

*На правах рукописи*

**Ихно Анна Владимировна**

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

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Макеевка – 2021

Работа выполнена на кафедре технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

**Научный  
руководитель:**

**Югов Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, профессор ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», заведующий кафедрой технологии и организации строительства

**Официальные  
оппоненты:**

**Ведущая  
организация:**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г., в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(062) 343-7033, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
Д.01.006.02

Лахтарина Сергей Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** 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 печей 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, C. G. 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 ванн стекловаренных печей на основе численных и экспериментальных исследований действительного напряжённо-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 эксцентриситете 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 ( $\gamma_T$ ), 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 внецентренное 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 внецентренно-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, в том числе 8 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень специализированных журналов, утвержденных ВАК МОН ДНР, 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** изложена общая характеристика работы, представлено обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первом разделе** представлен анализ состояния вопроса. Совершенствованию теплотехнических параметров стекловаренных печей посвящены работы В. Я. Дзюзера, А. 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. G. Aneziris, W. Landenfeld, M. Rigaud, S. Zhang, A. P. Margishvili, V. P. Migal. Работа стекловаренных печей и их конструкция описана в работах В. И. Бельского, В. М. Будова, Ю. М. Волгиной, М. А. Глинкова, В. Л. Гусовского, А. А. Тихоновой, R. Moreau. 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, В. Тринкса. 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.

В завершение раздела на основании выполненного критического анализа сформулированы цели, задачи и методы исследования, применяемые в работе.



Разработана структурно-логическая схема исследований, особенностью которой является уточнение экспериментальным путем входных параметров технологического процесса на этапе численного моделирования.

**Во втором разделе** изложен выбор и обоснование возможности использования выбранных автором методов и методики для проведения численных и экспериментальных исследований для оценки НДС металлического каркаса стекловаренной печи с возможностью его регулирования. Рациональным методом для уточнения действительного напряженно-деформированного состояния элементов системы металлического каркаса обвязки стекловаренной печи с моделированием эксплуатационных режимов работы печи, является метод конечных элементов (МКЭ).

На основании теоретических и натурных исследований были произведены предварительные численные исследования металлической обвязки каркаса ванной стекловаренной печи. Для исследования выбрана крупногабаритная печь непрерывного действия с размерами в плане 16,0×8,3 м, съём стекломассы 200 т/сутки. Моделирование и расчет каркаса печи реализовывались в программном комплексе SCAD Office. Принята пространственная расчетная схема. Сформированы загрузки, постоянное – собственный вес металлоконструкций и огнеупоров футеровки, а также переменное длительно действующее – давление стекломассы и температурная нагрузка. Температурная нагрузка прикладывалась как градиент температур  $\Delta t$  на всю толщину свода, и как распор свода от удлинения (термического расширения):  $\Delta l = \alpha_{cp} \cdot t \cdot l_{свода}$ , где  $\alpha_{cp}$  – средний коэффициент термического расширения материала при нагреве в интервале температур от 0 до  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $1/^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – принятая температура нагрева,  $^{\circ}\text{C}$ . При этом на каждую сторону свода приходилось  $\Delta l_l \approx 39$  мм. Расчет первоначальной пространственной модели каркаса печи показал увеличение возникающих усилий в элементах от температурных нагрузок в сочетании с постоянными приблизительно в 5 раз. На результаты расчета повлияли допущения, принятые в модели, такие как неучет: релаксации огнеупорной кладки; технологических особенностей при эксплуатации в виде снятия напряжений при помощи тяжей; компенсирующих кладочных швов. Для создания адекватной модели требуется реализация полной конструкции печи с учетом футеровочной части. Особенностью моделирования технологического процесса в расчетной модели является формирование расчетных сочетаний нагрузок (РСН) для каждой стадии температурного нагрева. Детальный анализ технологических особенностей эксплуатации, выявлении температурных площадок стационарного режима, позволил составить матрицу формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи представленную на рисунке 1.

Расчет теплопередачи слоев футеровки печи осуществлялся при помощи программы Heat Transmission (расчет тепловых потерь через плоскую многослойную стенку) 1.02, предназначенной для расчета тепловых потерь через заграждения печей и других агрегатов при проектировании печей для подбора наиболее рациональной конструкции огнеупорной кладки. Моделирование технологического процесса стекловаренной печи основано на пошаговом приложении нагрузки для каждой температурной ступени нагрева.

	ПО	Собственный вес	1		
	KP1	Т под сводом 120 С	2	+	
	KP1	Т под сводом 245 С	3	+	+
	KP1	Т под сводом 380 С	4	+	+
	KP1	Т под сводом 840 С	5	+	+
	KP1	Т под сводом 1200 С	6	+	+
	ДД1	Т под сводом 1560 С	7	+	+
	KP2	Уровень 1 1/3	8	+	+
	KP2	Уровень 1 2/3	9	+	+
	KP2	Уровень 1 3/3	10	+	+
	KP2	Уровень 2 3/3	11	+	+
	KP2	Уровень 3 3/3	12	+	+
	KP2	Уровень 4 3/3	13	+	+
	ДД2	Уровень 5 3/3	14	+	+
	KP3	Т под сводом 120 С	15	+	+
	KP3	Т под сводом 245 С	16	+	+
	KP3	Т под сводом 380 С	17	+	+
	KP3	Т под сводом 840 С	18	+	+
	KP3	Т под сводом 1200 С	19	+	+
	ДД3	Т под сводом 1560 С	20	+	+
	KP4	Т под сводом 120 С	21	+	+
	KP4	Т под сводом 245 С	22	+	+
	KP4	Т под сводом 380 С	23	+	+
	KP4	Т под сводом 840 С	24	+	+
	KP4	Т под сводом 1200 С	25	+	+
	ДД4	Т под сводом 1560 С	26	+	+
	KP5	Т под сводом 120 С	27	+	+
	KP5	Т под сводом 245 С	28	+	+
	KP5	Т под сводом 380 С	29	+	+
	KP5	Т под сводом 840 С	30	+	+
	KP5	Т под сводом 1200 С	31	+	+
	ДД5	Т под сводом 1560 С	32	+	+

+ - Наличие сочетания  
 - - Отсутствие сочетания  
 ⊥ - Возможное сочетание  
 - Натурно  
 - Расчетный метод  
 - Экспериментально  
 - Рабочая документация, нормативы

Рисунок 1 – Матрица формирования РСН на основе моделирования технологического процесса стекловаренной печи.

При проведении экспериментальных исследований на натуральных конструкциях стекловаренной печи рассмотрено использование оборудования:

- для регистрации относительных деформаций элементов: в качестве первичных преобразователей – проволоочные 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.

**В третьем разделе** представлены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса полученные с использованием конечно-элементного анализа.

В качестве модели выбрана натурная конструкция ванной стекловаренной печи с размерами в плане – 17,8×8,2 м, с высотой варочного отсека 1,5 м и отдельной подвеской 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. Для адекватности расчетной схемы реализована полная модель печи нижнего и верхнего строения с учетом футеровочной части. Реализация модели осуществлена в программном комплексе Лира САПР 2013. Для построения элементов печи использовался тип конечных элементов КЭ № 10, КЭ № 41, КЭ № 34, КЭ № 36. Для учета температурной нагрузки введено значение коэффициента температурного расширения ( $\alpha$ ) огнеупорного материала. Для введения в расчет точного коэффициента расширения материала, найден коэффициент для каждого градуса от 1 до 1 600 °С и усреднен. Температура по длине печи распределяется неравномерно, и на определенных участках происходит неравномерное расширение материала футеровочной части печи, при этом стрела свода не одинакова на всех участках. На каждый отдельный участок свода прикладываются различные температурные воздействия. Для учета нагрузки от расплава стекломассы прикладывается не только равномерно распределенная нагрузка, но и гидростатическая нагрузка, действующая на стены бассейна печи. Для объективности оценки влияния нагрузки от стекломассы и взаимной увязки с технологией ввода печи в рабочий режим, процесс заполнения печи стекломассой разбит на 7 этапов. Расчет на указанные нагрузки и воздействия выполнен в линейной постановке. Без учета регулирования тяжей напряжения в конструкциях превышают допустимые значения в 7 раз. На рисунке 2 представлена реализация натурной конструкции печи в расчетную схему, сформированную в ПК ЛИРА-САПР.

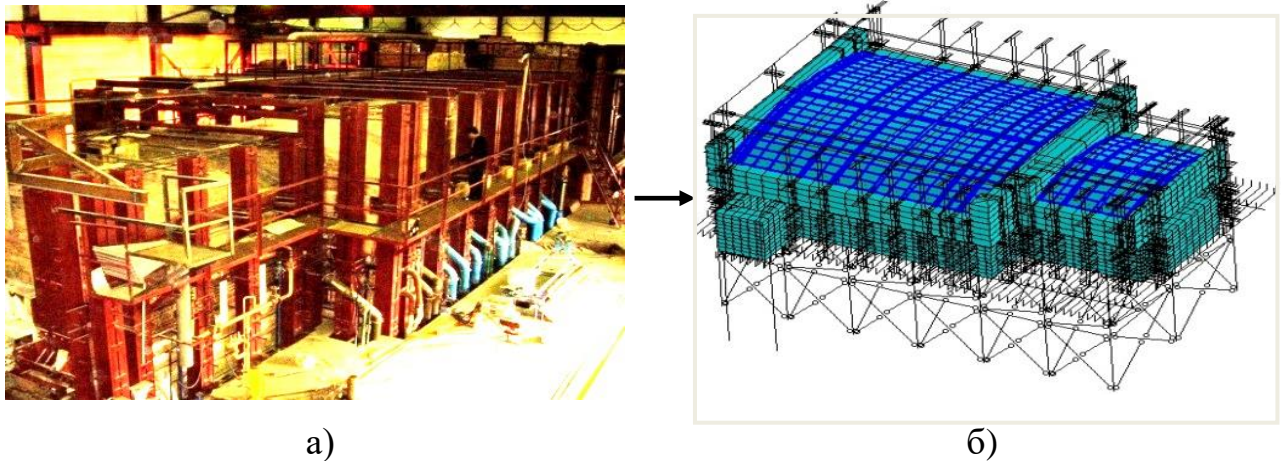


Рисунок 2 – Построение расчетной схемы стекловаренной печи: а) натурная конструкция ванной стекловаренной печи; б) расчётная схема СВП, сформированная в ПК ЛИРА-САПР

Особенностью расчёта является моделирование температурных режимов при вводе печи в эксплуатацию и регулирование НДС каркаса с использованием конструкции тяжей. Тяж выполнен из болта М30, стали 40Х «Селект», класса прочности 12.9, длиной 500 мм. Жесткость элемента при моделировании его в расчётной схеме задана численным описанием с типом конечного элемента 10 (универсальный стержень). 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).

По предложенной методике редуцирования напряжений в расчетной модели варьируются изменением жесткостной характеристики тяжа (Рисунок 3) по закону Гука:  $\Delta x/X = N/EA$ , где  $N$  – усилие в тяже, кН;  $\Delta x$  – геометрическое изменение длины тяжа, мм;  $X$  – длина тяжа, мм.

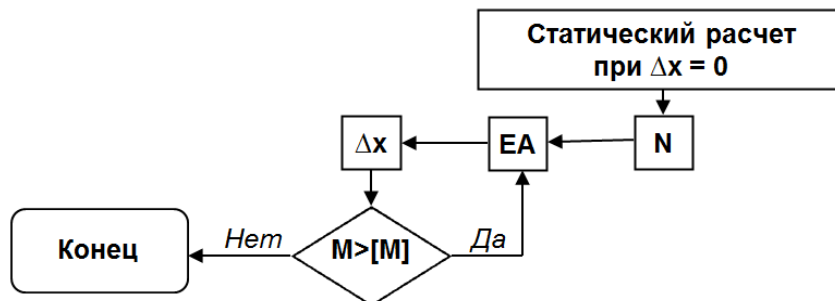


Рисунок 3 – Алгоритм учета регулировки тяжей в расчетной схеме

Алгоритм учета регулировки тяжей в расчетной схеме предполагает изменение длины тяжа на  $\Delta x$  до стабилизации напряжений в колонне.

На рисунке 4 представлены графики роста напряжений в колонне каркаса без



учета регулировки тяжей (Рисунок 4, а) и с включением механизма регулировки (Рисунок 4, б) (предел прочности 178 кН, запас 30 %).

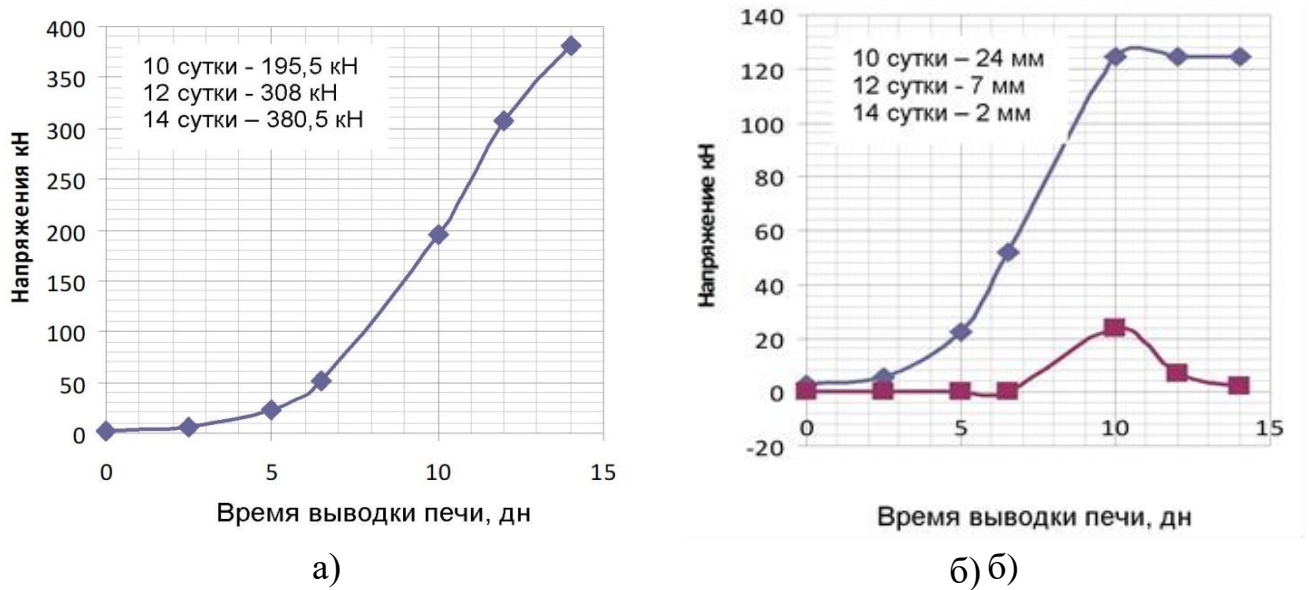


Рисунок 4 – Регулирование напряжений в колоннах рамы: а) без учета регулировки тяжей; б) с учетом регулирования тяжей

Влияние механизма регулировки на перемещения кладки свода представлены на рисунке 5, без учета регулировки тяжей (Рисунок 5, а) и с включением механизма регулировки (Рисунок 5, б).

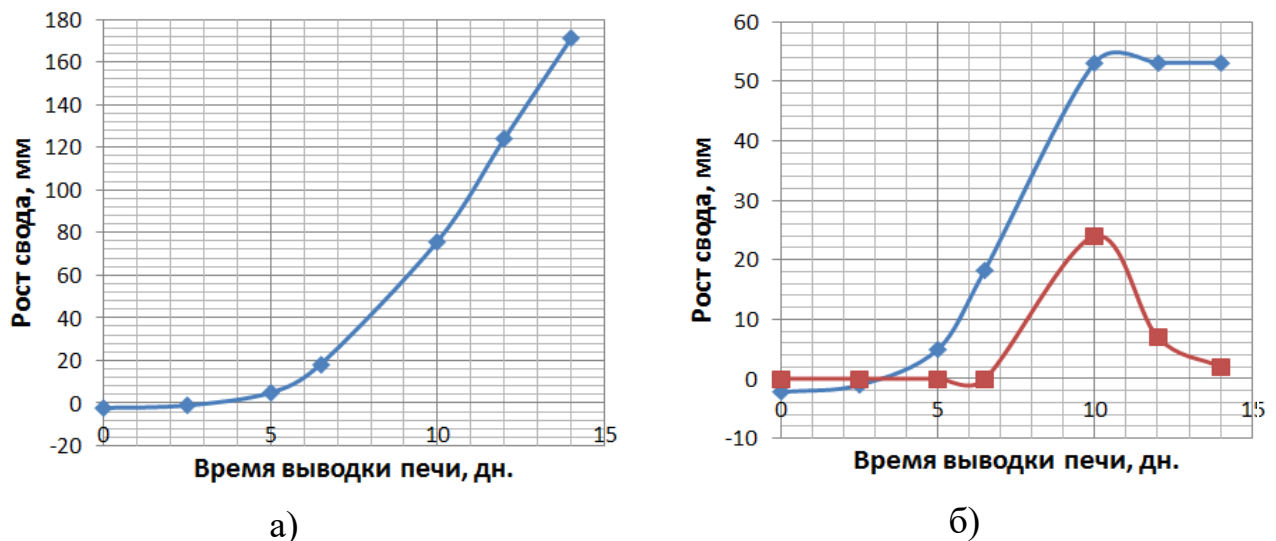


Рисунок 5 – Регулирование перемещений кладки свода: а) без учета регулировки тяжей; б) с учетом регулирования тяжей

В результате анализа полученных данных выяснено, что в колоннах каркаса возникает кручение и для более корректного анализа создана дополнительная расчетная схема плоской рамы из пластинчатых элементов (Рисунок 6). Кручение относительно плоскости  $UY$  вызвано неравномерным распределением давления от распора свода. Полученные результаты составили:  $N_x = 11.1 \text{ кН/см}^2 < R_y \cdot \gamma_c$ ;  $N_y = 8.15 \text{ кН/см}^2 < R_y \cdot \gamma_c$ ;  $T_{xy} = 0.754 \text{ кН/см}^2 < 0.58 R_y \cdot \gamma_c$ . Поворот относительно

$UY$  составил  $0,986^\circ$ , перемещения по оси  $X = 0,494$  мм  $< h/500$ , перемещения по оси  $Y = 6,28$  мм  $< h/500$ . Максимальный поворот сечения относительно  $UY$  составляет  $9,167^\circ$ . Для уменьшения поворота рассмотрены такие варианты как уравнивание давления от распора свода с помощью регулирования тяжей. В результате уравнивание давления от распора свода с помощью алгоритма регулирования тяжей, основанного на изменении его жесткостных характеристик, путем изменения  $EF$  в численном описании элемента, получено уменьшение поворота на 2,9 % и понижение эквивалентных напряжений на 10 %.

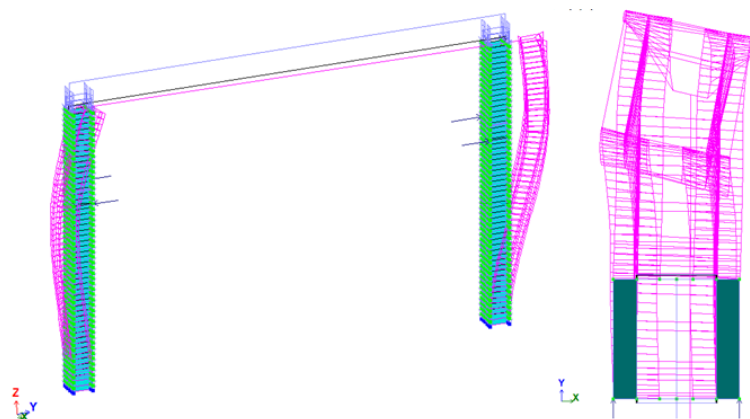


Рисунок 6 – Перемещения элементов каркаса рамы 7 пространственной модели без учета регулирования

В четвертом разделе представлены методика и результаты экспериментальных исследований влияния технологического процесса эксплуатации на напряженно-деформированное состояние конструкций металлического каркаса стекловаренной печи.

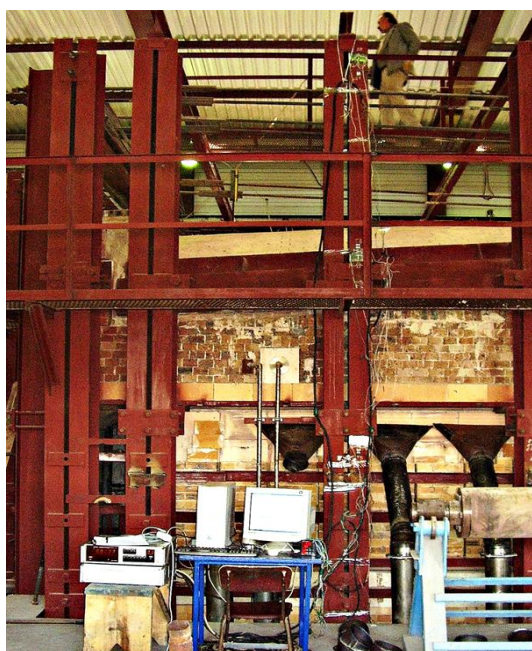


Рисунок 7 – Общий вид печи в процессе проведения исследований

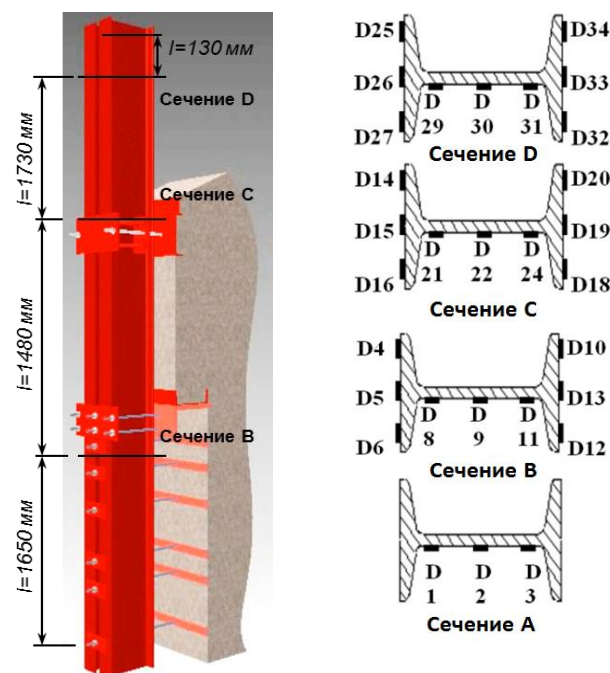


Рисунок 8 – Схема установки тензодатчиков

Экспериментальные исследования носили натурный характер (Рисунок 7). Исследования проводились в 4-х сечениях по высоте колонны (Рисунок 8). При обработке результатов экспериментальных исследований выявлены изгибающие моменты ( $M_z$ ) из плоскости рамы (Рисунок 9).

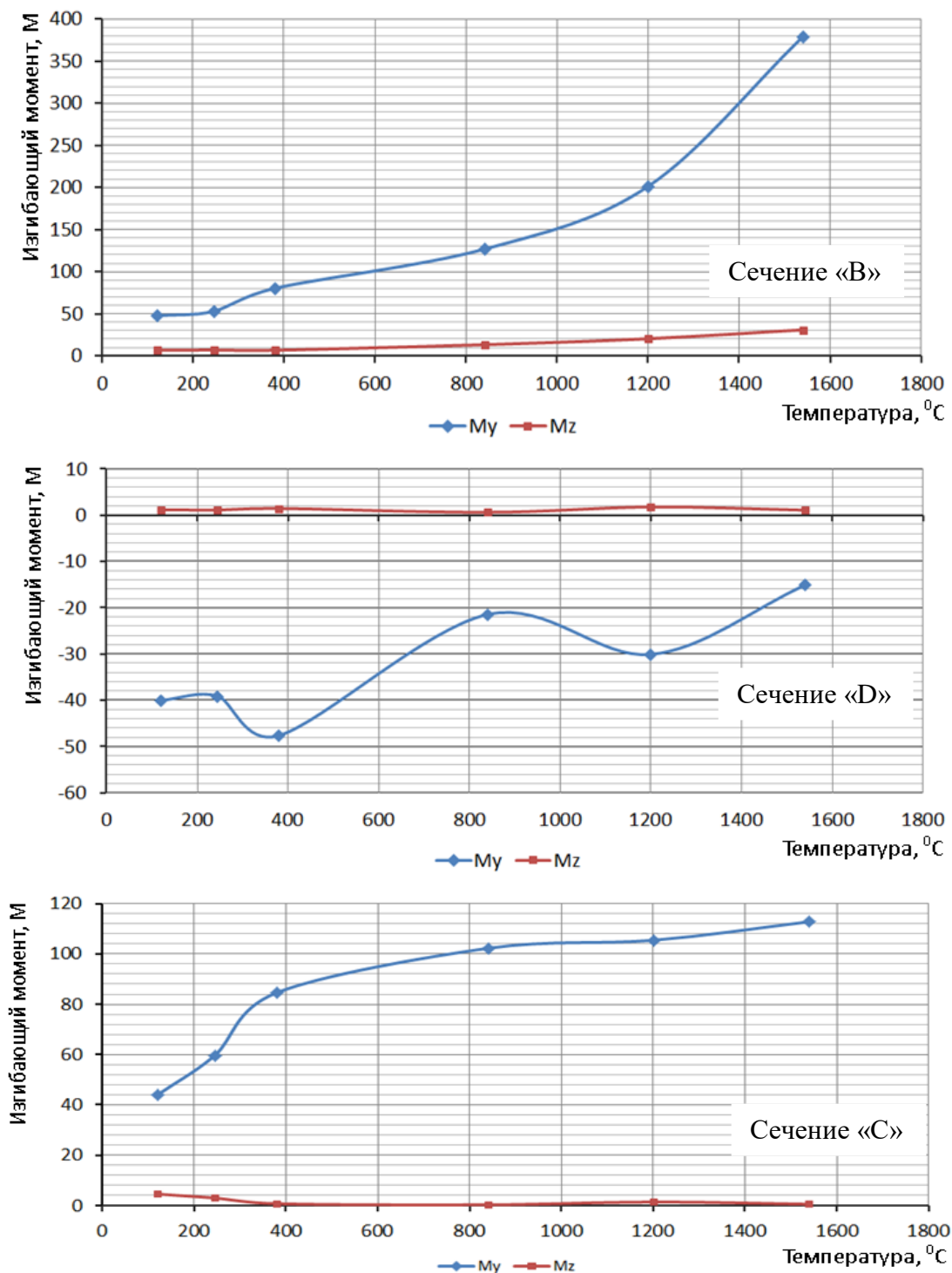


Рисунок 9 – Значения изгибающих моментов в сечениях

Сравнение экспериментальных данных показателей изгибающего момента в сечении «С» (от 5,72 до 112,82 кНм) и данных, полученных численным путем (от 5,8 до 112,75 кНм), проводившиеся на всем диапазоне температур, подтверждает

корректность созданной расчетной схемы. Сходимость результатов подтверждена на всех позициях,  $\Delta$  не превышает 1,5 %.

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

**В пятом разделе** представлены результаты поиска рациональных параметров для управления напряженно-деформированным состоянием каркаса обвязки печи. Задача сводится к поиску температурных интервалов возникновения предельных состояний в своде печи.

Расчет внутренних усилий выполняется методом конечных элементов. Расчет выполняется по двум загрузкам. Загрузка I – собственный вес, II – температура. При этом шаг температурной нагрузки  $n$  принят 5 °С. Рассматривались отдельные модели, для каждого расчетного значения ( $\alpha$ ) и для каждого пролета ( $L$ ). Полученные результаты внутренних усилий проверялись по условию прочности на внецентренное нагружение и определялась температура, при которой в своде возникало предельное состояние. Ограничением является эксцентриситет ( $e < 0.9y = 0,9 \cdot 150 = 135$  мм), а продольная сила не более чем правая часть условия прочности:  $N \leq m_g \cdot \varphi_I \cdot R \cdot A \cdot (1 - 2 \cdot e/h) \cdot \omega$ .

На рисунке 10 представлен график зависимости температуры роспуска опоры свода в зависимости от пролета свода. Основным критерием для построения данного графика является достижение предельного состояния в кладке.

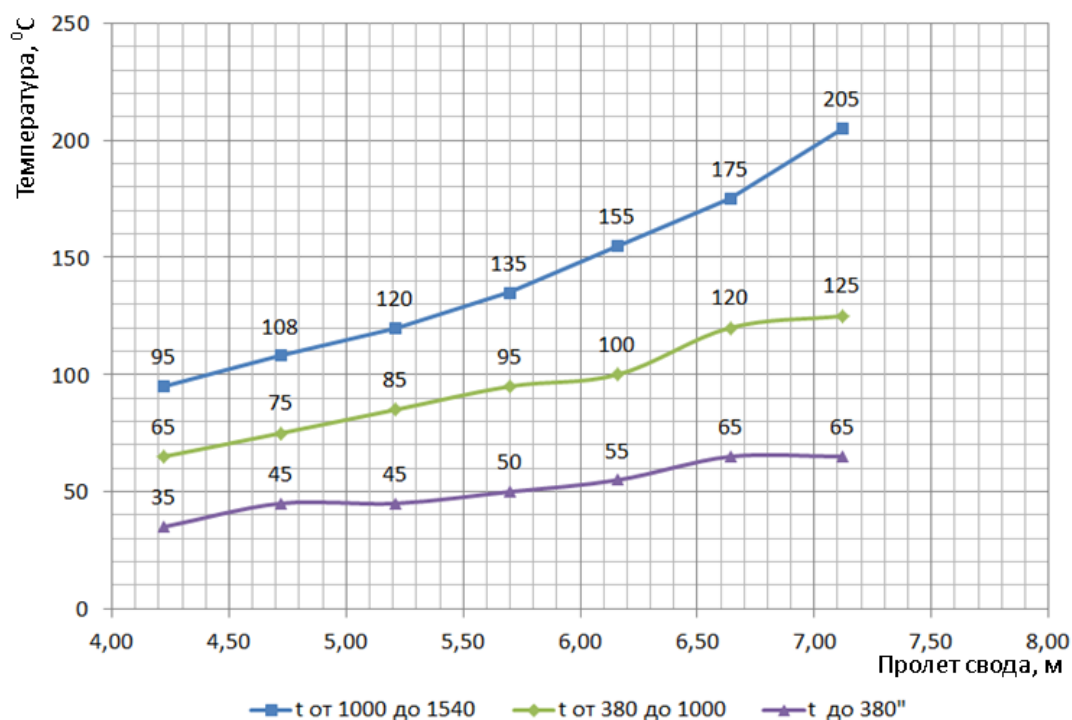


Рисунок 10 – Зависимость температуры роспуска тяжёлых от пролета свода



Интервалы температур определены путем дискретизации диаграммы изменения коэффициента линейного расширения динасовых изделий при повышении температуры. Коэффициенты температурного расширения для трех характерных интервалов температурного режима составляют:  $3,2 \times 10^{-5}$ ,  $1,7 \times 10^{-5}$ ,  $1,15 \times 10^{-5}$ . Дискретные участки приняты по принципу равенства приращения на предыдущем и последующем участках. По результатам расчета определены температуры возникновения предельного состояния в кладке свода, при которых требуется регулирование. Алгоритм определения оптимальных температурных интервалов приведен в виде блок-схемы на рисунке 11.



Рисунок 11 – Алгоритм определения оптимальных температурных интервалов

Представлено управление напряженно-деформированным состоянием свода печи (Рисунок 12). График на рисунке 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.

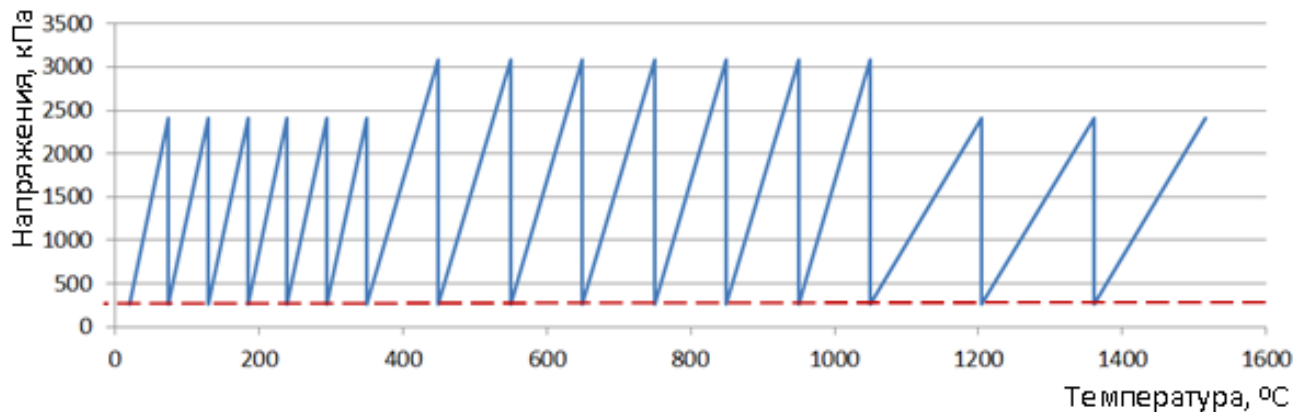


Рисунок 12 – График оценки уровня напряжения в кладке свода пролетом  $L = 7,12$  м при соотношении  $L/f = 7,4$

Найдены максимально-допустимые значения подъема свода  $\Delta h$  при введении печи в эксплуатацию. На графике 13 приведены усредненные значения  $\Delta h$ , полученные расчетным путем в соответствии с определенным температурным интервалом при соответствующем коэффициенте температурного расширения кладки свода.

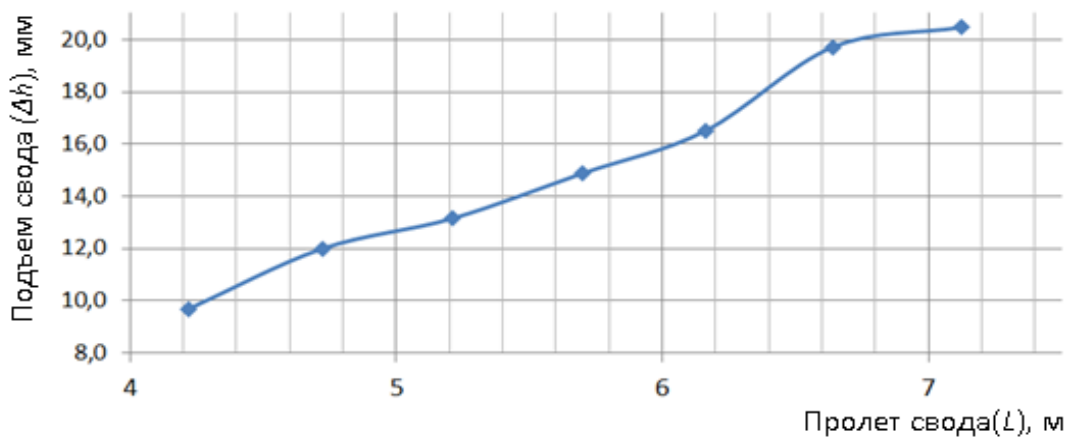


Рисунок 13 – Зависимости допустимых значений роста свода от пролета

Для практического применения данной методики для регулирования опор пят свода в период наращивания температурного режима, найдены количественные значения параметров отпуска тяжей. Получены значения количества витков  $n_s$ , необходимого для стабилизации напряжений в своде с учетом его пролета  $L$  в зависимости от температурных интервалов.

При расчете каркаса обвязки стекловаренной печи учитывается напряженно-деформированное состояние кладки свода на определенной площадке температурного нагрева. Первая группа нагрузок – единичная нагрузка от распора кирпичного свода (Рисунок 14), который в опорной части направлен

под углом 29 градусов к горизонтали. Вторая группа нагрузок – вес огнеупорной кладки (Рисунок 15).

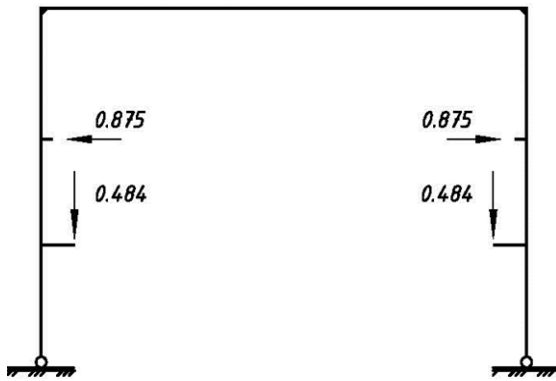


Рисунок 14 – Схема единичной нагрузки

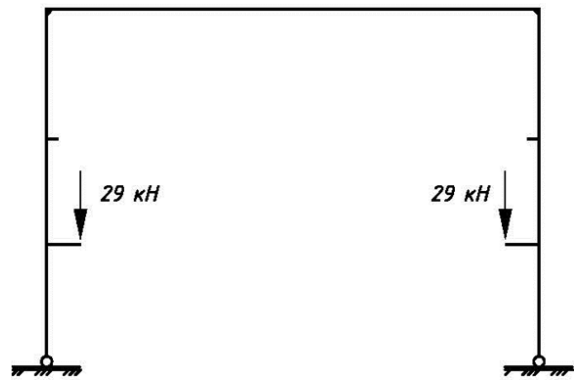


Рисунок 15 – Схема нагрузки от собственного веса кладки

Методом конечных элементов получены эпюры продольных сил (Рисунок 16,18) и изгибающих моментов (Рисунок 17,19) в элементах плоской поперечной рамы каркаса обвязки стекловаренной печи.

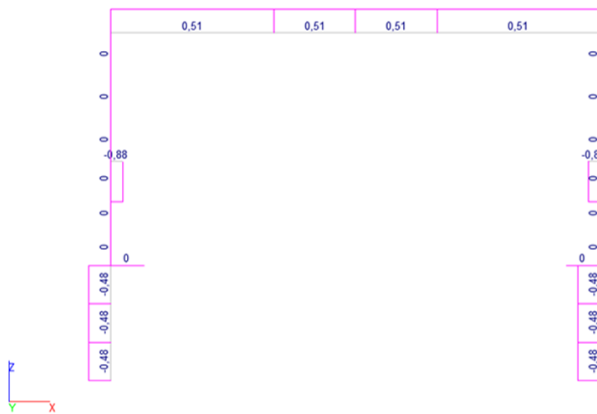


Рисунок 16 – Эпюра продольных усилий от единичной нагрузки, кН

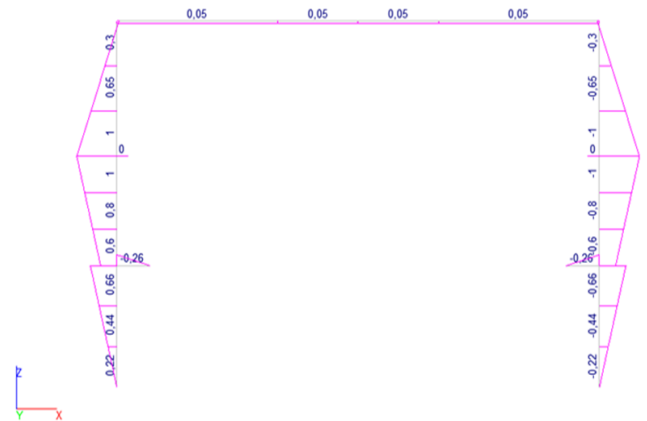


Рисунок 17 – Эпюра изгибающих моментов от единичной нагрузки, кНм

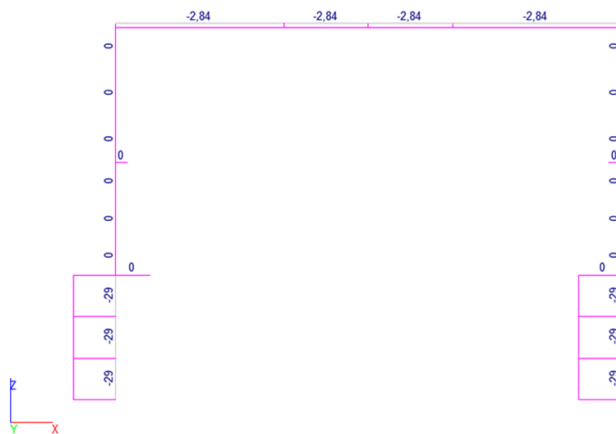


Рисунок 18 – Эпюра продольных усилий от веса кладки, кН

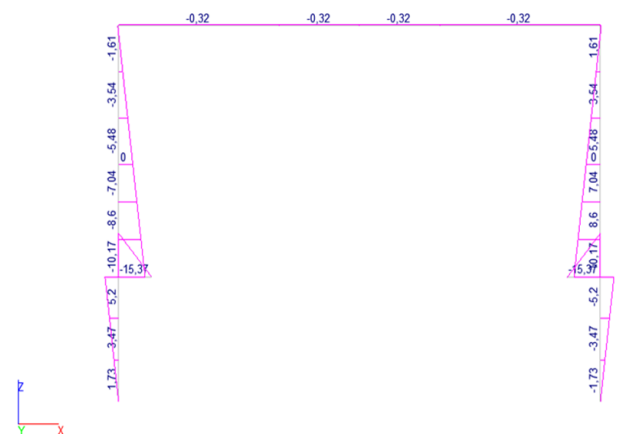


Рисунок 19 – Эпюра изгибающего момента от веса кладки, кНм

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

Распор в своде ( $R$ ) без учета действия температур составляет 44,2 кН. При действии температуры, с учетом роспуска тяжей распор составит: до 380 °С 53,48 кН; от 380 до 1 000 °С 53,98 кН; от 1 000 до 1 540 °С 53,55 кН.

Расчетное сопротивление для определения нормального напряжения:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} + \frac{M_x}{W_x} \times \gamma_T$$

$\gamma_T = 1,23$  – 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.

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).

Анализ напряженно-деформированного состояния свода из огнеупорного материала и конструкций металлического каркаса обвязки печи по предложенной методике расчета позволил установить повышенную металлоемкость конструкций колонн. При этом, с учетом фактических сечений экспериментального объекта установлено, что принятые сечения испытывают напряжения не превышающие 30 % от предельных (Рисунок 20).

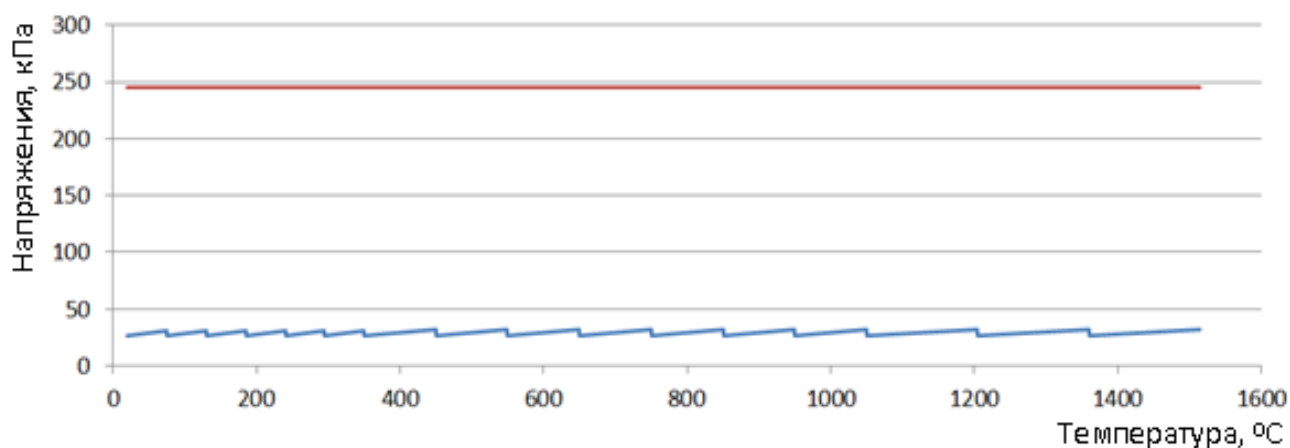


Рисунок 20 – График оценки уровня напряжения в характерном сечении элементов обвязки

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате численных и экспериментальных исследований достигнута основная цель работы – разработаны подходы к расчету металлических каркасов обвязки ванн стекловаренных печей с учетом параметров жизненного цикла и уточненных 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 ванн 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 °С и эксплуатационной температуре 1 540 °С, 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 деформация сечения колонн обвязки печи. Максимальный поворот относительно плоскости  $UY$  превышает 9°. В результате уравнивания 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  $\Delta x$  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 внутрипечной среды, установлена температура поверхности металлоконструкций, исследована динамика роста свода из огнеупорного материала, установлено неравномерное расширение секций свода и максимальный подъем, который составил:  $\Delta h_{экс.} = 67$  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 °С.

4. Разработан алгоритм определения оптимальных температурных интервалов технологического процесса эксплуатации печи, при которой возникает предельное состояние кладки свода печи, характеризующееся превышением эксцентриситета  $e = 135$  мм, и условиям прочности на внецентренное нагружение для каждого температурного интервала с соответствующим коэффициентом температурного расширения с шагом температурной нагрузки  $n = 5$  °С. Найдены зависимости температуры роспуска 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 роспуска тяжей для установленных температурных интервалов, выбранных по результатам дискретизации диаграммы изменения коэффициента линейного расширения динасовых изделий, распор составит: до 380 °С 53,48 кН; от 380 до 1 000 °С 53,97 кН; от 1 000 до 1 540 °С 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 ваннных 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 «кампаний» 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  $n_6$ , 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 ( $\Delta h$ ), 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 металлургического 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».

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Анализ конструктивных решений ванн стекловаренных печей / А. М. Югов, Д. А. Тахтай, А. В. Ихно [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2008. – Випуск 3(71) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 125–130.
2. 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 3(71) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 149–154.
4. 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 6(98) Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – С. 146–153.
5. Ihno, Anna. Results of field researches of a compact furnace for rolling sheet glass / Anna Ihno. – Текст : непосредственный // Металеві конструкції. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 151–158.
6. 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, С. О. Титков. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 177–190. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2017\\_4/03\\_yugov\\_ihno\\_mironov\\_titkov.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017_4/03_yugov_ihno_mironov_titkov.pdf) (дата публикации: 11.12.2017).
8. Ихно, А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций агрегата стекловаренного производства / А. В. Ихно, С. О. Титков. – Текст : непосредственный // Строитель Донбасса ; ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – 2018. – № 3(4). – С. 18–23.
9. О методике расчета металлических конструкций каркаса обвязки ванн стекловаренных печей / А. М. Югов, А. В. Ихно, А. В. Крупенченко, С. О. Титков. – 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](http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2021_3/03_yugov_ihno_krupenchenko_titkov.pdf) (дата публикации: 11.10.2021).



## АННОТАЦИЯ

Ихно Анна Владимировна. **Регулирование напряженно-деформированного состояния конструкций металлического каркаса обвязки ванных стекловаренных печей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2021 г.

Диссертация посвящена разработке подходов к расчету металлических каркасов обвязки ванных стекловаренных печей с учетом параметров жизненного цикла и уточненных экспериментальными и теоретическими исследования напряженно-деформированного состояния, с возможностью управления его параметрами.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи, представлены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна, практическая ценность результатов работы и ее связь с государственными программами.

**В первом разделе** анализируется состояния вопроса. Проведен критический анализ существующих методик расчета каркасов стекловаренных печей. Проанализированы подходы к учету технологического режима при определении силы распора свода печи.

**Во втором разделе** приведено обоснование возможности использования выбранных автором методов и методик для проведения численных и экспериментальных исследований для оценки НДС с возможностью его регулирования.

**В третьем разделе** представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса полученные с использованием конечно-элементного анализа. Особенностью расчёта является моделирование температурных режимов при вводе печи в эксплуатацию и регулирование НДС каркаса с использованием конструкции «тяжей-компенсаторов» по разработанному алгоритму.

**В четвертом разделе** представлены экспериментальные исследования влияния технологического процесса эксплуатации на напряженно-деформированное состояние конструкций каркаса стекловаренной печи. Представлены результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных значений моментов.

**В пятом разделе** представлены результаты поиска методик к расчету металлических каркасов стекловаренных печей с учетом управления напряженно-деформированным состоянием системы. Предложены алгоритмы расчета

конструкций металлического каркаса обвязки стекловаренной печи с учетом напряженно-деформированного состояния свода.

**Ключевые слова:** металлический каркас обвязки, стекловаренная печь, футеровка, распор свода печи, температурные воздействия, пространственная модель, температурные деформации, напряженно-деформированное состояние.

### ABSTRACT

**Ihno Anna. Regulation of the stress-strain state of the metal frame of the piping of glass furnaces.** – Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2021.

The thesis is devoted to the development of approaches to the calculation of metal frameworks for piping glass furnaces taking into account the parameters of the life cycle and refined by experimental and theoretical studies of the stress-strain state, with the ability to control its parameters.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates goals and objectives, presents the object and subject of research, formulates the scientific novelty, the practical value of the work results and its relationship with state programs.

The second section provides a rationale for the possibility of using the methods and techniques selected by the author for carrying out numerical and experimental studies to assess the VAT with the possibility of its regulation.

In the third section, the results of the study of the stress-strain state of frame structures obtained using finite element analysis are presented. A feature of the calculation is the simulation of temperature regimes during the commissioning of the furnace and regulation of the stress-strain state of the frame using the construction of «expansion joints» according to the developed algorithm.

In the fourth section, experimental studies of the influence of the technological process of operation on the stress-strain state of the frame structures of a glass-making furnace are presented. The results of a comparative analysis of the experimental and calculated values of the moments are presented.

In the fifth section, the results of the search for methods for calculating the metal frames of glass-melting furnaces are presented, taking into account the control of the stress-strain state of the system. Algorithms are proposed for calculating the structures of the metal frame of the piping of a glass-making furnace, taking into account the stress-strain state of the vault.

**Key words:** metal frame of piping, glass furnace, lining, furnace roof spacer, temperature effects, spatial model, temperature deformations, stress-strain state.