не должен превышать 20,5 мм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате численных и экспериментальных исследований достигнута основная цель работы – разработаны подходы к расчету металлических каркасов обвязки ванных стекловаренных печей с учетом параметров жизненного цикла и уточненного напряженно-деформированного состояния, с возможностью управления его параметрами.

1. При анализе конструктивных особенностей с оценкой напряженно-деформированного состояния конструкций установлено, что наиболее деформируемой частью печи является её свод, а каркас служит для восприятия усилий от распора свода и предупреждения разрушения кладки при изменении температуры.

На основании результатов проведенного критического анализа существующих методов расчета конструкций каркаса обвязки ванных стекловаренных печей, выявлены грубые допущения учета температурной составляющей. Для расчета несущей способности колонн каркаса, введены поправочные коэффициенты, учитывающие температурное расширение кладки свода, которые увеличивают внутренние усилия в конструкциях металлической обвязки каркаса. Существующие методики не учитывают технологический прием регулирования тяжей, в результате чего повышается расход металла, при этом разрушению в первую очередь подвергается свод, а напряжения в металлической обвязке каркаса печи не достигают $0,2R$.

2. На основании выполненных численных исследований влияния технологического процесса этапов жизненного цикла стекловаренной печи на напряженно-деформированное состояние конструкций каркаса, сформирована уточнённая расчётная схема пространственной модели каркаса печи, позволяющая учесть разность перепада температур в различных температурных блоках свода в соответствии с графиком подъема заданного температурного режима, при наличии 6 стационарных площадок при температуре выдержки при 120, 245, 380, 840, 1 200 $^{\circ}\text{C}$ и эксплуатационной температуре 1 540 $^{\circ}\text{C}$, что

позволяет произвести уточненный расчёт несущих конструкций колонн каркаса для каждой температурной площадки этапов ввода печи в эксплуатацию. Без учета регулирования нормальные напряжения в конструкциях могут превышать допустимые значения в 7 раз.

В результате численного анализа выявлена депланация сечения колонн обвязки печи. Максимальный поворот относительно плоскости UY превышает 9° . В результате уравновешивания давления от распора свода с помощью алгоритма подкрутки тяжей, получено уменьшение поворота сечения колонны на 2,9 % и понижение эквивалентных напряжений на 10 %.

Разработанная методика редуцирования напряжений в расчетной модели, основана на сбросе крутящего момента в колоннах обвязки с помощью своевременного регулирования и соответствующего центрирования колонны, включение тяжа с температурными графиками (площадки стационарного температурного режима). Реализация в расчетной модели осуществляется по разработанному алгоритму учета регулировки тяжей в расчетной схеме и предполагает изменение длины тяжа на Δx до стабилизации напряжений в колонне. Так, с включением механизма регулировки, запас прочности колонны каркаса обвязки составил 30 %.

3. В результате экспериментальных исследований на натурном объекте при введении его в эксплуатацию уточнены параметры технологического режима и произведена корректировка входных данных при создании расчетных сочетаний нагрузок в расчетной схеме стекловаренной печи. Уточнены температуры эксплуатации внутривечной среды, установлена температура поверхности металлоконструкций, исследована динамика роста свода из огнеупорного материала, установлено неравномерное расширение секций свода и максимальный подъем, который составил: $\Delta h_{\text{екс.}} = 67$ мм.

По результатам экспериментальных исследований, подтвержденных теоретическим анализом (сходимость 99 %), подтверждена высокая эффективность использования в системе каркаса обвязки тяжей-компенсаторов, снижающих крутящий момент в колонне. Получены значения изгибающих

моментов в плоскости рамы при учёте различных температурных режимов, при этом максимальное значение составляет 113 кНм на температурной площадке 1 540 $^{\circ}\text{C}$.

4. Разработан алгоритм определения оптимальных температурных интервалов технологического процесса эксплуатации печи, при которой возникает предельное состояние кладки свода печи, характеризующееся превышением эксцентризитета $e = 135$ мм, и условиям прочности на внецентренное нагружение для каждого температурного интервала с соответствующим коэффициентом температурного расширения с шагом температурной нагрузки $n = 5$ $^{\circ}\text{C}$. Найдены зависимости температуры распуска тяжей от пролета свода от 4,2 м до 7,2 м при постоянной толщине свода 300 мм и фиксированном соотношении пролета к стреле подъема свода ($L/f = 7,4$).

5. В результате численного анализа получены значения распора свода (R), без учета действия температур составляет 44,2 кН, при действии температуры, с учетом распуска тяжей для установленных температурных интервалов, выбранных по результатам дискретизации диаграммы изменения коэффициента линейного расширения динасовых изделий, распор составит: до 380 $^{\circ}\text{C}$ 53,48 кН; от 380 до 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 53,97 кН; от 1 000 до 1 540 $^{\circ}\text{C}$ 53,55 кН.

6. На этапе определения расчетного сопротивления для учета управления параметрами конструкций в период введения в эксплуатацию предложено введение поправочного коэффициента ($\gamma_T = 1,23$), учитывающего регулировку опор свода.

7. Разработанная методика расчета металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей, отличается от существующих методик подходами к управлению напряженно-деформированным состоянием конструкций с учетом параметров жизненного цикла и учетом напряженно-деформированного состояния свода.

По предложенной методике расчета несущей способности колонн каркаса обвязки печи при снятии в них напряжений с помощью «тяжей-компенсаторов» достигается значительное сокращение металлоемкости каркаса (до 30 %), кроме

этого подходы к учету напряженно-деформированного состояния свода позволяют повысить эксплуатационную надежность и продолжительность «кампании» стекловаренных печей, обеспечивая безопасность и безаварийность работы стекловаренной печи на этапах жизненного цикла.

8. Для практического применения при регулировании опор свода в период наращивания температурного режима найдены количественные значения параметров отпуска тяжей. Получены значения количества витков n_e , необходимого для стабилизации напряжений в своде с учетом его пролета L в зависимости от температурных интервалов. Для возможности визуальной оценки напряженно-деформированного состояния свода определены предельно допустимые значения перемещения кладки свода в замке (Δh), в соответствии с определенным температурным интервалом при соответствующем коэффициенте температурного расширения кладки свода для пролетов от 4,2 м до 7,2 м, для последнего подъем свода по средним значениям не должен превышать 20,5 мм.

9. Результаты исследования внедрены ООО «Союзтепломонтаж» при оценке напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций циклона предприятия «ЭнергоЦентр» ООО ДОК «Калевала» Республика Карелия, г. Петрозаводск. Приняты и утверждены для внедрения «Рекомендации по эксплуатации сводов промышленных печей при первичном запуске» в ООО «Дебальцевский завод metallургического машиностроения». Положения Рекомендаций предназначены для использования при запуске термического оборудования литейного цеха при контроле поведения свода термической печи с выкатным подом. Рекомендации приняты для экспериментального применения ООО «Южный горно-металлургический комплекс» филиал № 2 «Енакиевский металлургический завод».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авторское свидетельство № 1013420 СССР, МПК С 03 В 5/04. Ванная стекловаренная печь : № 3217353/28-33 : заявл. 26.12.80 : опубл. 23.04.83 / Ерошенко В. С., Павловский Т. В., Воронин М. Д., Резник В. Ю. [и др.]. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Авторское свидетельство № 1342881 СССР, МПК С 03 В 4/04. Варочный бассейн ванной стекловаренной печи : № 4051374/29-33 : заявл. 07.04.86 : опубл. 07.10.87 / Токарев В. Д., Рожков В. А., Проценко М. М. [и др.]. – 3 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Авторское свидетельство № 1425175 СССР, МПК С 03 В 5/16. Каркас стекловаренной печи : № 4215646/29-33 : заявл. 27.03.87 : опубл. 23.09.88 / Вильнис К. К., Королев А. И. – 2 с. : ил. – Текст : непосредственный.
4. Авторское свидетельство № 130571 СССР, МПК С 03 В 5/16. Каркас стекловаренной печи : № 3942235/29-33 : заявл. 08.08.85 : опубл. 07.05.87 / Вильнис К. К., Королев А. И., Мякишев А. И. [и др.]. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.
5. Авторское свидетельство № 203172 СССР, МПК С 03 В 5/4. Обвязка ванной стекловаренной печи : № 1042163/29-11 : заявл. 09.12.65 : опубл. 28.09.67 / Козьмин М. М. – 3 с. : ил. – Текст : непосредственный.
6. Авторское свидетельство № 419478 СССР, МПК, С 03 В 5/16. Обвязка ванной стекловаренной печи : № 1642268/29-3 : заявл. 29.03.71 : опубл. 15.03.74 / Алиев З. Г., Гулиев А. М., Османов Ю. Б. [и др.]. – 2 с. – Текст : непосредственный.
7. Абилова, М. Г. Анализ состояния и тенденции развития стекольной промышленности в России / М. Г. Абилова, Я. В. Бакланова. – Текст : непосредственный // Управление экономическими системами промышленности в России. – 2014. – № 7 (67). – С. 29 (13 с.). – eISSN: 1999-4516.
8. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 280 с. – Текст : непосредственный.

9. Александров, В. Д. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ по обработке экспериментальных данных для студентов всех специальностей / составители: Д. А. Александров, Н. Н. Голodenко, М. А. Дудин. – Макеевка : ДонНАСА, 2008. – 63 с. – Текст : непосредственный
10. Анализ конструктивных решений ванных стекловаренных печей / А. М. Югов, Д. А. Тахтай, А. В. Ихно [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2008. – Випуск 2008-3(71) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 125–130.
11. Анульев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 томах. Том 2 / В. И. Анульев. – [8-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Машиностроение, 2001. – 912 с.; ил. – ISBN 5-217-02964-1. – Текст : непосредственный.
12. Балкевич, В. Л. Техническая керамика : учебное пособие для ВТУзов / В. Л. Балкевич. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Стройиздат, 1984. – 256 с. – Текст : непосредственный.
13. Безделев, В. В. Расчет статически неопределенных арок : методическое пособие для студентов по специальности ПГС / В. В. Безделев, Т. Л. Дмитриева. – Москва : Издательство ИрГТУ, 2004. – 25 с. – Текст : непосредственный.
14. Бельский, В. И. Промышленные печи и трубы : учебное пособие для техникумов / В. И. Бельский, Б. В. Сергеев. – [2-е изд., испр. и доп.]. – Москва : Стройиздат, 1974. – 301 с. – Текст непосредственный.
15. Берген, Р. И. Инженерные конструкции : учебник для студентов вузов / Р. И. Берген, Ю. М. Дукарский, В. Б. Дукарский. – Москва : Высшая школа, 1989. – 415 с. – ISBN 5-06-001439-8. – Текст : непосредственный.
16. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – Москва : Машиностроение, 1979. – 702 с. – Текст : непосредственный.
17. Биргер, И. А. Резьбовые и фланцевые соединения / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1990. – 368 с. – ISBN 5-217-00834-2. – Текст : непосредственный.

18. Бородин, Н. А. Сопротивление материалов : пособие для студентов ссузов, обучающихся по спец. тех. профиля / Н. А. Бородин. – [2-е изд., исп.]. – Москва : Дрофа, 2001. – 288 с. – ISBN 5-7107-3953-7. – Текст : непосредственный.
19. Бровкин, Л. А. Расчетные формулы определения усредненного коэффициента теплоотдачи конвекцией в камерных печах / Л. А. Бровкин. – Текст : непосредственный // Черная металлургия. – 1980. – № 7. – С. 106–107.
20. Бровкин, Л. А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах : учебное пособие / Л. А. Бровкин. – Иваново : ИЭИ, 1973. – 362 с. – Текст : непосредственный.
21. Будин, А. Я. Тонкие подпорные стенки / А. Я. Будин. – Москва : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1974. – 192 с. – Текст : непосредственный.
22. Будников, П. П. Технология керамики и огнеупоров : учебник для студентов вузов / П. П. Будников, А. С. Бережной, И. А. Булавин. – Москва : Стройиздат, 1969. – 312 с. – Текст : непосредственный.
23. Будников, П. П. Новая керамика / П. П. Будников, И. А. Булавин, Г. А. Выдрик. – Москва : Стройиздат, 1969. – 312 с. – Текст : непосредственный.
24. Будов, В. М. Продление межремонтного периода работы стекловаренных печей – резерв увеличения выпуска листового стекла / В. М. Будов. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 1975. – № 4. – С. 12–13.
25. Будов, В. М. Производство строительного стекла и стеклоизделий / В. М. Будов, П. Д. Саркисов. – Москва : Высшая школа, 1991. – 319 с. – Текст : непосредственный.
26. Бурмистров, Г. Н. Материаловедение для футеровщиков-каменщиков и огнеупорщиков : учебник для профессиональных технических училищ / Г. Н. Бурмистров. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Стройиздат, 1987. – 207 с. – Текст : непосредственный.
27. Васильева, И. А. Термодинамика. Основные законы : учебное пособие / И. А. Васильева, Д. П. Волков, Ю. П. Заричняк. – Санкт-Петербург : ИТМО, 2016. – 48 с. – Текст : непосредственный.

28. Власова, С. Г. Основы химической технологии стекла : учебное пособие / С. В. Власова ; научный редактор В. И. Дерябин. – Екатеринбург : Издательство Уральского ун-та, 2013. – 108 с. – ISBN 978-5-7996-0930-6. – Текст : непосредственный.
29. Волгина, Ю. М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов : учебник / Ю. М. Волгина. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Стройиздат, 1982. – 276 с. – Текст : непосредственный.
30. Волков, А. Ф. Курс физики : в 2 т. Том 1. Физические основы механики. Молекулярная физика и термодинамика : учебное пособие для вузов / А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 232 с. – ISBN 978-966-072-7. – Текст : непосредственный.
31. Володарский, Е. Т. Планирование и организация измерительного инструмента : учебное пособие / Е. Т. Володарский Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1987. – 280 с. – Текст : непосредственный.
32. Воскобойников, Ю. Э. Экономика в EXCEL : учебное пособие. Ч. 1 / Ю. Э. Воскобойников. – Новосибирск : НГАСУ, 2005. – 154 с. – Текст : непосредственный.
33. ВСН-429-81. Инструкция по проектированию футеровок промышленных печей из огнеупорных волокнистых материалов : издание официальное : утверждена и введена в действие Министерством монтажных и специальных строительных работ СССР от 12 ноября 1981 г : введена впервые : дата введения 1982-07-01 / ВПИПИ Теплопроект Минмонтажспецстроя СССР. – Москва : Центральное бюро научно-технической информации, 1982. – 39 с. – Текст : непосредственный.
34. Гавриш, Д. И. Огнеупорное производство : в 2 т. Том 1. Огнеупорное сырье : справочник / Д. И. Гавриш. – Москва : Металлургия, 1965. – 580 с. – Текст : непосредственный.
35. Галагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галагер. – [перевод с английского В. М. Картвелишвили ; под редакцией Н. В. Баничука]. – Москва : Мир, 1984. – 428 с. – Текст : непосредственный.

36. Гинсбург, Д. Б. Стекловаренные печи : учебное пособие / Д. Б. Гинсбург. – Москва : Стройиздат, 1967. – 340 с. – Текст : непосредственный.
37. Гинсбург, Л. К. Протиползневые удерживающие конструкции / Л. К. Гинсбург. – Москва : Стройиздат, 1979. – 81 с. – Текст : непосредственный.
38. Глинков, М. А. Общая теория печи / М. А. Глинков, Г. М. Глинков. – Москва : Металлургия, 1978. – 264 с. – Текст : непосредственный.
39. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – [2-е изд., исправ. и доп.]. – Киев : Факт, 2007. – 394 с. – ISBN 978-966-359-203-9. – Текст : непосредственный.
40. ГОСТ 3910-75. Изделия огнеупорные динасовые для кладки стекловаренных печей = Refractory silica products for brickwork of glassmaking furnaces. Specifications : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 декабря 1975 г. № 4061-ст : взамен ГОСТ 3910-41 : дата введения 1977-07-01 / разработчики А. П. Бакалкин, И. Ф. Усатиков, А. А. Елтышева. – Москва : Стандартинформ, 2004. – 66 с. – Текст : непосредственный.
41. Государственные сметные нормативы ФЕР 81-02-45-2001. Государственные сметные нормативы. Часть 45. Промышленные печи и трубы : издание официальное : утверждены и введены в действие приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 253-ст : дата введения 2017-04-28 : актуализированная редакция 2021-01-01. – Москва : Минрегион РФ, 2017. – 22 с. – Текст : непосредственный.
42. Государственные строительные нормы Украины ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования : издание официальное : утверждены и введены в действие приказом Министерства регионального развития и строительства Украины от 13 августа 2007 г. № 143-ст : дата введения 2007-10-01 / разработчики В. Н. Гордеев, М. А. Микитаренко, А. В. Перельмутер [и др.]. – Киев : Минстрой Украины, 2006. – 74 с. – Текст : непосредственный.

43. Гузенков, П. Г. Краткий справочник к расчетам деталей машин : учебное пособие для вузов / П. Г. Гузенков. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Высшая школа, 1964. – 324 с. – Текст : непосредственный.
44. Гусовский, В. Л. Методы расчета нагревательных и термических печей : учебно-справочное пособие / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – Москва : Теплотехник, 2004. – 400 с. – ISBN 5-217-03075-5. – Текст : непосредственный.
45. Гюнтер, Р. Ванные стекловаренные печи / Р. Гюнтер. – [перевод с немецкого И. О. Томашевич ; под редакцией М. Г. Степаненко]. – Москва : Стройиздат, 1958. – 252 с. – Текст : непосредственный.
46. Дарков, А. В. Сопротивление материалов : учебник для вузов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – [5-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Высшая школа, 1989. – 624 с. – ISBN 5-06-000491-0. – Текст : непосредственный.
47. Действительная работа металлического каркаса ванной стекловаренной печи / А. М. Югов, А. В. Ихно, В. И. Москаленко [и др.]. – Текст : непосредственный // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2009. – Т. 5, № 3. – С. 125–131.
48. Державні будівельні норми України ДБН В 1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : видання офіційне : затверджено та введено в дію наказом Мінрегіонбуд України від 30 грудня 2008 р. № 709-ст : введено вперше : чинні від 2009-12-01 / розробники В. Гордеєв, А. Перельмутер, В. Шимановський [и др.]. – Київ : Мінрегіон України, 2009. – 45 с. – Текст непосредственный.
49. Державні будівельні норми України ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації : видання офіційне : затверджено та введено в дію наказом Держбуду України від 15 березня 1992 р. № 32-ст : чинні від 1992-07-01 / розробники УкрНДІпроектстальконструкція, Асоціація ЕРКОН. – Київ : Держком України, 1993. – 39 с. – Текст : непосредственный.

50. Дзюзер, В. Я. Методология управления тепловой работой стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2005. – № 14. – С. 23–30.
51. Дзюзер, В. Я. Огнеупоры для варочной части высокопроизводительной части стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер. – Текст : непосредственный // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 5. – С. 136–144.
52. Дзюзер, В. Я. Особенности первичного нагрева стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер. – Текст : непосредственный // Теплотехника. – 2015. – № 2. – С. 8–10.
53. Дзюзер, В. Я. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. – Москва : Теплотехник, 2009. – 340 с. – Текст : непосредственный.
54. Дзюзер, В. Я. Совершенствование методики расчета теплового баланса регенеративной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер. – Текст : непосредственный // Огнеупоры и керамика. – 2008. – № 3. – С. 24–31.
55. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин : учебное пособие / П. Ф. Дунаев. – [11-е изд.]. – Москва : Академия, 2008. – 496 с. – ISBN 5-217-03253-7. – Текст : непосредственный.
56. Дюбошиц, М. Н. Справочник по сопротивлению материалов / М. Н. Любошиц, Г. М. Ицкович. – [2-е изд., исправ. и доп.]. – Минск : Вышешшая школа, 1969. – 464 с. – Текст : непосредственный.
57. Зверев, В. В. Влияние податливости болтовых соединений на деформативность фермы из тонкостенных гнутых профилей / В. В. Зверев, А. С. Семенов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – № 2 (10). – С. 9–17.
58. Зверев, В. В. Оценка влияния повреждения компенсаторов на напряженно-деформированное состояние колонки охлаждения при действии высоких температур / В. В. Зверев, Н. Ю. Тезиков, К. Е. Жидков. – Текст : непосредственный // Строительная механика и конструкции. – 2020. – № (26). – С. 65–72.

59. Земсков, К. Благословите стекловаренную печь / К. Земсков. – Текст : непосредственный // Знамя индустрии. – 2009. – С. 20.
60. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – [перевод с английского Б. И. Квасова]. – Москва : Мир, 1986. – 318 с. – Текст : непосредственный.
61. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – [перевод с английского ; под редакцией Б. Е. Победри]. – Москва : Мир, 1975. – 537 с. – Текст : непосредственный.
62. Зырянов, В. В. Методы оценки адекватности результатов моделирования / В. В. Зырянов. – Текст : электронный // Сетевой научный журнал Инженерный вестник «Дона». – 2013. – № 10. – (5 с). – URL: www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707 (дата обращения: 19.07.2016).
63. Иванов, М. Н. Детали машин : учебник для студентов ВТУзов / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – [10-е изд., испр.]. – Москва : Высшая школа, 2006. – 407 с. – Текст : непосредственный.
64. Исаченко, В. П. Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Энергия, 1981. – 416 с. – Текст : непосредственный.
65. Исламов, М. Ш. Печи химической промышленности / М. Ш. Исламов. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Ленинград : Изд-во Химия, 1975. – 432 с. – Текст : непосредственный.
66. Исламов, М. Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей / М. Ш. Исламов. – Ленинград : Химия, 1986. – 280 с. – Текст : непосредственный.
67. Исследование работы предварительно натянутого болтового соединения : методические указания к лабораторной работе / составители Е. П. Жильников, В. П. Тукмаков. – Самара : СГАУ им. Королева, 2007. – 16 с. – Текст : непосредственный.
68. Ихно, А. В. Методика определения напряженно-деформированного состояния колонны каркаса ванной стекловаренной печи / А. В. Ихно,

А. М. Югов, В. В. Таран. – Текст : непосредственный // Современные проблемы строительства : Ежегодный научно технический сборник. – Донецк : ДП «Донецкий Промстройнипроект», 2012. – № 15. – С. 58–63.

69. Ихно, А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций агрегата стекловаренного производства / А. В. Ихно, С. О. Титков. – Текст : непосредственный // Научно-практический журнал «Строитель Донбасса». – 2018. – № 3(4). – С. 18–23.

70. Ихно, А. В. Моделирование технологического процесса при вводе в эксплуатацию стекловаренной печи / А. В. Ихно, С. О. Титков, А. О. Точеная. – Текст : непосредственный // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы международных академических чтений, Курск, 23 ноября 2018 г. ; под редакцией С. И. Меркулова. – Курск : ФГБУ ВО «Курский государственный университет», 2018. – С. 184–192.

71. Ихно, А. В. Натурное обследование стекловаренной печи / А. В. Ихно, В. И. Москаленко. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Випуск 2013-6(104) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 8–14.

72. Ихно, А. В. Определение экспериментальным путем действительного НДС колонны каркаса стекловаренной печи завода ООО «Стройстекло-трейдинг» в г. Константиновка / А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2012. – Випуск 2012-6(98) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 146–153.

73. Ихно, А. В. Оптимизация геометрических параметров сводов стекловаренных печей по критериям силы распора при различных температурных режимах эксплуатации / А. В. Ихно. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Выпуск 2017-6(128) Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства. – С. 92–96. – URL: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-6\(128\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-6(128).pdf) (дата публикации: 27.11.2017).

74. Ихно, А. В. Расчет системы металлической конструкции днища ванной стекловаренной печи / А. В. Ихно, Е. П. Капустина. – Текст : непосредственный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2014. – Выпуск 2014-6(110) Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства. – С. 39–43.
75. Ихно, А. В. Редуцирование напряжений в колоннах обвязки ванных стекловаренных печей / А. В. Ихно, С. О. Титков // Инвестиции строительства, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VIII Международной научно-практической конференции, Томск, 13–15 марта 2018 г. В 2 частях / под редакцией Т. Ю. Овсянниковой, И. Р. Салагор. – Томск : Издательство ТГАСУ, 2018. – С. 351–355. – ISBN 978-5-93057-827-0. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32838231> (дата обращения: 20.03.2018). – Текст : электронный.
76. Ихно, А. В. Явление депланации сечения колонн металлического каркаса обвязки стекловаренной печи в период ее эксплуатации / А. В. Ихно. – Текст : электронный // Образование. Наука. Производство : материалы X Международного молодежного форума, Белгород, 01–15 октября 2018 г. – Белгород : БГТУ, 2018. – С. 558–562. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=-41549086&pff=1> (дата обращения: 20.10.2018).
77. Казанцев, Е. И. Промышленные печи : справочное пособие для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Металлургия, 1975. – 368 с. – Текст : непосредственный.
78. Кайнарский, И. С. Корундовые огнеупоры и керамика / И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтерева, И. Г. Орлова. – Москва : Металлургия, 1981. – 168 с. – Текст : непосредственный.
79. Кайнарский, И. С. Основные огнеупоры / И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтерева. – Москва : Металлургия, 1974. – 367 с. – Текст : непосредственный.
80. Кащеев, И. Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок : в двух книгах. Книга 1. Производство огнеупоров : справочник / И. Д. Кащеев. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2000. – 663 с. – Текст непосредственный.

81. Кащеев, И. Д. Свойства и применение огнеупоров / И. Д. Кащеев. – Москва : Теплотехник, 2004. – 352 с. – Текст : непосредственный.
82. Кащеев, И. Д. Свойства и применение огнеупоров : учебное пособие для студентов вузов / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2007. – 746 с. – ISBN 978-5-89594-1. – Текст : непосредственный.
83. Кожемяка, С. В. Исходные технические требования на создание комплексов технической оснастки для реконструкции ванных печей заводов стеклоизделий / С. В. Кожемяка. – Макеевка : МакИСИ, 1969. – 85 с. – Текст : непосредственный.
84. Козлов, А. С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей / А. С. Козлов – Москва : Легпромбытиздат, 1990. – 143 с. – Текст : непосредственный.
85. Колибаба, О. Б. Математическая модель оптимизации работы термической печи для нагрева насыпных садок / О. Б. Колибаба, В. В. Бухмиров, М. Г. Сулейманов. – Текст : непосредственный // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Выпуск 1. – С. 1–4.
86. Колибаба, О. Б. Математическая модель оптимизации работы термической печи для нагрева насыпных садок / О. Б. Колибаба, В. В. Бухмиров, М. Г. Сулейманов. – Текст : электронный // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 1. – С. 1–5. – URL: www.vestnik.ispu.ru/ru/node/244 (дата обращения: 23.06.2015).
87. Крылова, Л. С. Проектирование и эксплуатация теплотехнических установок кузнечно-термического производства машиностроительных заводов : учебное пособие / Л. С. Крылова. – Иваново : ИГЭИ, 2001. – 96 с. – Текст : непосредственный.
88. Кучерявый, М. Н. Кинетика коррозии огнеупоров расплавом многощелочного тарного стекла / М. Н. Кучерявый. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 1985. – № 3. – С. 22–27.
89. Левицкий, И. А. Теплотехнические установки и агрегаты предприятий производства стекла. Расчет стекловаренных печей / И. А. Левицкий, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск : БГТУ, 2006. – 110 с. – Текст : непосредственный.

90. Лихтарников, Я. М. Расчет стальных конструкций : справочное пособие / Я. М. Лихтарников, В. М. Клыков, Д. В. Ладыженский. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Киев : Будівельник, 1984. – 368 с. – Текст : непосредственный.
91. Мамыкин, П. С. Технология огнеупоров / П. С. Мамыкин, К. Н. Стрелов. – Москва : Металлургия, 1970. – 448 с. – Текст : непосредственный.
92. Маркова, Е. В. Комбинированные планы в задачах многофакторного эксперимента / Е. В. Маркова, Л. Н. Лисенков. – Москва : Наука, 1979. – 345 с. – Текст : непосредственный.
93. Маstryukov, B. S. Теплотехнические расчеты промышленных печей / B. S. Mastryukov. – Москва : Металлургия, 1972. – 368 с. – Текст : непосредственный.
94. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий, В. И. Заворицкий, А. И. Ланух-Лященко, А. О. Рассказов. – Москва : Транспорт, 1981. – 143 с. – Текст : непосредственный.
95. Метод конечных элементов. Теория и численная реализация / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий [и др.]. – Киев : Факт, 1997. – 140 с. – Текст : непосредственный.
96. Методика расчета на прочность резьбовых соединений : методические указания / составители С. Л. Лебский, М. М. Матлин, А. В. Попов [и др.]. – Волгоград : ВолгГТУ, 2010. – 32 с. – Текст : непосредственный.
97. Моделирование НДС металлических конструкций каркаса обвязки стекловаренной печи в переходных состояниях при вводе ее в эксплуатацию / А. М. Югов, А. В. Ихно, А. Н. Миронов [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 177–190. – URL: http://don-nasa.ru/publish_house/journals/mk/2017_4/03_yugov_ihno_mironov_titkov.pdf (дата публикации: 11.12.2017).
98. Нагорский, Д. В. Общая методика расчета печей / Д. В. Нагорский. – Москва : Ленинград, изд-во Академии Наук СССР, 1941. – 312 с. – Текст : непосредственный.

99. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – [перевод с английского В. И. Розенблюма, Р. Л. Салганина, Н. А. Форсмана ; научный редактор Г. С. Шапиро]. – Москва : Мир. 1969. – 863 с. – Текст : непосредственный.
100. Налимов, В. В. Статические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – Москва : Наука, 1965. – 340 с. – Текст : непосредственный.
101. Огнеупорные изделия, материалы и сырье : справочник / научный редактор А. К. Гарклит. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Металлургия, 1991. – 415 с. – Текст : непосредственный.
102. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытание : справочник / [J. Allenstein et al.] ; под редакцией Г. Роучка, Х. Вутнау ; [перевод с немецкого И. Г. Очаговой]. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2010. – 392 с. – ISBN 978-5-89594-158-4. – Текст : непосредственный.
103. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок : в 2 кн. Книга 2 : справочник / Л. М. Аксельрод, Г. И. Антонов, Е. Е. Грищенков [и др.]. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. – 656 с. – Текст : непосредственный.
104. О методике расчета металлических конструкций каркаса обвязки ванных стекловаренных печей / А. М. Югов, А. В. Ихно, А. В. Крупенченко [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 151–169. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2021_3/03_yugov_ihno_krupenchenko_titkov.pdf (дата публикации: 11.10.2021).
105. Осыка, В. И. Методические указания к расчетно-проектировочным работам по курсу «Сопротивление материалов» / В. И. Осыка, В. Р. Касимов, А. А. Кулик. – Макеевка : ДонГАСА, 2001. – 33 с. – Текст : непосредственный.
106. Павлюкевич, Ю. Г. Теплотехнические установки и агрегаты предприятий производства стекла : методические указания / Ю. Г. Павлюкевич. – Минск : БГТУ, 2013. – 24 с. – Текст : непосредственный.
107. Папко, Л. Ф. Огнеупоры стекловаренных печей / Л. Ф. Папко, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск : БГТУ, 2006. – 110 с. – Текст : непосредственный.

108. Патент RU № 2339772 C2, Российская Федерация, МПК E04CM3/32. Металлическая колонна двутаврового сечения : № 2339772 C2 : заявл. 12.05.2006 : опубл. 27.11.2008 / Г. Е. Зайцев, В. Г. Огневой, В. В. Зверев [и др.]. – 6 с. – Текст : непосредственный.
109. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с. – Текст : непосредственный.
110. Поляков, С. В. Проектирование каменных и крупнопанельных конструкций / С. В. Поляков, Б. Н. Фалевич. – Москва : Издательство «Высшая школа», 1966. – 235 с. – Текст : непосредственный.
111. Пономарев, А. Б. Методология научных исследований : учебное пособие / А. Б. Пономарев, Э А. Пикулева. – Пермь : ПНИПЦ, 2014. – 186 с. – ISBN 978-5-398-01216-3. – Текст : непосредственный.
112. Попов, С. К. Потенциал энергосбережения в стекловаренных печах / С. К. Попов. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2008. – № 6. – С. 34–38.
113. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013 : учебное пособие / Д. А. Городецкий, М. С. Барабаш, Р. Ю. Водопьянов [и др.]. – Москва : Электронное издание, 2013. – 376 с. – Текст : непосредственный.
114. Псюк, В. В. Оценка напряженно-деформированного состояния стальных двутавровых балок с использованием метода математического моделирования / В. В. Псюк, Е. К. Николаева, И. Н. Симонова. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2005. – Выпуск 19. – С. 353–360.
115. Псюк, В. В. Оценка технического состояния и расчет остаточного ресурса строительных конструкций / В. В. Псюк, А. И. Голоднов, И. А. Никишина. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института. – 2015. – Выпуск 45. – С. 67–73.

116. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учебное пособие для вузов / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1988. – 712 с. – Текст : непосредственный.
117. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. – Москва : Физматгиз, 1962. – 456 с. – Текст : непосредственный.
118. Решетов, Д. Н. Детали машин / Д. Н. Решетов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 496 с. – Текст : непосредственный.
119. Самарский, А. А. Вычислительная теплофизика огнеупоровика / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Либроком, 2009. – 330 с. – Текст : непосредственный.
120. Сапожников, М. Я. Справочник по оборудованию заводов строительных материалов, изделий, конструкций / М. Я. Сапожников, Н. Е. Дроздов. – Москва : Стройиздат, 1970. – 487 с. – Текст : непосредственный.
121. Сборник задач и примеров расчета по курсу деталей машин / Г. М. Ицкович, С. А. Чернавский, В. А. Киселев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1975. – 286 с. – Текст : непосредственный.
122. Сегерлинд, Л. Дж. Применение метода конечных элементов / Л. Дж. Сегерлинд. – [перевод с английского А. А. Шестакова, под редакцией Б. Е. Победри]. – Москва : Мир, 1979. – 392 с. – Текст : непосредственный.
123. Смирнов, Н. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений : пособие для вузов / Н. В. Смирнов, И. В. Дудин-Барковский. – Москва : Физматгиз, 1959. – 436 с. – Текст : непосредственный.
124. Снегирев, А. И. Влияние температуры замыкания при возведении напряжения в несущих конструкциях / А. И. Снегирев, А. И. Алькименко. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 8–16.
125. Сопротивление материалов / П. А. Павлов, Л. К. Паршин, Б. Е. Мельников [и др.]. – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 528 с. – Текст : непосредственный.
126. Сопротивление материалов : учебник / П. А. Павлов, Л. К. Паршин, Б. Е. Мельников, В. А. Шерстнев ; под редакцией Б. Е. Мельникова. – [5-е изд.,

испр.]. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 556 с. – ISBN 978-5-8114-4208-9. – Текст : непосредственный.

127. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции = Masonry and reinforced masonry structures : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 902/пр-ст : дата введения 2021-07-01 / исполнитель АО «НИЦ "Строительство"». – Москва : Стандартинформ, 2021. – 131 с. – Текст : непосредственный.

128. СТО АРСС 11251254.001-018-4. Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций : издание официальное : утверждено и введено в действие приказом генерального директора Ассоциации Объединения участников бизнеса по развитию стального производства от 25 августа 2018 г. № 10/02-ст : введен впервые : дата введения 2018-11-01 : дата актуализации 2021-01-01 / разработан ЦНИЦСК им. В. А. Кучеренко. – Москва : АКСИОМ ГРАФИКС ЮНИИОН, 2018. – 116 с. – Текст : непосредственный.

129. СТО НОСТРОЙ 2.31.12-2011. Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пуско-наладочных работ : издание официальное : утвержден и введен в действие Решением Совета Национального объединения строителей от 5 декабря 2011 г. № 24-ст : введен впервые / разработан Ассоциацией «РосТеплостройМонтаж». – Москва : ООО Изд-во БСТ, 2011. – 49 с. – Текст : непосредственный.

130. СТО НОСТРОЙ 2.31.5-2011. Строительство, реконструкция, ремонт. Промышленные печи и тепловые агрегаты : издание официальное : утвержден и введен в действие Решением Совета Национального объединения строителей от 14 октября 2011 г. № 20-ст : введен впервые / разработан Ассоциацией «РосТеплостройМонтаж». – Москва : ООО Изд-во БСТ, 2011. – 181 с. – Текст : непосредственный.

131. Стрелов, К. К. Структура и свойства огнеупоров / К. К. Стрелов. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Металлургия, 1982. – 208 с. – Текст : непосредственный.

132. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов, И. Д. Кащеев. – Москва : Металлургия, 1996. – 601 с. – Текст : непосредственный.
133. Стрелов, К. К. Технология огнеупоров : учебник для учащихся средних учебных заведений / К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Металлургия, 1987. – 371 с. – Текст : непосредственный.
134. Стрелов, К. К. Технология огнеупоров : учебник для техникумов / К. К. Стрелов, И. Д. Кащеев, П. С. Мамыкин ; под редакцией К. К. Стрелова. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Металлургия, 1988. – 528 с. – Текст : непосредственный.
135. Строительные нормы и правила. СНиП III-24-75. Промышленные печи и кирпичные трубы : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства от 7 мая 1975 г. № 72-ст : взамен СНиП III-Г.12-62 : дата введения 1976-07-01 / разработан ВНИПИ Теплопроект Минмонтажспецстроя СССР. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 36 с. – Текст : непосредственный.
136. Строительные нормы и правила. СНиП II-23-81. Стальные конструкции : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144-ст : взамен СНиП II-B.3-72 ; СНиП II-И.9-62 ; СН 376-67 : дата введения 1982-01-01 / разработчики Госстрой СССР ; ЦНИИСК Госстроя СССР ; «Энергосетьпроект» Минэнерго СССР [и др.]. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с. – Текст : непосредственный.
137. Телегин, А. С. Теплоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкой, Ю. Г. Ярошенко. – Москва : Академкнига, 2002. – 455 с. – Текст : непосредственный.
138. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю. И. Розенгард, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Киев : Вища школа, 1986. – 290 с. – Текст : непосредственный.
139. Теплотехнические расчеты металлургических печей : учебное пособие для вузов / Б. И. Китаев, Б. Ф. Зобнин, В. Ф. Ратников [и др.]. – Москва : Металлургия, 1970. – 528 с. – Текст : непосредственный.

140. Технология керамики и огнеупоров : учебник / П. П. Будников, А. С. Бережной, И. А. Булавин [и др.]. – Москва : Государственное издательство по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 708 с. – Текст : непосредственный.
141. Технология строительного и технического стекла и шлакоситаллов : учебник для техникумов / В. В. Поляк, П. Д. Саркисов, В. Ф. Солинов, М. А. Царицын. – Москва : Стройиздат, 1983. – 432 с. – Текст : непосредственный.
142. Тимошенко, Г. М. Теория инженерного эксперимента : учебное пособие / Г. М. Тимошенко, Н. Ф. Зима. – Донецк : ДПИ, 1984. – 60 с. – Текст : непосредственный.
143. Титков, С. О. Обследование конструкций днища ванной стекловаренной печи непрерывного действия / С. О. Титков, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Современные проблемы промышленного и гражданского строительства : материалы Международной студенческой научно-практической конференции «Строительство и архитектура–2015», Ростов-на-Дону, 26–27 ноября 2015 г. ; под общей редакцией А. В. Шилова. В 2 томах. Том 1. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2015. – С. 224–227.
144. Тихонова, А. В. Огнеупоры. Технология строительства и ремонта печей / А. А. Тихонова. – [перевод с японского А. А. Тихонова]. – Москва : Металлургия, 1980. – 384 с. – Текст : непосредственный.
145. Топливо, огнеупоры и металлургические печи : учебное пособие / А. А. Вагин, В. А. Кривандин, Н. И. Попов, И. А. Прибытков. – Москва : Металлургия, 1978. – 431 с. – Текст : непосредственный.
146. Тринкс, В Промышленные печи / В. Тринкс, М. Г. Моугиней. – Москва : Металлургия, 1966. – 500 с. – Текст : непосредственный.
147. Тринкс, В. Промышленные печи : в 2 т. Т. 2 / В. Тринкс. – [перевод с английского В. П. Линчевского]. – Москва : Металлургия, 1961. – 389 с. – Текст : непосредственный.
148. Федюкин, В. К. Управление качеством процессов / В. К. Федюкин. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 208 с. – Текст : непосредственный.

149. Фервонер, О. Огнеупорные материалы для стекловаренных печей / О. Фервонер, К. Берннт. – [перевод с немецкого О. Н. Поповой ; научный редактор А. С. Власова]. – Москва : Стройиздат, 1984. – 260 с. – Текст : непосредственный.
150. Фесик, С. П. Справочник по сопротивлению материалов / С. П. Фесик. – Киев : Будівельник, 1982. – 308 с. Текст : непосредственный.
151. Финни, Д. Введение в теорию планирования экспериментов / Д. Финни. – Москва : Наука, 1970. – 228 с. – Текст : непосредственный.
152. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / К. Ф. Фокин. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Стройиздат, 1973. – 287 с. – Текст : непосредственный.
153. Химическая технология керамики и огнеупоров : учебник для вузов / П. П. Будников, Д. Н. Полубояринов, В. Л. Булавин [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1972. – 553 с. – Текст : непосредственный.
154. Шевченко, Ф. Л. Задачи по механике упругих деформируемых систем : в двух частях. Часть 1. Сопротивление материалов : учебное пособие / Ф. Л. Шевченко. – Киев : ИСИО, 1996. – 230 с. – Текст : непосредственный.
155. Шевченко, Ф. Л. Задачи по механике упругих деформируемых систем : в двух частях. Часть 2. Сопротивление материалов : учебное пособие / Ф. Л. Шевченко. – Киев : ИСИО, 1996. – 206 с. – Текст : непосредственный.
156. Энергоснабжение при варке стекла / Г. М. Матвеев, В. В. Миронов, Э. М. Раскина [и др.]. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 1988. – № 11. – С. 10–11.
157. Югов, А. М. Действительная работа металлического каркаса стекловаренной печи / А. М. Югов, В. И. Москаленко, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2009. – Т. 5, № 3. – С. 125–131.

158. Югов, А. М. Исследование параметров НДС металлического каркаса ванной стекловаренной печи при действии повышенных температур / А. М. Югов, В. И. Москаленко, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 201–208.

159. Югов, А. М. Исследование параметров напряженно-деформированного состояния металлического каркаса стекловаренной печи / А. М. Югов, В. И. Москаленко, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Современные строительные конструкции из металла и древесины. – 2011. – № 15. – С. 231–237.

160. Югов, А. М. Исследование стекловаренной печи после 4-х лет эксплуатации / А. М. Югов, А. В. Ихно. – Текст : электронный // Образование, наука, производство : материалы VII Международного молодежного форума, Белгород, 20–22 октября 2015 г. – Белгород : БГТУ, 2015. – С. 1397–1401. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25571670> (дата обращения: 30.11.2015).

161. Югов, А. М. Определение температурных полей на контактирующих поверхностях внешнего контура агрегата стекловаренной печи / А. М. Югов, В. И. Москаленко, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2009. – Випуск 2009-6(80) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 76–83.

162. Югов, А. М. Полный факторный эксперимент по оптимизации геометрических параметров сводов стекловаренных печей / А. М. Югов, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы 13-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула – Минск – Донецк, 2–3 ноября 2017 г. ; под общей редакцией Р. А. Ковалева. – Тула : Изд-во Тульского гос. ун-та, 2017. – С. 162–165.

163. Югов, А. М. Результаты обследования конструкций днища ванной стекловаренной печи непрерывного действия / А. М. Югов, В. В. Таран,

А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 23–24 квітня 2014 р. – Харків : ХНУБА, 2014. – С. 97–99.

164. Югов, А. М. Статический расчет металлического каркаса стекловаренной печи / А. М. Югов, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2008. – Випуск 2008-3(71) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 149–154.

165. Югов, А. М. Экспериментальные исследования параметров напряженно-деформированного состояния колонны каркаса стекловаренной печи / А. М. Югов, В. В. Таран, А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Современные строительные конструкции из металла и древесины. – 2013. – № 17. – С. 317–324.

166. Aneziris, C. G. Magnesia carbon bricks – a high-duty refractory material / C. G. Aneziris, D. Borzov, J. Ulbricht. – Текст : непосредственный // Interceram Refractories Manual. – 2003. – № 6. – Р. 22–27.

167. Beerken, R. Analysis of elementary process steps in industrial glass melting tanks – some ideas on innovations in industrial glass melting / R. Beerken. – Текст : непосредственный // Ceramics – Silikaty. – 2008. – Vol. 52, № 4. – P. 206–217.

168. Daniels, M. Einsmelzverhalten von Glasgemengen / M. Daniels. – Текст : непосредственный // Glastech. Ber. – 1973. – № 46. – Р. 40–46.

169. Full factor experiment for optimization of geometric parameters of the glass-furnace arches / Anatoliy Yugov, Anna Ihno, Tatiana Zhmykhova [et al.]. – Текст : електронний // Металлические конструкции. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 95–104. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2018-3/01_yugov_ihno_zhmikhova_titkov.pdf (дата публикации: 08.10.2018).

170. Ihno, Anna. Results of field researches of compact furnace for rolling sheet glass / Anna Ihno. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 151–158.

171. Ihno, Anna. The calculation system of the construction of the glass furnace bottom / Anna Ihno. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 203–208.
172. Landenfeld, W. Refractories for Basis Oxyden Steel Converters in Germany / W. Landenfeld, M. Oberbach, M. Seeger. – Текст : непосредственный // Fachberichte Huttenpraxis Metallweiterverarbeitung. – 1981. – № 10. – Р. 784–795.
173. Margishvili, A. P. Research and development division of the Borovichskij Refractory Works JSC / A. P. Margishvili. – Текст : непосредственный // Refractories and Industrial Ceramics. – 2007. – Vol. 48, № 6. – Р. 157–160.
174. Migal, V. P. Development of highly efficient State-of-the-art-materials / V. P. Migal. – Текст : непосредственный // Refractories and Industrial Ceramics. – 2007. – Vol. 48, № 2. – Р. 146–156.
175. Moreau, R. Verschleiß von Wannenböden Technische Gegenmaßnahmen / R. Moreau. – Текст : непосредственный // Fachberichte: Sprechsaal. – 1986. – Volume 119. – № 8. – Р. 696–701.
176. Rigaud, M. New additives in carbon-bonded refractories / M. Rigaud. – Текст : непосредственный // Ceramic: charting the future. – 1995. – Volume 3A. – Р. 399–413.
177. Ungan, A. Identification of the Structure of the Three Dimensional Thermal Flow in an Inding Container Glass Melter / A. Uungan, R. Viskanta. – Текст : непосредственный // Glass Technology. – 1987. – Volume 28. – № 6. – Р. 252–260.
178. Zhang, S. Carbon containing castables: current status and future prospects / S. Zhang, W. Lee. – Текст : непосредственный // British Ceramic Transactions – 2002. – Volume 101, № 1. – Р. 1–8.

Таблица 1 – Экспликация к расчетной схеме

левый тяж	Колонна 2	17311
левый тяж	Колонна 2	17311
Правый тяж	Колонна 2	17312
Правый тяж	Колонна 2	17312
левый тяж	Колонна 3	17315
левый тяж	Колонна 3	17315
Правый тяж	Колонна 3	17316
Правый тяж	Колонна 3	17316
левый тяж	Колонна 4	17319
левый тяж	Колонна 4	17319
Правый тяж	Колонна 4	17320
Правый тяж	Колонна 4	17320
левый тяж	Колонна 5	17323
левый тяж	Колонна 5	17323
Правый тяж	Колонна 5	17324
Правый тяж	Колонна 5	17324
левый тяж	Колонна 6	17327
левый тяж	Колонна 6	17327
Правый тяж	Колонна 6	17328
Правый тяж	Колонна 6	17328
левый тяж	Колонна 7	17331
левый тяж	Колонна 7	17331
Правый тяж	Колонна 7	17332
Правый тяж	Колонна 7	17332
левый тяж	Колонна 8	17335
левый тяж	Колонна 8	17335
Правый тяж	Колонна 8	17336
Правый тяж	Колонна 8	17336
левый тяж	Колонна 9	17340
левый тяж	Колонна 9	17340
Правый тяж	Колонна 9	17341
Правый тяж	Колонна 9	17341
левый тяж	Колонна 1	17344
левый тяж	Колонна 1	17344
Правый тяж	Колонна 1	17345
Правый тяж	Колонна 1	17345

Таблица 2 – Таблица усилий (стержни) по РСН 1

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 0,194	- 0,001	0,008	- 0,036	0,002	0,002	0,000	0,000	10	1
17311	2	- 0,194	- 0,001	0,000	- 0,046	0,002	0,002	0,000	0,000	10	1
17312	1	- 0,263	- 0,001	0,005	- 0,019	0,003	0,023	0,000	0,000	10	1
17312	2	- 0,263	- 0,001	0,000	- 0,030	- 0,001	0,023	0,000	0,000	10	1
17315	1	- 0,614	0,000	0,000	0,037	- 0,016	- 0,125	0,000	0,000	10	1
17315	2	- 0,614	0,000	0,006	0,027	0,007	- 0,125	0,000	0,000	10	1
17316	1	- 0,631	- 0,001	0,000	0,033	0,004	0,034	0,000	0,000	10	1
17316	2	- 0,631	- 0,001	0,005	0,023	- 0,003	0,034	0,000	0,000	10	1
17319	1	- 0,870	0,000	0,006	- 0,025	- 0,006	- 0,105	0,000	0,000	10	1
17319	2	- 0,870	0,000	0,000	- 0,035	0,013	- 0,105	0,000	0,000	10	1
17320	1	- 0,884	0,000	0,005	- 0,022	0,007	0,119	0,000	0,000	10	1
17320	2	- 0,884	0,000	0,000	- 0,032	- 0,015	0,119	0,000	0,000	10	1
17323	1	- 1,122	0,001	0,003	- 0,010	- 0,010	- 0,155	0,000	0,000	10	1
17323	2	- 1,122	0,001	0,000	- 0,020	0,018	- 0,155	0,000	0,000	10	1
17324	1	- 1,101	0,000	0,004	- 0,016	0,009	0,149	0,000	0,000	10	1
17324	2	- 1,101	0,000	0,000	- 0,026	- 0,019	0,149	0,000	0,000	10	1
17327	1	- 0,636	0,001	0,003	- 0,010	- 0,008	- 0,105	0,000	0,000	10	1
17327	2	- 0,636	0,001	0,000	- 0,020	0,012	- 0,105	0,000	0,000	10	1
17328	1	- 0,620	0,000	0,004	- 0,017	0,005	0,099	0,000	0,000	10	1
17328	2	- 0,620	0,000	0,000	- 0,027	- 0,013	0,099	0,000	0,000	10	1
17331	1	- 0,988	0,000	0,002	- 0,008	- 0,008	- 0,128	0,000	0,000	10	1
17331	2	- 0,988	0,000	0,000	- 0,018	0,015	- 0,128	0,000	0,000	10	1
17332	1	- 0,966	0,000	0,003	- 0,013	0,008	0,140	0,000	0,000	10	1
17332	2	- 0,966	0,000	0,000	- 0,023	- 0,018	0,140	0,000	0,000	10	1
17335	1	- 0,741	0,000	0,001	- 0,001	- 0,006	- 0,102	0,000	0,000	10	1
17335	2	- 0,741	0,000	0,000	- 0,011	0,013	- 0,102	0,000	0,000	10	1
17336	1	- 0,715	0,000	0,002	- 0,006	0,007	0,116	0,000	0,000	10	1
17336	2	- 0,715	0,000	0,000	- 0,016	- 0,014	0,116	0,000	0,000	10	1
17340	1	- 0,325	0,001	- 0,011	0,064	0,004	0,072	0,000	0,000	10	1
17340	2	- 0,325	0,001	0,000	0,054	- 0,009	0,072	0,000	0,000	10	1
17341	1	- 0,075	0,001	0,000	- 0,048	0,014	0,122	0,000	0,000	10	1
17341	2	- 0,075	0,001	- 0,010	- 0,058	- 0,009	0,122	0,000	0,000	10	1
17344	1	- 0,286	- 0,001	0,010	- 0,046	0,001	- 0,004	0,000	0,000	10	1
17344	2	- 0,286	- 0,001	0,000	- 0,057	0,002	- 0,004	0,000	0,000	10	1
17345	1	- 0,441	- 0,001	0,005	- 0,022	0,002	0,015	0,000	0,000	10	1
17345	2	- 0,441	- 0,001	0,000	- 0,033	- 0,001	0,015	0,000	0,000	10	1

Таблица 3 – Таблица усилий (стержни) по РСН 2

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 0,635	- 0,001	0,004	- 0,018	- 0,005	- 0,081	0,000	0,000	10	2
17311	2	- 0,635	- 0,001	0,000	- 0,028	0,010	- 0,081	0,000	0,000	10	2
17312	1	- 0,675	- 0,001	0,002	- 0,004	0,005	0,073	0,000	0,000	10	2
17312	2	- 0,675	- 0,001	0,000	- 0,014	- 0,008	0,073	0,000	0,000	10	2
17315	1	- 1,222	0,000	0,000	0,038	- 0,022	- 0,176	0,000	0,000	10	2
17315	2	- 1,222	0,000	0,006	0,028	0,010	- 0,176	0,000	0,000	10	2
17316	1	- 1,248	- 0,001	0,000	0,031	0,011	0,104	0,000	0,000	10	2
17316	2	- 1,248	- 0,001	0,005	0,020	- 0,008	0,104	0,000	0,000	10	2
17319	1	- 1,658	0,000	0,008	- 0,040	- 0,010	- 0,172	0,000	0,000	10	2
17319	2	- 1,658	0,000	0,000	- 0,050	0,022	- 0,172	0,000	0,000	10	2
17320	1	- 1,712	- 0,001	0,006	- 0,025	0,014	0,213	0,000	0,000	10	2
17320	2	- 1,712	- 0,001	0,000	- 0,035	- 0,025	0,213	0,000	0,000	10	2
17323	1	- 2,678	0,000	0,001	0,000	- 0,024	- 0,370	0,000	0,000	10	2
17323	2	- 2,678	0,000	0,000	- 0,010	0,044	- 0,370	0,000	0,000	10	2
17324	1	- 2,686	0,000	0,000	0,003	0,026	0,387	0,000	0,000	10	2
17324	2	- 2,686	0,000	0,000	- 0,007	- 0,046	0,387	0,000	0,000	10	2
17327	1	- 1,490	0,001	0,000	0,006	- 0,018	- 0,241	0,000	0,000	10	2
17327	2	- 1,490	0,001	0,000	- 0,004	0,027	- 0,241	0,000	0,000	10	2
17328	1	- 1,457	0,001	0,003	- 0,010	0,014	0,241	0,000	0,000	10	2
17328	2	- 1,457	0,001	0,000	- 0,020	- 0,030	0,241	0,000	0,000	10	2
17331	1	- 2,192	0,001	0,000	0,004	- 0,018	- 0,274	0,000	0,000	10	2
17331	2	- 2,192	0,001	0,000	- 0,006	0,033	- 0,274	0,000	0,000	10	2
17332	1	- 2,152	0,000	0,002	- 0,007	0,017	0,286	0,000	0,000	10	2
17332	2	- 2,152	0,000	0,000	- 0,017	- 0,036	0,286	0,000	0,000	10	2
17335	1	- 1,567	0,001	- 0,003	0,021	- 0,012	- 0,186	0,000	0,000	10	2
17335	2	- 1,567	0,001	0,000	0,011	0,022	- 0,186	0,000	0,000	10	2
17336	1	- 1,482	0,001	0,001	- 0,001	0,013	0,229	0,000	0,000	10	2
17336	2	- 1,482	0,001	0,000	- 0,012	- 0,029	0,229	0,000	0,000	10	2
17340	1	- 1,636	0,002	- 0,014	0,080	0,004	0,092	0,000	0,000	10	2
17340	2	- 1,636	0,002	0,000	0,070	- 0,013	0,092	0,000	0,000	10	2
17341	1	- 1,287	0,002	0,000	- 0,047	0,021	0,191	0,000	0,000	10	2
17341	2	- 1,287	0,002	- 0,010	- 0,057	- 0,015	0,191	0,000	0,000	10	2
17344	1	- 1,557	- 0,001	0,008	- 0,039	- 0,013	- 0,201	0,000	0,000	10	2
17344	2	- 1,557	- 0,001	0,000	- 0,049	0,025	- 0,201	0,000	0,000	10	2
17345	1	- 1,571	- 0,002	0,003	- 0,012	0,007	0,109	0,000	0,000	10	2
17345	2	- 1,571	- 0,002	0,000	- 0,022	- 0,013	0,109	0,000	0,000	10	2

Таблица 4 – Таблица усилий (стержни) по РСН 3

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 2,527	0,000	- 0,006	0,039	- 0,036	- 0,450	0,000	0,000	10	3
17311	2	- 2,527	0,000	0,000	0,029	0,047	- 0,450	0,000	0,000	10	3
17312	1	- 2,438	0,000	- 0,007	0,041	0,012	0,251	0,000	0,000	10	3
17312	2	- 2,438	0,000	0,000	0,031	- 0,034	0,251	0,000	0,000	10	3
17315	1	- 3,892	0,001	0,000	0,091	- 0,042	- 0,359	0,000	0,000	10	3
17315	2	- 3,892	0,001	0,016	0,081	0,024	- 0,359	0,000	0,000	10	3
17316	1	- 3,966	- 0,004	0,000	0,063	0,043	0,407	0,000	0,000	10	3
17316	2	- 3,966	- 0,004	0,011	0,052	- 0,032	0,407	0,000	0,000	10	3
17319	1	- 5,151	0,000	0,030	- 0,155	- 0,024	- 0,444	0,000	0,000	10	3
17319	2	- 5,151	0,000	0,000	- 0,165	0,059	- 0,444	0,000	0,000	10	3
17320	1	- 5,397	- 0,006	0,018	- 0,090	0,046	0,608	0,000	0,000	10	3
17320	2	- 5,397	- 0,006	0,000	- 0,100	- 0,067	0,608	0,000	0,000	10	3
17323	1	- 10,043	- 0,002	- 0,001	0,008	- 0,091	- 1,383	0,000	0,000	10	3
17323	2	- 10,043	- 0,002	0,000	- 0,002	0,165	- 1,383	0,000	0,000	10	3
17324	1	- 10,202	- 0,002	- 0,010	0,060	0,104	1,492	0,000	0,000	10	3
17324	2	- 10,202	- 0,002	0,000	0,049	- 0,171	1,492	0,000	0,000	10	3
17327	1	- 5,697	0,002	- 0,010	0,059	- 0,068	- 0,917	0,000	0,000	10	3
17327	2	- 5,697	0,002	0,000	0,049	0,102	- 0,917	0,000	0,000	10	3
17328	1	- 5,584	0,003	0,000	0,007	0,059	0,944	0,000	0,000	10	3
17328	2	- 5,584	0,003	0,000	- 0,003	- 0,116	0,944	0,000	0,000	10	3
17331	1	- 8,199	0,004	- 0,005	0,033	- 0,065	- 0,999	0,000	0,000	10	3
17331	2	- 8,199	0,004	0,000	0,023	0,120	- 0,999	0,000	0,000	10	3
17332	1	- 8,075	0,000	0,002	- 0,004	0,058	1,006	0,000	0,000	10	3
17332	2	- 8,075	0,000	0,000	- 0,014	- 0,128	1,006	0,000	0,000	10	3
17335	1	- 5,697	0,007	- 0,020	0,114	- 0,042	- 0,596	0,000	0,000	10	3
17335	2	- 5,697	0,007	0,000	0,104	0,068	- 0,596	0,000	0,000	10	3
17336	1	- 5,297	0,005	0,001	- 0,001	0,041	0,784	0,000	0,000	10	3
17336	2	- 5,297	0,005	0,000	- 0,011	- 0,103	0,784	0,000	0,000	10	3
17340	1	- 8,265	0,009	- 0,025	0,139	0,005	0,180	0,000	0,000	10	3
17340	2	- 8,265	0,009	0,000	0,129	- 0,028	0,180	0,000	0,000	10	3
17341	1	- 7,515	0,005	0,000	- 0,024	0,056	0,535	0,000	0,000	10	3
17341	2	- 7,515	0,005	- 0,005	- 0,034	- 0,043	0,535	0,000	0,000	10	3
17344	1	- 7,291	- 0,002	0,004	- 0,017	- 0,074	- 1,090	0,000	0,000	10	3
17344	2	- 7,291	- 0,002	0,000	- 0,027	0,128	- 1,090	0,000	0,000	10	3
17345	1	- 6,659	- 0,003	- 0,003	0,021	0,032	0,523	0,000	0,000	10	3
17345	2	- 6,659	- 0,003	0,000	0,011	- 0,065	0,523	0,000	0,000	10	3

Таблица 5 – Таблица усилий (стержни) по РСН 4

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 6,567	0,001	- 0,028	0,156	- 0,103	- 1,242	0,000	0,000	10	4
17311	2	- 6,567	0,001	0,000	0,146	0,127	- 1,242	0,000	0,000	10	4
17312	1	- 6,182	0,001	- 0,023	0,130	0,026	0,626	0,000	0,000	10	4
17312	2	- 6,182	0,001	0,000	0,120	- 0,090	0,626	0,000	0,000	10	4
17315	1	- 9,184	0,003	0,000	0,216	- 0,072	- 0,653	0,000	0,000	10	4
17315	2	- 9,184	0,003	0,039	0,206	0,049	- 0,653	0,000	0,000	10	4
17316	1	- 9,323	- 0,009	0,000	0,152	0,108	1,021	0,000	0,000	10	4
17316	2	- 9,323	- 0,009	0,027	0,142	- 0,081	1,021	0,000	0,000	10	4
17319	1	- 11,974	0,000	0,074	- 0,396	- 0,049	- 0,944	0,000	0,000	10	4
17319	2	- 11,974	0,000	0,000	- 0,407	0,125	- 0,944	0,000	0,000	10	4
17320	1	- 12,590	- 0,016	0,044	- 0,231	0,108	1,376	0,000	0,000	10	4
17320	2	- 12,590	- 0,016	0,000	- 0,241	- 0,147	1,376	0,000	0,000	10	4
17323	1	- 24,209	- 0,007	- 0,007	0,045	- 0,222	- 3,345	0,000	0,000	10	4
17323	2	- 24,209	- 0,007	0,000	0,035	0,397	- 3,345	0,000	0,000	10	4
17324	1	- 24,594	- 0,003	- 0,030	0,167	0,263	3,692	0,000	0,000	10	4
17324	2	- 24,594	- 0,003	0,000	0,157	- 0,420	3,692	0,000	0,000	10	4
17327	1	- 13,150	0,006	- 0,020	0,111	- 0,151	- 2,039	0,000	0,000	10	4
17327	2	- 13,150	0,006	0,000	0,101	0,226	- 2,039	0,000	0,000	10	4
17328	1	- 12,862	0,008	0,004	- 0,018	0,132	2,156	0,000	0,000	10	4
17328	2	- 12,862	0,008	0,000	- 0,028	- 0,267	2,156	0,000	0,000	10	4
17331	1	- 18,391	0,009	- 0,009	0,056	- 0,145	- 2,214	0,000	0,000	10	4
17331	2	- 18,391	0,009	0,000	0,046	0,265	- 2,214	0,000	0,000	10	4
17332	1	- 18,086	0,001	0,008	- 0,038	0,126	2,217	0,000	0,000	10	4
17332	2	- 18,086	0,001	0,000	- 0,048	- 0,284	2,217	0,000	0,000	10	4
17335	1	- 12,550	0,017	- 0,045	0,250	- 0,092	- 1,275	0,000	0,000	10	4
17335	2	- 12,550	0,017	0,000	0,240	0,144	- 1,275	0,000	0,000	10	4
17336	1	- 11,605	0,012	0,005	- 0,022	0,088	1,703	0,000	0,000	10	4
17336	2	- 11,605	0,012	0,000	- 0,032	- 0,227	1,703	0,000	0,000	10	4
17340	1	- 18,962	0,020	- 0,042	0,232	0,006	0,324	0,000	0,000	10	4
17340	2	- 18,962	0,020	0,000	0,222	- 0,054	0,324	0,000	0,000	10	4
17341	1	- 17,642	0,011	0,000	0,022	0,115	1,117	0,000	0,000	10	4
17341	2	- 17,642	0,011	0,003	0,012	- 0,091	1,117	0,000	0,000	10	4
17344	1	- 19,684	- 0,004	- 0,004	0,028	- 0,207	- 3,015	0,000	0,000	10	4
17344	2	- 19,684	- 0,004	0,000	0,018	0,351	- 3,015	0,000	0,000	10	4
17345	1	- 17,632	- 0,006	- 0,016	0,090	0,084	1,416	0,000	0,000	10	4
17345	2	- 17,632	- 0,006	0,000	0,080	- 0,178	1,416	0,000	0,000	10	4

Таблица 6 – Таблица усилий (стержни) по РСН 5

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 22,983	0,006	- 0,104	0,565	- 0,378	- 4,514	0,000	0,000	10	5
17311	2	- 22,983	0,006	0,000	0,555	0,457	- 4,514	0,000	0,000	10	5
17312	1	- 21,406	0,004	- 0,078	0,426	0,078	2,023	0,000	0,000	10	5
17312	2	- 21,406	0,004	0,000	0,416	- 0,296	2,023	0,000	0,000	10	5
17315	1	- 31,438	0,014	0,000	0,879	- 0,192	- 1,843	0,000	0,000	10	5
17315	2	- 31,438	0,014	0,162	0,868	0,149	- 1,843	0,000	0,000	10	5
17316	1	- 31,916	- 0,034	0,000	0,652	0,375	3,569	0,000	0,000	10	5
17316	2	- 31,916	- 0,034	0,120	0,642	- 0,285	3,569	0,000	0,000	10	5
17319	1	- 40,905	0,000	0,293	- 1,581	- 0,153	- 3,010	0,000	0,000	10	5
17319	2	- 40,905	0,000	0,000	- 1,591	0,403	- 3,010	0,000	0,000	10	5
17320	1	- 43,133	- 0,059	0,183	- 0,985	0,366	4,558	0,000	0,000	10	5
17320	2	- 43,133	- 0,059	0,000	- 0,995	- 0,477	4,558	0,000	0,000	10	5
17323	1	- 86,282	- 0,027	- 0,003	0,019	- 0,790	- 11,880	0,000	0,000	10	5
17323	2	- 86,282	- 0,027	0,000	0,009	1,408	- 11,880	0,000	0,000	10	5
17324	1	- 87,825	- 0,016	- 0,092	0,502	0,939	13,111	0,000	0,000	10	5
17324	2	- 87,825	- 0,016	0,000	0,492	- 1,486	13,111	0,000	0,000	10	5
17327	1	- 47,835	0,021	- 0,067	0,369	- 0,560	- 7,492	0,000	0,000	10	5
17327	2	- 47,835	0,021	0,000	0,359	0,826	- 7,492	0,000	0,000	10	5
17328	1	- 46,833	0,028	0,011	- 0,055	0,491	7,908	0,000	0,000	10	5
17328	2	- 46,833	0,028	0,000	- 0,065	- 0,972	7,908	0,000	0,000	10	5
17331	1	- 67,068	0,033	- 0,025	0,138	- 0,524	- 8,015	0,000	0,000	10	5
17331	2	- 67,068	0,033	0,000	0,128	0,959	- 8,015	0,000	0,000	10	5
17332	1	- 66,046	0,002	0,036	- 0,189	0,456	7,995	0,000	0,000	10	5
17332	2	- 66,046	0,002	0,000	- 0,199	- 1,023	7,995	0,000	0,000	10	5
17335	1	- 45,668	0,066	- 0,163	0,887	- 0,332	- 4,530	0,000	0,000	10	5
17335	2	- 45,668	0,066	0,000	0,877	0,506	- 4,530	0,000	0,000	10	5
17336	1	- 42,104	0,045	0,027	- 0,140	0,314	6,158	0,000	0,000	10	5
17336	2	- 42,104	0,045	0,000	- 0,150	- 0,825	6,158	0,000	0,000	10	5
17340	1	- 70,845	0,075	- 0,119	0,650	0,012	1,009	0,000	0,000	10	5
17340	2	- 70,845	0,075	0,000	0,640	- 0,175	1,009	0,000	0,000	10	5
17341	1	- 66,628	0,041	0,000	0,268	0,401	3,921	0,000	0,000	10	5
17341	2	- 66,628	0,041	0,049	0,258	- 0,324	3,921	0,000	0,000	10	5
17344	1	- 70,902	- 0,011	- 0,030	0,168	- 0,755	- 10,977	0,000	0,000	10	5
17344	2	- 70,902	- 0,011	0,000	0,158	1,276	- 10,977	0,000	0,000	10	5
17345	1	- 62,979	- 0,018	- 0,061	0,333	0,298	5,080	0,000	0,000	10	5
17345	2	- 62,979	- 0,018	0,000	0,323	- 0,641	5,080	0,000	0,000	10	5

Таблица 7 – Таблица усилий (стержни) по РСН 6

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 36,599	0,010	- 0,164	0,894	- 0,606	- 7,235	0,000	0,000	10	6
17311	2	- 36,599	0,010	0,000	0,884	0,732	- 7,235	0,000	0,000	10	6
17312	1	- 34,019	0,006	- 0,121	0,660	0,120	3,167	0,000	0,000	10	6
17312	2	- 34,019	0,006	0,000	0,650	- 0,466	3,167	0,000	0,000	10	6
17315	1	- 49,676	0,023	0,000	1,450	- 0,282	- 2,763	0,000	0,000	10	6
17315	2	- 49,676	0,023	0,267	1,440	0,229	- 2,763	0,000	0,000	10	6
17316	1	- 50,414	- 0,055	0,000	1,093	0,594	5,664	0,000	0,000	10	6
17316	2	- 50,414	- 0,055	0,201	1,083	- 0,454	5,664	0,000	0,000	10	6
17319	1	- 64,569	0,000	0,477	- 2,575	- 0,238	- 4,672	0,000	0,000	10	6
17319	2	- 64,569	0,000	0,000	- 2,585	0,627	- 4,672	0,000	0,000	10	6
17320	1	- 68,112	- 0,095	0,302	- 1,626	0,577	7,149	0,000	0,000	10	6
17320	2	- 68,112	- 0,095	0,000	- 1,636	- 0,745	7,149	0,000	0,000	10	6
17323	1	- 137,063	- 0,043	- 0,001	0,011	- 1,258	- 18,884	0,000	0,000	10	6
17323	2	- 137,063	- 0,043	0,000	0,001	2,236	- 18,884	0,000	0,000	10	6
17324	1	- 139,501	- 0,025	- 0,142	0,774	1,497	20,869	0,000	0,000	10	6
17324	2	- 139,501	- 0,025	0,000	0,764	- 2,363	20,869	0,000	0,000	10	6
17327	1	- 75,715	0,034	- 0,106	0,575	- 0,890	- 11,857	0,000	0,000	10	6
17327	2	- 75,715	0,034	0,000	0,565	1,304	- 11,857	0,000	0,000	10	6
17328	1	- 74,098	0,045	0,020	- 0,101	0,780	12,565	0,000	0,000	10	6
17328	2	- 74,098	0,045	0,000	- 0,112	- 1,545	12,565	0,000	0,000	10	6
17331	1	- 104,691	0,054	- 0,029	0,163	- 0,813	- 12,441	0,000	0,000	10	6
17331	2	- 104,691	0,054	0,000	0,153	1,488	- 12,441	0,000	0,000	10	6
17332	1	- 103,025	0,004	0,071	- 0,378	0,709	12,462	0,000	0,000	10	6
17332	2	- 103,025	0,004	0,000	- 0,388	- 1,597	12,462	0,000	0,000	10	6
17335	1	- 70,684	0,103	- 0,246	1,337	- 0,513	- 6,987	0,000	0,000	10	6
17335	2	- 70,684	0,103	0,000	1,327	0,780	- 6,987	0,000	0,000	10	6
17336	1	- 65,109	0,071	0,052	- 0,274	0,486	9,559	0,000	0,000	10	6
17336	2	- 65,109	0,071	0,000	- 0,284	- 1,282	9,559	0,000	0,000	10	6
17340	1	- 108,038	0,116	- 0,178	0,969	0,019	1,568	0,000	0,000	10	6
17340	2	- 108,038	0,116	0,000	0,959	- 0,271	1,568	0,000	0,000	10	6
17341	1	- 101,455	0,064	0,000	0,456	0,622	6,077	0,000	0,000	10	6
17341	2	- 101,455	0,064	0,083	0,445	- 0,502	6,077	0,000	0,000	10	6
17344	1	- 113,557	- 0,017	- 0,051	0,278	- 1,212	- 17,612	0,000	0,000	10	6
17344	2	- 113,557	- 0,017	0,000	0,268	2,046	- 17,612	0,000	0,000	10	6
17345	1	- 100,730	- 0,027	- 0,097	0,528	0,477	8,128	0,000	0,000	10	6
17345	2	- 100,730	- 0,027	0,000	0,518	- 1,027	8,128	0,000	0,000	10	6

Таблица 8 – Таблица усилий (стержни) по РСН 7

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,818	0,015	- 0,230	1,250	- 0,829	- 9,853	0,000	0,000	10	7
17311	2	- 49,818	0,015	0,000	1,240	0,994	- 9,853	0,000	0,000	10	7
17312	1	- 46,201	0,010	- 0,167	0,910	0,163	4,353	0,000	0,000	10	7
17312	2	- 46,201	0,010	0,000	0,900	- 0,642	4,353	0,000	0,000	10	7
17315	1	- 65,725	0,032	0,000	1,932	- 0,332	- 3,390	0,000	0,000	10	7
17315	2	- 65,725	0,032	0,356	1,922	0,295	- 3,390	0,000	0,000	10	7
17316	1	- 66,565	- 0,072	0,000	1,484	0,796	7,575	0,000	0,000	10	7
17316	2	- 66,565	- 0,072	0,274	1,474	- 0,605	7,575	0,000	0,000	10	7
17319	1	- 84,983	0,001	0,626	- 3,381	- 0,310	- 6,042	0,000	0,000	10	7
17319	2	- 84,983	0,001	0,000	- 3,391	0,808	- 6,042	0,000	0,000	10	7
17320	1	- 89,616	- 0,126	0,394	- 2,126	0,765	9,414	0,000	0,000	10	7
17320	2	- 89,616	- 0,126	0,000	- 2,136	- 0,977	9,414	0,000	0,000	10	7
17323	1	- 179,017	- 0,056	- 0,035	0,195	- 1,659	- 24,751	0,000	0,000	10	7
17323	2	- 179,017	- 0,056	0,000	0,185	2,920	- 24,751	0,000	0,000	10	7
17324	1	- 181,881	- 0,026	- 0,201	1,091	1,990	27,653	0,000	0,000	10	7
17324	2	- 181,881	- 0,026	0,000	1,081	- 3,126	27,653	0,000	0,000	10	7
17327	1	- 95,485	0,050	- 0,108	0,589	- 1,093	- 14,567	0,000	0,000	10	7
17327	2	- 95,485	0,050	0,000	0,579	1,602	- 14,567	0,000	0,000	10	7
17328	1	- 93,252	0,060	0,067	- 0,358	0,959	15,696	0,000	0,000	10	7
17328	2	- 93,252	0,060	0,000	- 0,368	- 1,945	15,696	0,000	0,000	10	7
17331	1	- 129,136	0,071	- 0,021	0,117	- 1,000	- 15,277	0,000	0,000	10	7
17331	2	- 129,136	0,071	0,000	0,107	1,826	- 15,277	0,000	0,000	10	7
17332	1	- 126,798	0,008	0,118	- 0,630	0,863	15,332	0,000	0,000	10	7
17332	2	- 126,798	0,008	0,000	- 0,640	- 1,973	15,332	0,000	0,000	10	7
17335	1	- 86,143	0,128	- 0,291	1,578	- 0,628	- 8,523	0,000	0,000	10	7
17335	2	- 86,143	0,128	0,000	1,568	0,949	- 8,523	0,000	0,000	10	7
17336	1	- 79,221	0,089	0,079	- 0,423	0,586	11,640	0,000	0,000	10	7
17336	2	- 79,221	0,089	0,000	- 0,433	- 1,567	11,640	0,000	0,000	10	7
17340	1	- 129,829	0,142	- 0,212	1,150	0,026	1,929	0,000	0,000	10	7
17340	2	- 129,829	0,142	0,000	1,140	- 0,331	1,929	0,000	0,000	10	7
17341	1	- 122,235	0,079	0,000	0,602	0,758	7,411	0,000	0,000	10	7
17341	2	- 122,235	0,079	0,110	0,592	- 0,614	7,411	0,000	0,000	10	7
17344	1	- 154,767	- 0,022	- 0,075	0,412	- 1,655	- 24,034	0,000	0,000	10	7
17344	2	- 154,767	- 0,022	0,000	0,402	2,791	- 24,034	0,000	0,000	10	7
17345	1	- 137,141	- 0,036	- 0,135	0,735	0,650	11,089	0,000	0,000	10	7
17345	2	- 137,141	- 0,036	0,000	0,725	- 1,401	11,089	0,000	0,000	10	7

Таблица 9 – Таблица усилий (стержни) по РСН 8

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,824	0,015	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	8
17311	2	- 49,824	0,015	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	8
17312	1	- 46,209	0,010	- 0,168	0,911	0,163	4,355	0,000	0,000	10	8
17312	2	- 46,209	0,010	0,000	0,901	- 0,642	4,355	0,000	0,000	10	8
17315	1	- 65,748	0,032	0,000	1,930	- 0,332	- 3,392	0,000	0,000	10	8
17315	2	- 65,748	0,032	0,356	1,920	0,295	- 3,392	0,000	0,000	10	8
17316	1	- 66,589	- 0,072	0,000	1,481	0,797	7,579	0,000	0,000	10	8
17316	2	- 66,589	- 0,072	0,273	1,471	- 0,605	7,579	0,000	0,000	10	8
17319	1	- 85,017	0,001	0,626	- 3,377	- 0,310	- 6,046	0,000	0,000	10	8
17319	2	- 85,017	0,001	0,000	- 3,387	0,809	- 6,046	0,000	0,000	10	8
17320	1	- 89,651	- 0,126	0,394	- 2,122	0,765	9,420	0,000	0,000	10	8
17320	2	- 89,651	- 0,126	0,000	- 2,132	- 0,978	9,420	0,000	0,000	10	8
17323	1	- 179,047	- 0,056	- 0,036	0,198	- 1,659	- 24,756	0,000	0,000	10	8
17323	2	- 179,047	- 0,056	0,000	0,188	2,921	- 24,756	0,000	0,000	10	8
17324	1	- 181,911	- 0,026	- 0,201	1,094	1,990	27,658	0,000	0,000	10	8
17324	2	- 181,911	- 0,026	0,000	1,084	- 3,127	27,658	0,000	0,000	10	8
17327	1	- 95,496	0,050	- 0,108	0,591	- 1,093	- 14,570	0,000	0,000	10	8
17327	2	- 95,496	0,050	0,000	0,581	1,602	- 14,570	0,000	0,000	10	8
17328	1	- 93,263	0,060	0,067	- 0,356	0,959	15,698	0,000	0,000	10	8
17328	2	- 93,263	0,060	0,000	- 0,366	- 1,945	15,698	0,000	0,000	10	8
17331	1	- 129,148	0,071	- 0,021	0,118	- 1,000	- 15,279	0,000	0,000	10	8
17331	2	- 129,148	0,071	0,000	0,108	1,826	- 15,279	0,000	0,000	10	8
17332	1	- 126,810	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,334	0,000	0,000	10	8
17332	2	- 126,810	0,008	0,000	- 0,640	- 1,974	15,334	0,000	0,000	10	8
17335	1	- 86,151	0,128	- 0,291	1,579	- 0,628	- 8,524	0,000	0,000	10	8
17335	2	- 86,151	0,128	0,000	1,569	0,949	- 8,524	0,000	0,000	10	8
17336	1	- 79,228	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,641	0,000	0,000	10	8
17336	2	- 79,228	0,089	0,000	- 0,432	- 1,567	11,641	0,000	0,000	10	8
17340	1	- 129,833	0,143	- 0,212	1,151	0,026	1,930	0,000	0,000	10	8
17340	2	- 129,833	0,143	0,000	1,141	- 0,331	1,930	0,000	0,000	10	8
17341	1	- 122,238	0,079	0,000	0,601	0,758	7,412	0,000	0,000	10	8
17341	2	- 122,238	0,079	0,110	0,591	- 0,614	7,412	0,000	0,000	10	8
17344	1	- 154,785	- 0,022	- 0,075	0,412	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	8
17344	2	- 154,785	- 0,022	0,000	0,402	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	8
17345	1	- 137,164	- 0,036	- 0,135	0,735	0,650	11,092	0,000	0,000	10	8
17345	2	- 137,164	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,092	0,000	0,000	10	8

Таблица 10 – Таблица усилий (стержни) по РСН 9

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,828	0,014	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	9
17311	2	- 49,828	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	9
17312	1	- 46,213	0,010	- 0,168	0,912	0,164	4,356	0,000	0,000	10	9
17312	2	- 46,213	0,010	0,000	0,902	- 0,642	4,356	0,000	0,000	10	9
17315	1	- 65,762	0,032	0,000	1,928	- 0,332	- 3,392	0,000	0,000	10	9
17315	2	- 65,762	0,032	0,356	1,918	0,295	- 3,392	0,000	0,000	10	9
17316	1	- 66,604	- 0,072	0,000	1,479	0,797	7,583	0,000	0,000	10	9
17316	2	- 66,604	- 0,072	0,273	1,469	- 0,605	7,583	0,000	0,000	10	9
17319	1	- 85,040	0,001	0,625	- 3,374	- 0,310	- 6,049	0,000	0,000	10	9
17319	2	- 85,040	0,001	0,000	- 3,384	0,809	- 6,049	0,000	0,000	10	9
17320	1	- 89,675	- 0,126	0,393	- 2,120	0,765	9,424	0,000	0,000	10	9
17320	2	- 89,675	- 0,126	0,000	- 2,130	- 0,978	9,424	0,000	0,000	10	9
17323	1	- 179,068	- 0,056	- 0,036	0,200	- 1,660	- 24,760	0,000	0,000	10	9
17323	2	- 179,068	- 0,056	0,000	0,190	2,921	- 24,760	0,000	0,000	10	9
17324	1	- 181,933	- 0,026	- 0,202	1,096	1,990	27,662	0,000	0,000	10	9
17324	2	- 181,933	- 0,026	0,000	1,086	- 3,127	27,662	0,000	0,000	10	9
17327	1	- 95,504	0,050	- 0,109	0,592	- 1,093	- 14,572	0,000	0,000	10	9
17327	2	- 95,504	0,050	0,000	0,582	1,603	- 14,572	0,000	0,000	10	9
17328	1	- 93,271	0,060	0,067	- 0,355	0,959	15,700	0,000	0,000	10	9
17328	2	- 93,271	0,060	0,000	- 0,365	- 1,945	15,700	0,000	0,000	10	9
17331	1	- 129,159	0,071	- 0,021	0,119	- 1,000	- 15,281	0,000	0,000	10	9
17331	2	- 129,159	0,071	0,000	0,109	1,827	- 15,281	0,000	0,000	10	9
17332	1	- 126,820	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,336	0,000	0,000	10	9
17332	2	- 126,820	0,008	0,000	- 0,639	- 1,974	15,336	0,000	0,000	10	9
17335	1	- 86,158	0,128	- 0,291	1,580	- 0,628	- 8,525	0,000	0,000	10	9
17335	2	- 86,158	0,128	0,000	1,570	0,949	- 8,525	0,000	0,000	10	9
17336	1	- 79,235	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,643	0,000	0,000	10	9
17336	2	- 79,235	0,089	0,000	- 0,432	- 1,568	11,643	0,000	0,000	10	9
17340	1	- 129,837	0,143	- 0,212	1,152	0,026	1,931	0,000	0,000	10	9
17340	2	- 129,837	0,143	0,000	1,142	- 0,331	1,931	0,000	0,000	10	9
17341	1	- 122,240	0,079	0,000	0,600	0,758	7,413	0,000	0,000	10	9
17341	2	- 122,240	0,079	0,110	0,590	- 0,614	7,413	0,000	0,000	10	9
17344	1	- 154,798	- 0,022	- 0,075	0,412	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	9
17344	2	- 154,798	- 0,022	0,000	0,402	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	9
17345	1	- 137,182	- 0,036	- 0,135	0,735	0,651	11,095	0,000	0,000	10	9
17345	2	- 137,182	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,095	0,000	0,000	10	9

Таблица 11 – Таблица усилий (стержни) по РСН 10

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,829	0,014	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	10
17311	2	- 49,829	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	10
17312	1	- 46,216	0,010	- 0,168	0,912	0,164	4,357	0,000	0,000	10	10
17312	2	- 46,216	0,010	0,000	0,902	- 0,642	4,357	0,000	0,000	10	10
17315	1	- 65,767	0,032	0,000	1,928	- 0,332	- 3,391	0,000	0,000	10	10
17315	2	- 65,767	0,032	0,356	1,918	0,295	- 3,391	0,000	0,000	10	10
17316	1	- 66,609	- 0,072	0,000	1,479	0,797	7,584	0,000	0,000	10	10
17316	2	- 66,609	- 0,072	0,273	1,468	- 0,606	7,584	0,000	0,000	10	10
17319	1	- 85,047	0,001	0,625	- 3,373	- 0,310	- 6,050	0,000	0,000	10	10
17319	2	- 85,047	0,001	0,000	- 3,384	0,809	- 6,050	0,000	0,000	10	10
17320	1	- 89,682	- 0,126	0,393	- 2,119	0,765	9,425	0,000	0,000	10	10
17320	2	- 89,682	- 0,126	0,000	- 2,129	- 0,978	9,425	0,000	0,000	10	10
17323	1	- 179,074	- 0,056	- 0,036	0,201	- 1,660	- 24,761	0,000	0,000	10	10
17323	2	- 179,074	- 0,056	0,000	0,191	2,921	- 24,761	0,000	0,000	10	10
17324	1	- 181,939	- 0,026	- 0,202	1,097	1,990	27,663	0,000	0,000	10	10
17324	2	- 181,939	- 0,026	0,000	1,087	- 3,128	27,663	0,000	0,000	10	10
17327	1	- 95,507	0,050	- 0,109	0,593	- 1,093	- 14,572	0,000	0,000	10	10
17327	2	- 95,507	0,050	0,000	0,583	1,603	- 14,572	0,000	0,000	10	10
17328	1	- 93,273	0,060	0,067	- 0,355	0,959	15,700	0,000	0,000	10	10
17328	2	- 93,273	0,060	0,000	- 0,365	- 1,945	15,700	0,000	0,000	10	10
17331	1	- 129,163	0,071	- 0,021	0,119	- 1,001	- 15,282	0,000	0,000	10	10
17331	2	- 129,163	0,071	0,000	0,109	1,827	- 15,282	0,000	0,000	10	10
17332	1	- 126,824	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,336	0,000	0,000	10	10
17332	2	- 126,824	0,008	0,000	- 0,639	- 1,974	15,336	0,000	0,000	10	10
17335	1	- 86,161	0,128	- 0,291	1,580	- 0,628	- 8,526	0,000	0,000	10	10
17335	2	- 86,161	0,128	0,000	1,570	0,949	- 8,526	0,000	0,000	10	10
17336	1	- 79,238	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,643	0,000	0,000	10	10
17336	2	- 79,238	0,089	0,000	- 0,432	- 1,568	11,643	0,000	0,000	10	10
17340	1	- 129,838	0,143	- 0,212	1,152	0,026	1,931	0,000	0,000	10	10
17340	2	- 129,838	0,143	0,000	1,142	- 0,331	1,931	0,000	0,000	10	10
17341	1	- 122,241	0,079	0,000	0,600	0,758	7,414	0,000	0,000	10	10
17341	2	- 122,241	0,079	0,110	0,590	- 0,614	7,414	0,000	0,000	10	10
17344	1	- 154,804	- 0,022	- 0,075	0,411	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	10
17344	2	- 154,804	- 0,022	0,000	0,401	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	10
17345	1	- 137,190	- 0,036	- 0,135	0,735	0,651	11,096	0,000	0,000	10	10
17345	2	- 137,190	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,096	0,000	0,000	10	10

Таблица 12 – Таблица усилий (стержни) по РСН 11

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,829	0,014	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	11
17311	2	- 49,829	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	11
17312	1	- 46,216	0,010	- 0,168	0,912	0,164	4,357	0,000	0,000	10	11
17312	2	- 46,216	0,010	0,000	0,902	- 0,642	4,357	0,000	0,000	10	11
17315	1	- 65,771	0,032	0,000	1,927	- 0,332	- 3,393	0,000	0,000	10	11
17315	2	- 65,771	0,032	0,356	1,917	0,295	- 3,393	0,000	0,000	10	11
17316	1	- 66,614	- 0,072	0,000	1,478	0,798	7,584	0,000	0,000	10	11
17316	2	- 66,614	- 0,072	0,273	1,468	- 0,606	7,584	0,000	0,000	10	11
17319	1	- 85,052	0,001	0,625	- 3,373	- 0,310	- 6,051	0,000	0,000	10	11
17319	2	- 85,052	0,001	0,000	- 3,383	0,809	- 6,051	0,000	0,000	10	11
17320	1	- 89,688	- 0,126	0,393	- 2,118	0,765	9,427	0,000	0,000	10	11
17320	2	- 89,688	- 0,126	0,000	- 2,128	- 0,978	9,427	0,000	0,000	10	11
17323	1	- 179,081	- 0,056	- 0,036	0,202	- 1,660	- 24,762	0,000	0,000	10	11
17323	2	- 179,081	- 0,056	0,000	0,192	2,921	- 24,762	0,000	0,000	10	11
17324	1	- 181,945	- 0,026	- 0,202	1,097	1,990	27,664	0,000	0,000	10	11
17324	2	- 181,945	- 0,026	0,000	1,087	- 3,128	27,664	0,000	0,000	10	11
17327	1	- 95,511	0,050	- 0,109	0,593	- 1,093	- 14,573	0,000	0,000	10	11
17327	2	- 95,511	0,050	0,000	0,583	1,603	- 14,573	0,000	0,000	10	11
17328	1	- 93,277	0,060	0,066	- 0,354	0,959	15,700	0,000	0,000	10	11
17328	2	- 93,277	0,060	0,000	- 0,364	- 1,946	15,700	0,000	0,000	10	11
17331	1	- 129,166	0,071	- 0,021	0,119	- 1,000	- 15,282	0,000	0,000	10	11
17331	2	- 129,166	0,071	0,000	0,109	1,827	- 15,282	0,000	0,000	10	11
17332	1	- 126,827	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,336	0,000	0,000	10	11
17332	2	- 126,827	0,008	0,000	- 0,639	- 1,974	15,336	0,000	0,000	10	11
17335	1	- 86,163	0,128	- 0,291	1,580	- 0,628	- 8,526	0,000	0,000	10	11
17335	2	- 86,163	0,128	0,000	1,570	0,949	- 8,526	0,000	0,000	10	11
17336	1	- 79,240	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,643	0,000	0,000	10	11
17336	2	- 79,240	0,089	0,000	- 0,432	- 1,568	11,643	0,000	0,000	10	11
17340	1	- 129,865	0,143	- 0,212	1,152	0,026	1,930	0,000	0,000	10	11
17340	2	- 129,865	0,143	0,000	1,142	- 0,331	1,930	0,000	0,000	10	11
17341	1	- 122,282	0,079	0,000	0,600	0,758	7,413	0,000	0,000	10	11
17341	2	- 122,282	0,079	0,110	0,590	- 0,614	7,413	0,000	0,000	10	11
17344	1	- 154,802	- 0,022	- 0,075	0,411	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	11
17344	2	- 154,802	- 0,022	0,000	0,401	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	11
17345	1	- 137,190	- 0,036	- 0,135	0,735	0,651	11,096	0,000	0,000	10	11
17345	2	- 137,190	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,096	0,000	0,000	10	11

Таблица 13 – Таблица усилий (стержни) по РСН 12

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,829	0,014	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	12
17311	2	- 49,829	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	12
17312	1	- 46,216	0,010	- 0,168	0,912	0,164	4,357	0,000	0,000	10	12
17312	2	- 46,216	0,010	0,000	0,902	- 0,642	4,357	0,000	0,000	10	12
17315	1	- 65,772	0,032	0,000	1,927	- 0,332	- 3,393	0,000	0,000	10	12
17315	2	- 65,772	0,032	0,356	1,917	0,295	- 3,393	0,000	0,000	10	12
17316	1	- 66,614	- 0,072	0,000	1,478	0,798	7,584	0,000	0,000	10	12
17316	2	- 66,614	- 0,072	0,273	1,468	- 0,606	7,584	0,000	0,000	10	12
17319	1	- 85,052	0,001	0,625	- 3,373	- 0,310	- 6,051	0,000	0,000	10	12
17319	2	- 85,052	0,001	0,000	- 3,383	0,809	- 6,051	0,000	0,000	10	12
17320	1	- 89,688	- 0,126	0,393	- 2,118	0,765	9,427	0,000	0,000	10	12
17320	2	- 89,688	- 0,126	0,000	- 2,128	- 0,979	9,427	0,000	0,000	10	12
17323	1	- 179,081	- 0,056	- 0,036	0,202	- 1,660	- 24,762	0,000	0,000	10	12
17323	2	- 179,081	- 0,056	0,000	0,192	2,921	- 24,762	0,000	0,000	10	12
17324	1	- 181,946	- 0,026	- 0,202	1,098	1,990	27,664	0,000	0,000	10	12
17324	2	- 181,946	- 0,026	0,000	1,087	- 3,128	27,664	0,000	0,000	10	12
17327	1	- 95,511	0,050	- 0,109	0,593	- 1,093	- 14,573	0,000	0,000	10	12
17327	2	- 95,511	0,050	0,000	0,583	1,603	- 14,573	0,000	0,000	10	12
17328	1	- 93,278	0,060	0,066	- 0,354	0,959	15,700	0,000	0,000	10	12
17328	2	- 93,278	0,060	0,000	- 0,364	- 1,946	15,700	0,000	0,000	10	12
17331	1	- 129,167	0,071	- 0,021	0,119	- 1,000	- 15,282	0,000	0,000	10	12
17331	2	- 129,167	0,071	0,000	0,109	1,827	- 15,282	0,000	0,000	10	12
17332	1	- 126,827	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,336	0,000	0,000	10	12
17332	2	- 126,827	0,008	0,000	- 0,639	- 1,974	15,336	0,000	0,000	10	12
17335	1	- 86,165	0,128	- 0,291	1,580	- 0,628	- 8,526	0,000	0,000	10	12
17335	2	- 86,165	0,128	0,000	1,570	0,949	- 8,526	0,000	0,000	10	12
17336	1	- 79,241	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,643	0,000	0,000	10	12
17336	2	- 79,241	0,089	0,000	- 0,432	- 1,568	11,643	0,000	0,000	10	12
17340	1	- 129,869	0,143	- 0,212	1,152	0,026	1,930	0,000	0,000	10	12
17340	2	- 129,869	0,143	0,000	1,142	- 0,331	1,930	0,000	0,000	10	12
17341	1	- 122,287	0,079	0,000	0,600	0,758	7,413	0,000	0,000	10	12
17341	2	- 122,287	0,079	0,110	0,590	- 0,614	7,413	0,000	0,000	10	12
17344	1	- 154,802	- 0,022	- 0,075	0,411	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	12
17344	2	- 154,802	- 0,022	0,000	0,401	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	12
17345	1	- 137,189	- 0,036	- 0,135	0,735	0,651	11,096	0,000	0,000	10	12
17345	2	- 137,189	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,096	0,000	0,000	10	12

Таблица 14 – Таблица усилий (стержни) по РСН 13

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,829	0,014	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	13
17311	2	- 49,829	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	13
17312	1	- 46,216	0,010	- 0,168	0,912	0,164	4,357	0,000	0,000	10	13
17312	2	- 46,216	0,010	0,000	0,902	- 0,642	4,357	0,000	0,000	10	13
17315	1	- 65,772	0,032	0,000	1,927	- 0,332	- 3,393	0,000	0,000	10	13
17315	2	- 65,772	0,032	0,356	1,917	0,295	- 3,393	0,000	0,000	10	13
17316	1	- 66,614	- 0,072	0,000	1,478	0,798	7,584	0,000	0,000	10	13
17316	2	- 66,614	- 0,072	0,273	1,468	- 0,606	7,584	0,000	0,000	10	13
17319	1	- 85,052	0,001	0,625	- 3,373	- 0,310	- 6,051	0,000	0,000	10	13
17319	2	- 85,052	0,001	0,000	- 3,383	0,809	- 6,051	0,000	0,000	10	13
17320	1	- 89,688	- 0,126	0,393	- 2,118	0,765	9,427	0,000	0,000	10	13
17320	2	- 89,688	- 0,126	0,000	- 2,128	- 0,979	9,427	0,000	0,000	10	13
17323	1	- 179,081	- 0,056	- 0,036	0,202	- 1,660	- 24,762	0,000	0,000	10	13
17323	2	- 179,081	- 0,056	0,000	0,192	2,921	- 24,762	0,000	0,000	10	13
17324	1	- 181,946	- 0,026	- 0,202	1,098	1,990	27,664	0,000	0,000	10	13
17324	2	- 181,946	- 0,026	0,000	1,087	- 3,128	27,664	0,000	0,000	10	13
17327	1	- 95,512	0,050	- 0,109	0,593	- 1,093	- 14,573	0,000	0,000	10	13
17327	2	- 95,512	0,050	0,000	0,583	1,603	- 14,573	0,000	0,000	10	13
17328	1	- 93,278	0,060	0,066	- 0,354	0,959	15,700	0,000	0,000	10	13
17328	2	- 93,278	0,060	0,000	- 0,364	- 1,946	15,700	0,000	0,000	10	13
17331	1	- 129,167	0,071	- 0,021	0,119	- 1,001	- 15,282	0,000	0,000	10	13
17331	2	- 129,167	0,071	0,000	0,109	1,827	- 15,282	0,000	0,000	10	13
17332	1	- 126,828	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,336	0,000	0,000	10	13
17332	2	- 126,828	0,008	0,000	- 0,639	- 1,974	15,336	0,000	0,000	10	13
17335	1	- 86,165	0,128	- 0,291	1,580	- 0,628	- 8,526	0,000	0,000	10	13
17335	2	- 86,165	0,128	0,000	1,570	0,949	- 8,526	0,000	0,000	10	13
17336	1	- 79,241	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,643	0,000	0,000	10	13
17336	2	- 79,241	0,089	0,000	- 0,432	- 1,568	11,643	0,000	0,000	10	13
17340	1	- 129,868	0,143	- 0,212	1,153	0,026	1,930	0,000	0,000	10	13
17340	2	- 129,868	0,143	0,000	1,143	- 0,331	1,930	0,000	0,000	10	13
17341	1	- 122,286	0,079	0,000	0,600	0,758	7,413	0,000	0,000	10	13
17341	2	- 122,286	0,079	0,110	0,590	- 0,614	7,413	0,000	0,000	10	13
17344	1	- 154,801	- 0,022	- 0,075	0,412	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	13
17344	2	- 154,801	- 0,022	0,000	0,401	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	13
17345	1	- 137,188	- 0,036	- 0,135	0,735	0,651	11,096	0,000	0,000	10	13
17345	2	- 137,188	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,096	0,000	0,000	10	13

Таблица 15 – Таблица усилий (стержни) по РСН 14

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,829	0,014	- 0,230	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	14
17311	2	- 49,829	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	14
17312	1	- 46,216	0,010	- 0,168	0,912	0,164	4,357	0,000	0,000	10	14
17312	2	- 46,216	0,010	0,000	0,902	- 0,642	4,357	0,000	0,000	10	14
17315	1	- 65,772	0,032	0,000	1,927	- 0,332	- 3,393	0,000	0,000	10	14
17315	2	- 65,772	0,032	0,356	1,917	0,295	- 3,393	0,000	0,000	10	14
17316	1	- 66,614	- 0,072	0,000	1,478	0,798	7,584	0,000	0,000	10	14
17316	2	- 66,614	- 0,072	0,273	1,468	- 0,606	7,584	0,000	0,000	10	14
17319	1	- 85,053	0,001	0,625	- 3,373	- 0,310	- 6,051	0,000	0,000	10	14
17319	2	- 85,053	0,001	0,000	- 3,383	0,809	- 6,051	0,000	0,000	10	14
17320	1	- 89,688	- 0,126	0,393	- 2,118	0,765	9,427	0,000	0,000	10	14
17320	2	- 89,688	- 0,126	0,000	- 2,128	- 0,979	9,427	0,000	0,000	10	14
17323	1	- 179,081	- 0,056	- 0,036	0,202	- 1,660	- 24,762	0,000	0,000	10	14
17323	2	- 179,081	- 0,056	0,000	0,192	2,921	- 24,762	0,000	0,000	10	14
17324	1	- 181,946	- 0,026	- 0,202	1,098	1,990	27,664	0,000	0,000	10	14
17324	2	- 181,946	- 0,026	0,000	1,087	- 3,128	27,664	0,000	0,000	10	14
17327	1	- 95,511	0,050	- 0,109	0,593	- 1,093	- 14,573	0,000	0,000	10	14
17327	2	- 95,511	0,050	0,000	0,583	1,603	- 14,573	0,000	0,000	10	14
17328	1	- 93,278	0,060	0,066	- 0,354	0,959	15,701	0,000	0,000	10	14
17328	2	- 93,278	0,060	0,000	- 0,364	- 1,946	15,701	0,000	0,000	10	14
17331	1	- 129,167	0,071	- 0,021	0,120	- 1,001	- 15,283	0,000	0,000	10	14
17331	2	- 129,167	0,071	0,000	0,110	1,827	- 15,283	0,000	0,000	10	14
17332	1	- 126,828	0,008	0,117	- 0,629	0,863	15,336	0,000	0,000	10	14
17332	2	- 126,828	0,008	0,000	- 0,639	- 1,974	15,336	0,000	0,000	10	14
17335	1	- 86,165	0,128	- 0,291	1,580	- 0,628	- 8,526	0,000	0,000	10	14
17335	2	- 86,165	0,128	0,000	1,570	0,949	- 8,526	0,000	0,000	10	14
17336	1	- 79,241	0,089	0,079	- 0,422	0,586	11,643	0,000	0,000	10	14
17336	2	- 79,241	0,089	0,000	- 0,432	- 1,568	11,643	0,000	0,000	10	14
17340	1	- 129,865	0,143	- 0,212	1,153	0,026	1,930	0,000	0,000	10	14
17340	2	- 129,865	0,143	0,000	1,143	- 0,331	1,930	0,000	0,000	10	14
17341	1	- 122,281	0,079	0,000	0,599	0,758	7,414	0,000	0,000	10	14
17341	2	- 122,281	0,079	0,110	0,589	- 0,614	7,414	0,000	0,000	10	14
17344	1	- 154,801	- 0,022	- 0,075	0,412	- 1,655	- 24,035	0,000	0,000	10	14
17344	2	- 154,801	- 0,022	0,000	0,402	2,791	- 24,035	0,000	0,000	10	14
17345	1	- 137,188	- 0,036	- 0,135	0,735	0,651	11,096	0,000	0,000	10	14
17345	2	- 137,188	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,096	0,000	0,000	10	14

Таблица 16 – Таблица усилий (стержни) по РСН 15

№ элем	№ сечен	Усилия								Тип элем	№ РСН
		N (кН)	Mk (кН*м)	My (кН*м)	Qz (кН)	Mz (кН*м)	Qy (кН)	Ry (кН/м)	Rz (кН/м)		
17311	1	- 49,834	0,014	- 0,231	1,251	- 0,829	- 9,852	0,000	0,000	10	15
17311	2	- 49,834	0,014	0,000	1,241	0,994	- 9,852	0,000	0,000	10	15
17312	1	- 46,222	0,010	- 0,168	0,913	0,164	4,358	0,000	0,000	10	15
17312	2	- 46,222	0,010	0,000	0,903	- 0,643	4,358	0,000	0,000	10	15
17315	1	- 65,853	0,032	0,000	1,923	- 0,335	- 3,411	0,000	0,000	10	15
17315	2	- 65,853	0,032	0,355	1,913	0,296	- 3,411	0,000	0,000	10	15
17316	1	- 66,699	- 0,072	0,000	1,473	0,799	7,594	0,000	0,000	10	15
17316	2	- 66,699	- 0,072	0,272	1,463	- 0,606	7,594	0,000	0,000	10	15
17319	1	- 85,201	0,000	0,624	- 3,367	- 0,311	- 6,073	0,000	0,000	10	15
17319	2	- 85,201	0,000	0,000	- 3,377	0,812	- 6,073	0,000	0,000	10	15
17320	1	- 89,842	- 0,126	0,391	- 2,110	0,767	9,453	0,000	0,000	10	15
17320	2	- 89,842	- 0,126	0,000	- 2,120	- 0,982	9,453	0,000	0,000	10	15
17323	1	- 179,445	- 0,056	- 0,038	0,208	- 1,662	- 24,807	0,000	0,000	10	15
17323	2	- 179,445	- 0,056	0,000	0,198	2,928	- 24,807	0,000	0,000	10	15
17324	1	- 182,334	- 0,026	- 0,205	1,111	1,993	27,710	0,000	0,000	10	15
17324	2	- 182,334	- 0,026	0,000	1,101	- 3,134	27,710	0,000	0,000	10	15
17327	1	- 96,043	0,049	- 0,112	0,611	- 1,100	- 14,679	0,000	0,000	10	15
17327	2	- 96,043	0,049	0,000	0,601	1,616	- 14,679	0,000	0,000	10	15
17328	1	- 93,844	0,060	0,062	- 0,328	0,965	15,805	0,000	0,000	10	15
17328	2	- 93,844	0,060	0,000	- 0,338	- 1,959	15,805	0,000	0,000	10	15
17331	1	- 36,213	0,063	- 0,102	0,558	- 0,430	- 5,735	0,000	0,000	10	15
17331	2	- 36,213	0,063	0,000	0,548	0,631	- 5,735	0,000	0,000	10	15
17332	1	- 33,901	0,017	0,037	- 0,193	0,293	5,789	0,000	0,000	10	15
17332	2	- 33,901	0,017	0,000	- 0,203	- 0,778	5,789	0,000	0,000	10	15
17335	1	- 87,168	0,129	- 0,298	1,618	- 0,637	- 8,659	0,000	0,000	10	15
17335	2	- 87,168	0,129	0,000	1,608	0,965	- 8,659	0,000	0,000	10	15
17336	1	- 80,187	0,090	0,076	- 0,405	0,595	11,799	0,000	0,000	10	15
17336	2	- 80,187	0,090	0,000	- 0,415	- 1,588	11,799	0,000	0,000	10	15
17340	1	- 130,794	0,144	- 0,218	1,185	0,028	1,975	0,000	0,000	10	15
17340	2	- 130,794	0,144	0,000	1,175	- 0,337	1,975	0,000	0,000	10	15
17341	1	- 122,939	0,080	0,000	0,589	0,768	7,501	0,000	0,000	10	15
17341	2	- 122,939	0,080	0,108	0,579	- 0,620	7,501	0,000	0,000	10	15
17344	1	- 154,795	- 0,023	- 0,075	0,411	- 1,655	- 24,034	0,000	0,000	10	15
17344	2	- 154,795	- 0,023	0,000	0,401	2,791	- 24,034	0,000	0,000	10	15
17345	1	- 137,184	- 0,036	- 0,135	0,736	0,651	11,095	0,000	0,000	10	15
17345	2	- 137,184	- 0,036	0,000	0,725	- 1,402	11,095	0,000	0,000	10	15

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

РЕКОМЕНДАЦИИ

**ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПЕЧЕЙ ПРИ ПЕРВИЧНОМ ЗАПУСКЕ**

Макеевка 2021

Рекомендовано к внедрению заседанием кафедры «Технология и организация строительства». Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» от 26.08.2021, протокол № 1

Рецензент

С. В. Кожемяка, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология и организация строительства», ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

«Рекомендации по эксплуатации сводов промышленных печей при первичном запуске» / А. В. Ихно. – Макеевка : ГОУ ВПО «ДОННАСА»2021. – 14 с.

В настоящих рекомендациях приведены положения по контролю за состоянием сводов из огнеупорных материалов термических печей, при наличии средств регулировки в составе металлического обвязочного каркаса.

Приведены параметры регулирования сводов при их первичном запуске.

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников проектных строительных и научно-исследовательских организаций.

А. В. Ихно, 2021

ГОУ ВПО «ДОННАСА», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	172
Область применения.....	172
1. Общие требования при выводке комплексов.....	172
2. Эксплуатация футеровки печи при первичном запуске.....	174
3. Пример.....	180
Литература.....	180

Введение

Разработка Рекомендаций вызвана проблемой регулирования тяжей колонн обвязки печей в связи с деформированием колонн обвязки металлического каркаса и разрушением кладки сводов в период ввода в эксплуатацию.

Рекомендации разработаны с целью возможности управления напряженно-деформированным состоянием свода печи в процессе «выводки» промышленных печей в рабочий режим.

Положения настоящих Рекомендаций разработаны с учетом уточненных параметров нагрузок и воздействий на основе численных исследований, подтвержденными экспериментальным путем.

Применение методики позволяет повысить эксплуатационную надежность и продолжительность безремонтной работы печей с обеспечением безопасности и безаварийности процесса «выводки».

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников предприятий, проектных строительных и научно-исследовательских организаций.

Область применения

Рекомендации распространяются на процесс «выводки» сводов из огнеупорного материала (ГОСТ 3910-75) промышленных печей с пролетом не более 7 м при наличии средств регулировки в составе металлического обвязочного каркаса.

1. Общие требования при выводке комплексов

1.1. Пуск промышленных печей следует осуществлять в строгом соответствии с технологическим регламентом, представляющим собой совокупность необходимых режимов и правил, определяющих порядок проведения термотехнологических процессов.

1.2. Конкретные термотехнологические процессы требуют создания определенных, только им присущих условий.

1.3. Для исключения необоснованных остановок и аварий при пуске и последующей эксплуатации печей необходима предварительная проверка:

- готовности печного комплекса к пуску;
- выполнения всех мероприятий, обеспечивающих безопасность эксплуатационного персонала при пуске.

1.4. Перед началом пуска печного комплекса необходимо произвести подготовительные работы:

- проверить состояние и чистоту температурных швов в футеровке, наличие и чистоту компенсационных зазоров для температурного расширения элементов печи;
- проверить и подготовить к запуску систему охлаждения;
- проверить отсутствие на печи и близ нее горючих материалов и др. посторонних предметов;
- проверить исправность освещения вокруг печи и во вспомогательных помещениях;
- проверить состояние сжигательных устройств и нагревателей;
- проверить состояние противопожарного инвентаря;
- проверить наличие предупредительных надписей;
- проверить целостность элементов каркаса обвязки печи;
- для контроля температурного режима следует установить временные термопары. Временные термопары могут быть установлены в температурных швах между секциями;
- для контроля увеличения подъема свода печи следует установить по поверхности свода каждой секции линейные указатели (маяки);
- установить автоматическую оповестительную сигнализацию в помещении оператора пульта, для извещения дежурного работника о необходимости регулирования опор свода печи. Извещения подаются каждый час оптическим и акустическим сигналом.

2. Эксплуатация футеровки печи при первичном запуске

2.1. Эксплуатация футеровки печи – это комплекс практических действий, обеспечивающих сохранение в течение длительного времени строительной прочности и требуемой газоплотности при осуществлении печных процессов.

2.2. В процессе разогрева футеровки особому контролю подвергаются состояние сводов и состояние температурных швов.

2.3. Разогрев футеровки необходимо проводить медленно и равномерно, с целью предотвращения ее разрушения из-за резкого подъема температуры внутренней поверхности рабочей камеры.

На рисунке 1 представлен график выводки средней стекловаренной печи (100 т/сутки), непрерывного действия, регенеративной с подковообразным направлением топливного факела. На графике отмечены «площадки выдержки» температуры (ч) при определенной температуре ($^{\circ}\text{C}$).

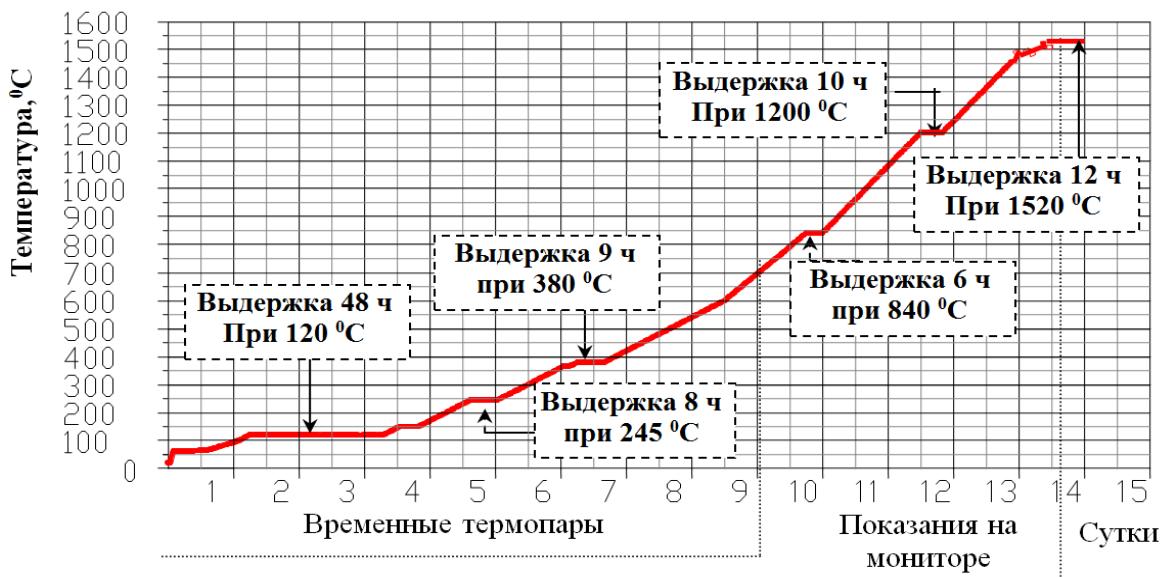


Рисунок 1 – График «выводки» печи по производству листового стекла с размерами в плане $15,5 \times 8,2$ м и высотой варочного отсека 1,5 м.

2.4. Параметры графика «выводки» печи (скорость подъема температуры, количество температурных площадок, время выдержки на температурных площадках) зависят от конструкции печи, и свойств применяемого огнеупорного материала, а также сезонности проведения работ по запуску.

2.5. В случае обнаружения ненормальностей в процессе выводки их следует устраниить по возможности, делая выдержку при той температуре, при которой был обнаружен дефект.

2.6. Во избежание разрушения и уменьшения напряжений в кладке свода следует производить «отпуск» тяжей металлического каркаса, в зависимости от пролета свода (L) определяются температура.

2.7. Алгоритм определения оптимальных температурных интервалов приведен в виде блок-схемы на рисунке 2.

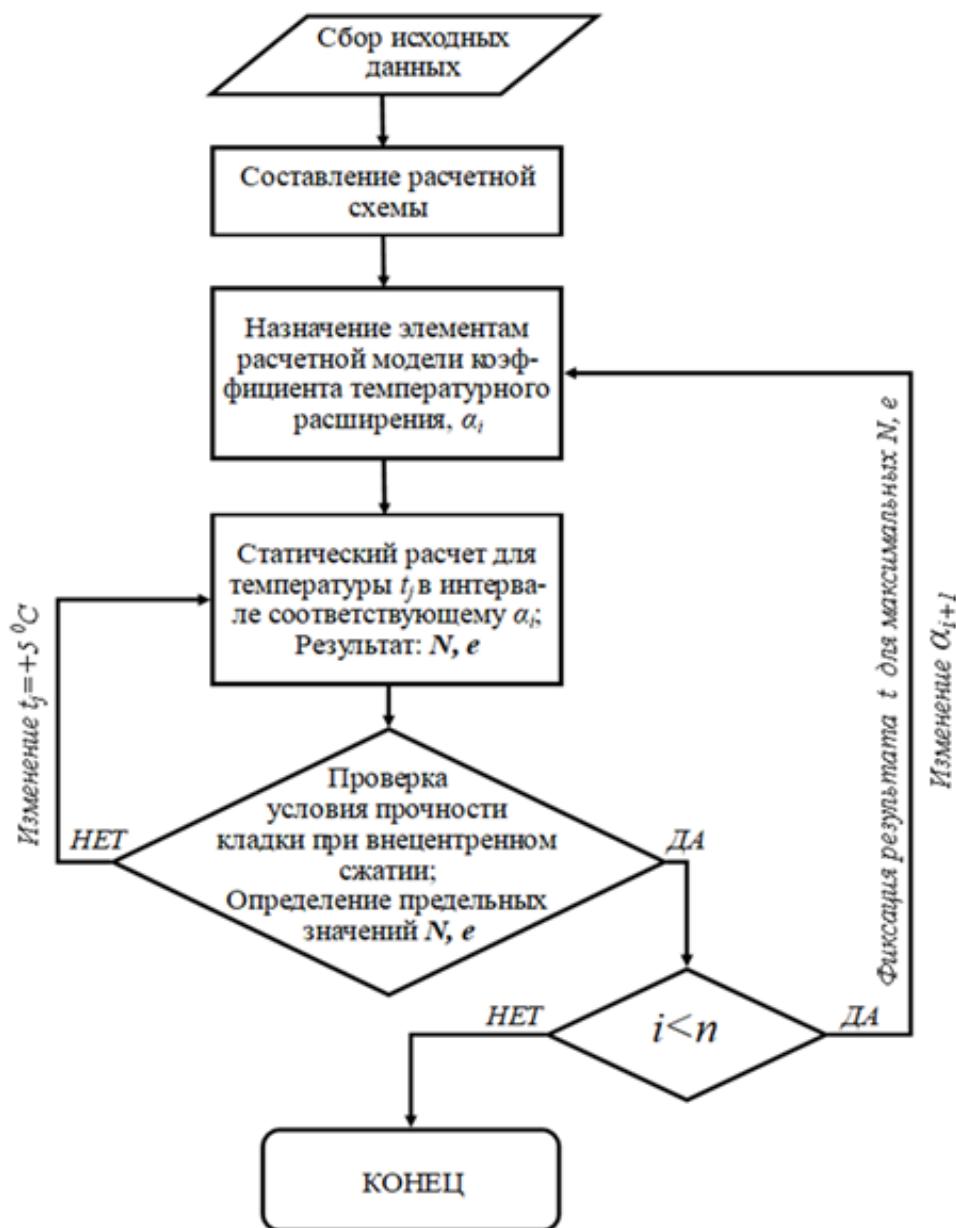


Рисунок 2 – Алгоритм определения оптимальных температурных интервалов роспуска тяжей.

Задача сводится к поиску температурных интервалов печи при которой возникает предельное состояние кладки свода печи. Ограничением является эксцентризитет, который не должен превышать 135 мм.

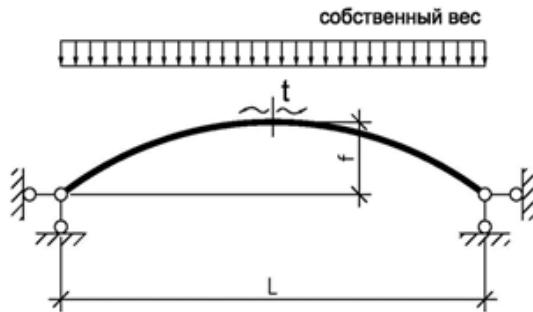


Рисунок 3 – Расчетная схема.

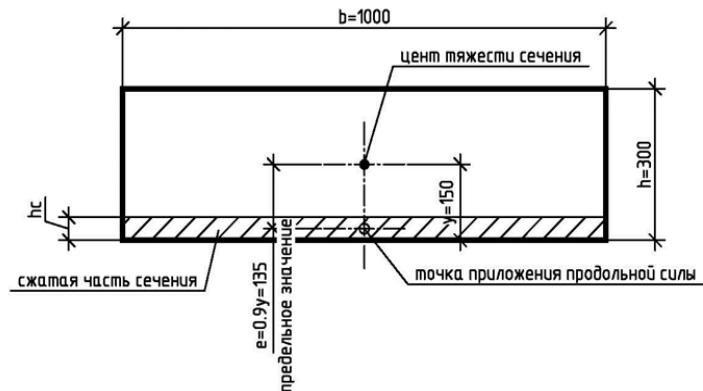


Рисунок 4 – Расчетное сечение свода.

2.7. Регулирование пят свода в период его нагрева рекомендуется производить в соответствии с графиком 5, согласно которому определяется температуры, при которых необходимо произвести ослабление регулировочных болтов. На рисунке 5 представлен график зависимости температуры роспуска опоры свода в зависимости от пролета свода.

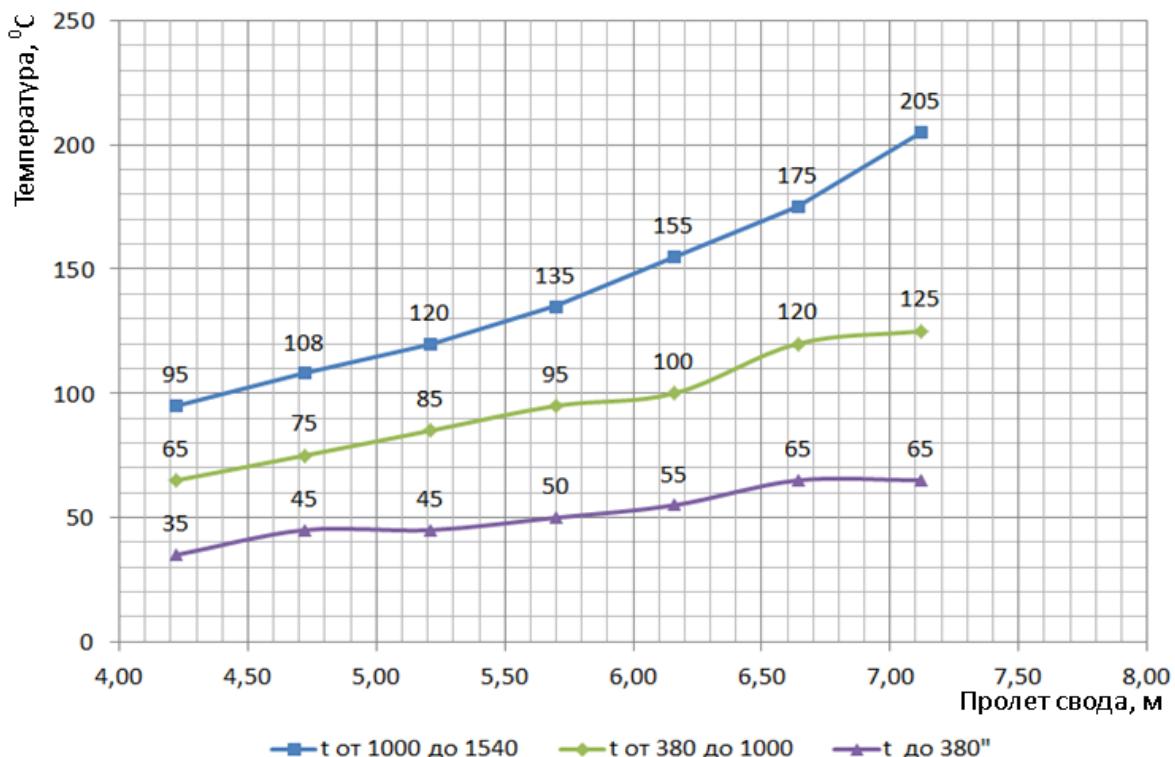


Рисунок 5 – График к определению параметров регулирования сводов в зависимости от пролета для характерных интервалов.

2.8. Температурный интервал характеризуется соответствующим значением коэффициента температурного расширения кладки свода. В таблице 1 приведены значения коэффициентов температурного расширения (α) в зависимости от температурного интервала.

Таблица 1 – Коэффициенты температурного расширения в зависимости от интервала температур

№ п/п	Интервал температур, градус	Коэффициент температурного расширения α , 10^{-5}
1	0–380	3,2
2	380–1 000	1,7
3	1 000–1 540	1,15

Интервалы температур выбраны по результатам дискретизации диаграммы изменения коэффициента линейного расширения динасовых изделий при повышении температуры. В таблице 1 представлены коэффициенты температурного расширения для трех характерных интервалов температурного режима эксплуатации. Дискретные участки приняты по принципу равенства приращения на предыдущем и последующем участках.

2.9. Рекомендуемые температуры основаны на учете изменения эксцентрикитета приложения N , м (таблица 2).

2.10. Для регулирования опор пят свода в период наращивания температурного режима найдены количественные значения параметров отпуска тяжей. Количество витков n_e , необходимого отпуска тяжей определяется как $\Delta l/2\pi D$. В таблице 3 представлены значения количества витков n_e , необходимого для стабилизации напряжений в своде с учетом его пролета L в температурном интервале.

Таблица 2 – Частные значения температур роспуска тяжей свода при соотношении $L/f = 7,4$

№ п/п	Пролет, м	Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент температурного расширения $\times 10^{-5}$	Эксцентриситет приложения N , м	Температура отпуска регулировочных болтов, $^{\circ}\text{C}$
1	2	5	6	11	12
2	4,22	1 000–1 540	1,15	0,122	95
		380–1 000	1,7	0,123	65
		до 380	3,3	0,125	35
3	4,72	1 000–1 540	1,15	0,128	108
		380–1 000	1,7	0,129	75
		до 380	3,3	0,132	45
4	5,21	1 000–1 540	1,15	0,125	120
		380–1 000	1,7	0,126	85
		до 380	3,3	0,130	45
5	5,70	1 000–1 540	1,15	0,125	135
		380–1 000	1,7	0,130	95
		до 380	3,3	0,128	50
6	6,16	1 000–1 540	1,15	0,126	155
		380–1 000	1,7	0,131	100
		до 380	3,3	0,126	55
7	6,64	1 000–1 540	1,15	0,129	180
		380–1 000	1,7	0,130	123
		до 380	3,3	0,129	65
8	7,12	1 000–1 540	1,15	0,128	205
		380–1 000	1,7	0,127	120
		до 380	3,3	0,129	65

Таблица 3 – Частные значения отпуска тяжей при соотношении $L/f = 7,4$

№ п/п	Пролет L , м	Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Температура открутки	Удлинение, Δl , мм	Кол-во витков M30	
					с крупным шагом (3 мм)	с мелким шагом (2 мм)
1	2	3	4	5	6	7
2	4,22	1 000–1 540	95	4,8	1,6	2,4
		380–1 000	65	4,8	1,6	2,4
		до 380	35	5,1	1,7	2,5
3	4,72	1 000–1 540	108	6,1	2,0	3,0
		380–1 000	75	6,3	2,1	3,1
		до 380	45	7,3	2,4	3,6
4	5,21	1 000–1 540	120	7,5	2,5	3,7
		380–1 000	85	7,8	2,6	3,9
		до 380	45	8,0	2,7	4,0
5	5,7	1 000–1 540	135	9,2	3,1	4,6
		380–1 000	95	9,6	3,2	4,8
		до 380	50	9,8	3,3	4,9
6	6,16	1 000–1 540	155	11,4	3,8	5,7
		380–1 000	100	10,9	3,6	5,4
		до 380	55	11,6	3,9	5,8
7	6,64	1 000–1 540	180	14,3	4,8	7,1
		380–1 000	123	14,4	4,8	7,2
		до 380	65	14,8	4,9	7,4
8	7,12	1 000–1 540	205	17,5	5,8	8,7
		380–1 000	120	15,1	5,0	7,6
		до 380	65	15,9	5,3	7,9

2.11. В период наращивания температурного режима следует подвергать визуальному контролю подъем арки свода. Значения подъема свода не должны превышать значений, представленных на графике 6. Приведенные усредненные значения Δh , полученные расчетным путем в соответствии с определенным температурным интервалом при соответствующем коэффициенте температурного расширения кладки свода.

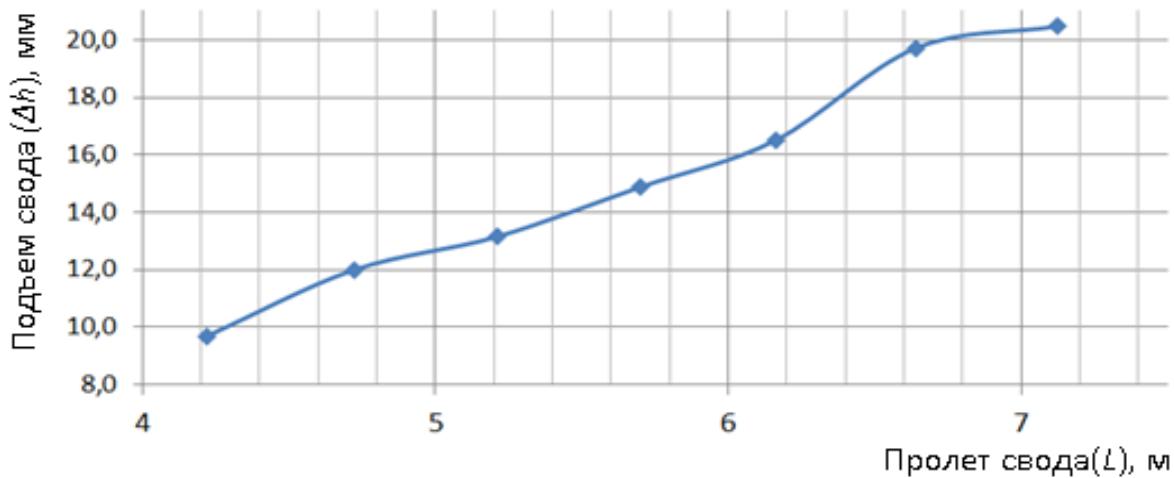


Рисунок 6 – Зависимости допустимых значений роста свода от пролета.

2.12. На завершающем этапе разогрева печи при определенной скорости подъема температуры в период выдержки при температуре, достигшей заданного технологического режима следует произвести затяжку регулируемых элементов металлического каркаса, только после чего можно приступать к выполнению работ по герметизации наружной поверхности свода и температурных швов.

Пример.

Для печи с пролетом свода 5,7 м требуется ослабление регулировочных болтов:

- в интервале температур до 380 $^{\circ}\text{C}$ каждые 50 $^{\circ}\text{C}$;
- в интервале температур от 380 до 1 000 $^{\circ}\text{C}$ каждые 95 $^{\circ}\text{C}$;
- в интервале температур от 1 000 до 1 540 $^{\circ}\text{C}$ каждые 135 $^{\circ}\text{C}$.

Максимальный подъем свода не должен превышать 15 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 3910-75. Изделия огнеупорные динасовые для кладки стекловаренных печей = Refractory silica products for brickwork of glassmaking furnaces. Specifications : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 декабря 1975 г. № 4061-ст : взамен ГОСТ 3910-41 : дата введения 1977-07-01 / разработчики А. П. Бакалкин, И. Ф. Усатиков, А. А. Елтышева. – Москва : Стандартинформ, 2004. – 66 с. – Текст : непосредственный.

2. Державні будівельні норми України ДБН В 1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : видання офіційне : затверджено та введено в дію наказом Мінрегіонбуд України від 30 грудня 2008 р. № 709-ст : введено вперше : чинні від 2009-12-01 / розробники В. Гордеєв, А. Перельмутер, В. Шимановський [и др.]. – Київ : Мінрегіон України, 2009. – 45 с. – Текст непосредственный.

3. Дзюзер, В. Я. Первичный разогрев стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер. – Текст непосредственный // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 10. – С. 28–32.

4. Ижорин, М. Н. Сооружение промышленных печей. Т. II. Строительство печей: справочное издание / М. Н. Ижорин, Ю. П. Сторожков ; под редакцией М. Н. Ижорина. – Москва : Теплотехник, 2006. – 720 с. – Текст непосредственный.

5. Исламов, М. Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей / М. Ш. Исламов. – Ленинград : Химия, 1986. – 280 с. – Текст непосредственный.

6. Ихно, А. В. Определение экспериментальным путем действительного НДС колонны каркаса стекловаренной печи завода ООО «Стройстекло-трейдинг» в г. Константиновка / А. В. Ихно. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2012. – Випуск 2012-6(98) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 146–153.

7. Левицкий, И. А. Теплотехнические установки и агрегаты предприятий производства стекла, Расчет стекловаренных печей / И. А. Левицкий, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск : БГТУ, 2006. – 110 с. – Текст : непосредственный.

8. Поляков, С. В. Проектирование каменных и крупнопанельных конструкций / С. В. Поляков, Б. Н. Фалевич. – Москва : Издательство «Высшая школа», 1966. – 235 с. – Текст : непосредственный.

9. СТО НОСТРОЙ 2.31.12-2011. Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пуско-наладочных работ : издание официальное : утвержден и введен в действие Решением Совета Национального объединения строителей от 5 декабря 2011 г. № 24-ст : введен впервые / разработан Ассоциацией «РосТеплостройМонтаж». – Москва : ООО Изд-во БСТ, 2011. – 49 с. – Текст : непосредственный.

10. Строительные нормы и правила. СНиП III-24-75. Промышленные печи и кирпичные трубы : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства от 7 мая 1975 г. № 72-ст : взамен СНиП III-Г.12-62 : дата введения 1976-07-01 / разработан ВНИПИ Теплопроект Минмонтажспецстроя СССР. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 36 с. – Текст : непосредственный.

11. Тринкс, В. Промышленные печи : в 2 т. Т. 2 / В. Тринкс. – [перевод с английского В. П. Линчевского]. – Москва : Металлургия, 1961. – 389 с. – Текст : непосредственный.

12. Моделирование НДС металлических конструкций каркаса обвязки стекловаренной печи в переходных состояниях при вводе ее в эксплуатацию / А. М. Югов, А. В. Ихно, А. Н. Миронов [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 177–190. – URL: http://don-nasa.ru/publish_house/journals/mk/2017_4/03_yugov_ihno_mironov_titkov.pdf (дата публикации: 11.12.2017).



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**

**Государственное образовательное учреждение
вышшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 17.08.2021 № 12/1
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Ихно Анны Владимировны на тему «Регулирование напряженно-
деформированного состояния конструкций металлического каркаса обвязки
ванных стекловаренных печей», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные
конструкции, зданий и сооружения.

Комиссия в составе: первого проректора, д.э.н., профессора Севки В.Г., декана
строительного факультета, к.т.н., доцента Лозинского Э.А., начальника учебного отдела,
к.гос.упр., доцента Сухины А.А. свидетельствует, что при подготовке студентов по
направлению 08.04.01 «Строительство», образовательный уровень «Магистр», программа
подготовки «Теория и практика организационно-технологических и экономических
решений» в материалах дисциплины «Технология и организация реконструкции и
ремонтно-восстановительных работ» (TOPPBP), «Техническое обслуживание и ремонт
зданий и сооружений» (TOPZC) используются теоретические и практические результаты
по кандидатской диссертационной работе Ихно Анны Владимировны «Регулирование
напряженно-деформированного состояния конструкций металлического каркаса обвязки
ванных стекловаренных печей» в темах: «Технологическое обслуживание промышленных
печей», «Реконструкция печей промышленных предприятий».

Члены комиссии:

Первый проректор,
д.э.н., профессор


В.Г. Севка

Декан строительного факультета,
к.т.н., доцент


Э.А. Лозинский

Начальник учебного отдела,
к.гос.упр., доцент,


А.А. Сухина



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЮЖНЫЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС»
ФИЛИАЛ № 2 «ЕНАКИЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»
Адрес (место нахождения): Донецкая Народная Республика, 86429, г. Енакиево,
пр. Металлургов, д.9, тел. (06252) 9-23-01, E-mail: ctp.z.priemnaya@cnzsteel.com

48200-44 10.12.21г.

В диссертационный совет Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия строительства и
архитектуры»

О внедрении результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы соискателя Ихно А.В. на тему «Регулирование напряженно-деформированного состояния конструкций металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей» приняты для экспериментального опробования и применения в виде рекомендаций по эксплуатации сводов промышленных печей при первичном запуске. Предложена методика определения параметров регулирования сводов промышленных печей в процессе первичного запуска.

Справка выдана для представления в диссертационный совет Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» для защиты кандидатской диссертационной работы и получения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения».

С уважением,

Директор по инжинирингу

В.И. Артёмов



ООО "Союзтепломонтаж"

Россия г.Великие Луки 182113
набережная Лейтенанта Шмидта,
д. 9 к.61

ИНН 6025046872
КПП 602501001
ОГРН 1156027005034

моб.т.ел.+7918-268-22-32
тел.факс. +7(81153) 3-98-32
E-mail: kharchenko.mixail@yandex.ru

20.09.2021 № 32/8
на № _____ от _____

В специализированный совет по
защите диссертаций

О внедрении результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы соискателя Ихно А.В. на тему «Регулирование напряженно-деформированного состояния конструкций металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей» использованы при оценке напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций циклона «Энергоцентра».

Работа выполнялась в рамках договора № 06-09/21 от 6 сентября 2021 г. по теме «Ремонт строительных конструкций «Энергоцентра» ООО ДОК «Калевала» по адресу Россия, 185013, Респ. Карелия, г. Петрозаводск, ш. Шуйское (Северная Промзона Р-Н), 9, оф. 3. Рабочий проект».

Справка выдана для представления в специализированный диссертационный совет Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» для защиты кандидатской диссертационной работы и получения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»

С Уважением,

Генеральный директор ООО "Союзтепломонтаж" Харченко М.М.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ДЕБАЛЬЦЕВСКИЙ ЗАВОД МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»
84703, г.Дебальцево, ул.Октябрьская, 84
Идентификационный код 50009340, свидетельство о регистрации №07017 от
17.06.2015 т/с 40702810920070000283 в ЦРБ ДНР, БИК 310101001

Из. № № 1009
на № _____ от _____

В диссертационный совет Д 01.006.02 при
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры

**О внедрении результатов
диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы соискателя Ихно А.В. на тему «Регулирование напряженно-деформированного состояния конструкций металлического каркаса обвязки термических печей» приняты и утверждены для внедрения в виде «Рекомендаций по эксплуатации сводов промышленных печей при первичном запуске». Положения Рекомендаций предназначены для использования при запуске термического оборудования литейного цеха при контроле поведения свода термической печи с выкатным подом.

Справка выдана для представления в диссертационный совет Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» для защиты кандидатской диссертационной работы и получения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения».

С Уважением,
Директор

В.В. Радченко

