

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Надежда Димитрова Цветкова

**РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СПЕЦИАЛНИ
ЕЛЕКТРОСЪПРОТИВИТЕЛНИ ПЕЩИ ЗА
ОБРАБОТКА НА СЪКЛО**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на
образователно-научна степен „Доктор”**

**по докторска програма
„Електротехнологии и нанотехнологии“
към професионално направление
5.2. „Електротехника, електроника и автоматика“**

Научни ръководители:

доц. д-р инж. Христофор П. Тахрилов

проф. д-р инж. Илона Ил. Николова-Ячева

Рецензенти:

1.....

2.....

Варна, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден на в катедра „ЕТЕТ”
и насочен за защита пред научно жури.

Докторантката работи в катедра „Електротехника и
електротехнологии”.

Автор: маг. инж. Надежда Димитрова Цветкова

Заглавие: Разработване и изследване на специални
електросъпротивителни пещи за обработка на стъкло

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Надежда Димитрова Цветкова

**РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СПЕЦИАЛНИ
ЕЛЕКТРОСЪПРОТИВИТЕЛНИ ПЕЩИ ЗА
ОБРАБОТКА НА СТЬКЛО**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на
образователно-научна степен „Доктор”**

**по докторска програма
„Електротехнологии и нанотехнологии“**

**към професионално направление
„Електротехника, електроника и автоматика“**

Научни ръководители:

Доц. д-р инж. Христофор П. Тахрилов

Проф. д-р инж. Илона Ил. Николова-Ячева

Варна, 2021 г.

Дисертационният труд съдържа 165 страници, от които 36 страници приложения, включително 72 фигури и 33 таблици. Материалът е оформен в 5 глави, завършващи с обобщения и изводи. Списъкът на използваната литература включва 103 заглавия, от които 31 на кирилица и 72 на латиница.

В автореферата са приети означения на фигурите, таблиците и формулите, съответстващи на тези от дисертацията.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наГ.
отЧ.

в Конферентната зала на ТУ - Варна на открито заседание на научно жури,
сформирано със заповед на Ректора №/.....Г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата)
са на разположение на интересующите се във ФД „Докторанти”, стая 318
НУК.

СЪДЪРЖАНИЕ

Обща характеристика на дисертационния труд	3
Актуалност на проблема	3
Проблем	4
Цел и задачи на дисертационния труд	4
Обект на изследването	4
Предмет на изследването	4
Методи на изследване	4
Място на изследване	4
Научна новост на изследването	4
Практическа ценност на изследването	5
Апробация на изследването	5
Съдържание на дисертационния труд	6
Първа глава. Литературен обзор	6
Втора глава. Експериментални изследвания на опитни образци на малобагаритна електросъпротивителна пещ за топене на стъкло	6
Трета глава. Теоретично моделиране на топлинните процеси в малобагаритна електросъпротивителна пещ за топене на стъкло	19
Четвърта глава. Сравнителен анализ и оценка на теоретичните и експерименталните резултати	28
Пета глава. Методика за проектиране на малобагаритна електросъпротивителна пещ за топене на стъкло	31
Заключение	35
Приноси по дисертационния труд	36
Списък на публикациите по дисертационния труд	37
Короткое описание дисертации	38
Abstract of PhD Thesis	38

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В съвременните условия в случаите на дребно и единично (уникално) производство съществено значение придобива производството на малки количества висококачествено стъкло, за което са необходими малки пещи и мощности. Използването на индиректно нагряване с електрически ток в такива пещи дава възможност за управление на процесите на нагряване в пещното пространство независимо от смущаващите въздействия. Същевременно се премахва необходимостта от промишлена газова инсталация в района на работа на стъклотопилната пещ и контрол на качествения състав на стъкломасата.

Представяните в литературата топлотехнически изследвания са проведени чрез моделиране предимно на газови и електрически пещи с големи обеми и производителност, както и на малобагаритни електрически съоръжения, използващи директно и индукционно нагряване. Това определя необходимостта от задоволителен отговор на въпросите за топлопренасянето през и в стъкломасата, топлоотдаването от нея и работата на системата нагревател – тигел – стопилка – топлинна изолация в електрическите пещи с електросъпротивително нагряване.

Проблем

Температурното поле в електрическите пещи от шахтов тип е неравномерно и липсват препоръки за намаляване на вредното му въздействие.

Цел и задачи на дисертацията

Цел: Реализиране и изследване на малогабаритна електросъпротивителна пещ (ЕСП) за топене на стъкло с достатъчна степен на неравномерност на температурното поле.

Задачи:

1. Експериментални изследвания на опитни образци на малогабаритни стъклотопилни ЕСП;
2. Теоретичен анализ на ЕСП за топене и термообработка на стъкло чрез създаване на компютърни модели за симулация и анализ на установените режими и преходните топлинни процеси на базата на числени методи и програмни продукти;
3. Сравнителен анализ и оценка на теоретичните и експерименталните резултати;
4. Разработка на методика за проектиране на ЕСП за топене на малки количества висококачествени стъкла.

Обект на изследването

Специална електросъпротивителна пещ за обработка на стъкло.

Предмет на изследването

Разработване на компютърни модели за изследване на електросъпротивителна пещ за топене на стъкло.

Методи на изследване

За решаване на поставените задачи и постигане на целта са използвани:

- Експериментални изследвания на малогабаритни стъклотопилни електросъпротивителни пещи;
- Програмирани в програмна среда MATLAB итеративни методи за решаване на линейни системи алгебрични уравнения и обикновени системи диференциални уравнения;
- Числени методи за анализ: с топлинни заместващи схеми и метод на крайните елементи с приложение на специализиран софтуер SolidWORKS Simulation;
- Съпоставяне на теоретичните и експериментални изследвания за сравнителен анализ и оценка точността на моделирането.

Място на изследване

Изследванията в дисертацията са извършени в лаборатория „Електротермия“, катедра ЕТЕТ в Технически университет–Варна.

Научна новост на изследването

Разработен е образец на електросъпротивителна пещ за топене на стъкло с неравномерно разпределена плътност на мощността на нагревателния елемент с цел осигуряване на определена степен на неравномерност на температурното поле в работното пространство на пещта.

Реализираната електросъпротивителна пещ за топене и термообработка на стъкло е регистрирана като полезен модел в Патентното ведомство на Република България.

Това е удостоверено със свидетелство за регистрация на полезен модел № 2235/31.05.2016 г.

Практическа ценност на изследването

Предложена е комплексна методика за проектиране на електросъпротивителна пещ за топене стъкло, осигуряваща чрез моделиране на топлинните процеси изискваните условия на работа – подходящо разпределение на мощността на нагревателния елемент за получаване на температурно поле с допустима степен на неравномерност. Резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания на конкретните образци стъклотопилни пещи дават възможност за определяне на проблемите и факторите, които оказват влияние при експлоатация на съоръжението. Изработената стъклотопилна пещ може да бъде използвана за два технологични режима на получаване на стъкло – топене в тигел или в предварително изработена гипсова форма. При втория технологичен режим стъклото се темперира в същата пещ, при което необходимостта от отделна пещ за темпериране отпада.

Апробация на изследването

Разработките по всяка от задачите на дисертацията са докладвани и отпечатани в сборници с доклади на научни форуми. Направени са общо 7 публикации, както следва:

- шест (6) на рецензирани национални конференции с международно участие:
 - XIX-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2016, Bourgas, Bulgaria, реферирана в SCOPUS;
 - XVII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2012, Bourgas, Bulgaria;
 - XIV-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA'2015, Varna, Bulgaria;
 - Thirteenth International Conference of electrical machines, Drives and Power systems ELMA 2011, Varna, Bulgaria;
 - Third International Scientific Congress – 50 Anniversary Technical University of Varna, 2012, Varna, Bulgaria;
 - Международна научно-техническа конференция Електроенергетика 2010, Варна, България.
- една (1) в официален бюлетин на Патентното ведомство.

Патент:

Тахрилов Хр., Цветкова Н., Цветков Д., Апрахамян Б. Електрическа съпротивителна пещ за топене и термообработка на стъкло, свидетелство за регистрация на полезен модел, рег. № 2235/31.05.2016 г., публикуван в Официален бюлетин на Патентното ведомство, бр. 5, 2016, с. 46.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1 ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Проучена е научно-техническа, фирмена и учебна литература обхваща 103 заглавия в две направления: 1) стъкло и стъклотопилни пещи; 2) методи за числено анализиране на топлинни полета.

Стъклото е разгледано на база технологията за получаването му – изходни суровини, химически състав, физико-химични процеси, физични характеристики. Анализирани са съществуващи газови и електрически стъклотопилни пещи – класификация, обща конструкция, принцип на действие, образци на промишлени и малогабаритни пещи, сравнителен анализ по отношение на топлинните загуби.

Разгледани са методите за числен анализ на топлинни процеси: метод с топлинни заместващи схеми (за предварително теоретично изследване), метод на крайните разлики, метод на граничните елементи и метод на крайните елементи. Аргументиран е изборът на метода на крайните елементи за моделиране на температурното поле в изследваното устройство.

Литературният обзор показва следните особености:

- Съществува голямо разнообразие от газови и електрически пещи. Енергийните характеристики на газовите пещи ги определят като устройства за големи обеми и производителност;
- Показват се някои предимства на електрическите пещи в специални случаи на получаване и обработка на стъкло и стъклени изделия;
- Работещите електрически пещи са с голям обем и производителност, а не се предлагат съоръжения за дребно серийно, единично и уникално производство;
- Теоретичният анализ на процесите се провежда с математически апарат и съответно програмно осигуряване, които са използвани за реализиране на конкретни, предварително зададени топлинни и електромагнитни условия;
- Експерименталните изследвания и моделирането на процесите се отнасят до специфичен физически проблем: оптичните характеристики на стъклото. Основният проблем на електрическите пещи от шахтов тип – разпределение на температурното поле – не е анализиран и не се предлагат мерки за намаляване на неравномерното му разпределение.

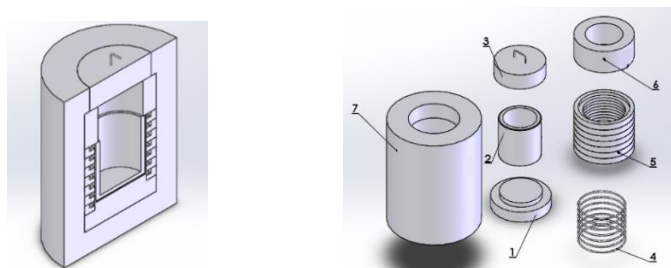
Анализът на литературата води до извод: липсва методология за изследване на различни режими и проектиране на малогабаритни стъклотопилни устройства на базата на прецизно числено и експериментално моделиране на стационарни режими и преходни процеси.

Глава 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ОПИТНИ ОБРАЗЦИ НА МАЛОГАБАРИТНА ЕЛЕКТРОСЪПРОТИВИТЕЛНА ПЕЩ ЗА ТОПЕНЕ НА СТЬКЛО

2.1. Въведение.

Създаването на малогабаритна ЕСП за топене и термообработка на малки количества висококачествени стъкла със зададени състав, количество и технологичен режим е свързано с моделиране на топлинните процеси в съответствие с възможностите за изменение на различни енергийни и геометрични параметри – големина и разпределение на мощността, размери на тигела и топлинната изолация. Доказателството за достоверност на теоретичните модели, които ще бъдат съставени изисква получаването на експериментални данни с цел съпоставка на резултатите от

изследванията. Това определя необходимостта от изработването на опитни образци. За целта са изработени три образца с базова конструкция, представена на фиг. 2.1.



фиг. 2.1 Базова конструкция на електрически стъклотопелна печ

1 – основа (изолация на дъното); 2 – тигел; 3 – капак с изолация; 4 – нагревателен елемент; 5 – носачи на нагревателния елемент; 6 – изолация на газовото пространство над работна зона; 7 – високотемпературна топлинна изолация на стената на печта.

За всеки от образците са проведени едно или две от следните експериментални изследвания:

- режим на празен ход;
- режим на натоварване 1 – топене на стъкло в тигел;
- режим на натоварване 2 – топене на стъкло в специална форма.

Експериментите съответстват на изискванията на фирмите-производители: максимална скорост на повишаване на температурата на тигела, при която се запазва целостта му; допустима скорост на нагриване на носачите на нагревателя; максимално допустима температура на нагревателя; температура на работното пространство, съгласувана с материалите (тигел или гипсова форма).

Изискванията на фирмите-производители на изолационните материали и тигела определят избора на управлението и комутационните апарати. Управлението се извършва от програмируем терморегулатор с широчинно-импулсна модулация и възможности за изменение цикъла на действие. Поради това е препоръчително използването на безконтактно реле от тип SSR, с вградена система за комутации в нулата на захранващото напрежение. Програмата на терморегулатора при всеки експеримент или нормална работа се задава в съответствие с материалите, поставени в работното пространство и характеристиките на топлинната изолация.

2.2. Опитен образец 1.

Определяне състава на шихтата за получаване на стъкло със зададени качества

Количеството изходна смес за получаване на определено количество и качество стъкло се определя по оксидния състав на стъклото. Състави на два вида стъкло са представени в табл.1.3 с концентрации оксиди, осигурени чрез теоретично зададен или опитно установен химически състав на основните (пясък, сода, поташ, варовик) и спомагателни суровини (натриев сулфат, натриева селитра).

табл. 1.3 Химически състави на два вида стъкла

Оксид, %	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	B ₂ O ₃	PbO	ZnO
Тип стъкло										
Натриево-калиево	75.11	14.55	2.23	7.76	0.12	0.21	0.02	–	–	–
Кристално	58.10	–	15.50	–	–	–	–	1.20	24.10	1.10

Зависимостите от взаимодействието между съставите на стъклото и суровините образуват система линейни алгебрични уравнения с особености, отразяващи големите

различия в концентрациите на материалите. По направените изчисления се съставя рецепта за дозиране на суровите материали за получаване на шихта за 100 kg стъкломаса. Резултати от пресмятането за натриево-калиево стъкло са представени в табл. 2.2.

табл. 2.1 Резултати от пресмятането на шихтата

Материал Метод	Пясък	Сода	Поташ	Варовик	Натриев сулфат	Натриева селитра	Кол-во шихта
Метод на двойно спрегнатите градиенти bicg	75.50	25.09	3.47	13.60	0.23	0.23	118.12
Квадратичен метод на спрегнатите градиенти cgs	75.49	25.04	3.27	13.86	0.35	0.24	118.25
Обобщен метод на минималните остатъци gmres	75.49	24.90	3.28	13.86	0.44	0.25	118.22
Метод на минималните остатъци minres	75.49	24.52	3.28	13.86	0.94	0.32	118.41
Метод на спрегнатите градиенти с предусловие pcg	75.48	25.08	3.24	13.86	0.31	0.24	118.21
Квазимиимален метод на остатъците qmr	75.50	25.08	3.46	13.61	0.23	0.23	118.11
Практическа реализация	75.54	24.64	3.28	14.04	0.90	0.80	119.10

В табл. 2.1 е направено сравнение на теоретично изчисления състав на основните суровини спрямо реализиран в практиката.

табл. 2.2 Сравнение на теоретично изчислените количества основни суровини с използваните в практически реализиран състав

Материал Метод	Пясък	Сода	Поташ	Варовик	Кол-во шихта
bicg, грешка %	0.05	1.83	5.79	3.13	0.82
cgs, грешка %	0.07	1.62	0.30	1.28	0.71
gmres, грешка %	0.07	1.06	0.00	1.28	0.74
minres, грешка %	0.07	0.49	0.00	1.28	0.58
pcg, грешка %	0.08	1.79	1.22	1.28	0.75
qmr, грешка %	0.05	1.79	5.49	3.06	0.83

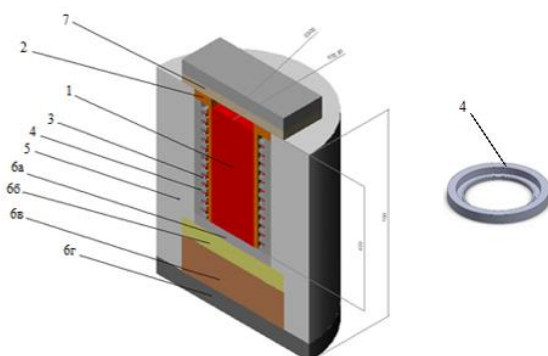
Сравнението с резултата от практическата реализация показва, че всички методи за пресмятане, които дават коректно решение съответстват на практиката и могат да се използват в програмите за пресмятане на състави на шихтата. Максималната грешка се получава със суровините-добавки (натриев сулфат и натриева селитра), които се определят предимно опитно.

Предварително конструктивно оформяне и топлинно оразмеряване на пещта

В съответствие с базовата конструкция от фиг. 2.1 е направено конструктивно оформяне на опитен образец 1 на пещта (фиг. 2.2), определено от поставената задача – реализация на пещ за малки количества стъкло (осигуряване получаването на максимално количество стъкломаса 20 kg).

В съответствие с размерите на тигела – височина: 420 mm, вътрешен диаметър: 165 mm и дебелина на стената: 15 mm, са определени размерите на работното

пространство: същата височина и диаметър, равен на вътрешния диаметър на тигела. Следва нагревателен слой с дебелина 3 mm и 24 mm керамична изолация (носачи на нагревателя). Прието е равномерно разпределение на мощността по околната повърхност на тигела, което съответства на равномерно навит нагревателен елемент. Разстоянието между тигела и нагревателя, определено от експлоатационни и технологични съображения е приблизително 15 mm. За изолация на дъното са използвани шамотни материали (във формата на плочи и тухли) с височина 220 mm и диаметър 500 mm и обемно уякчена влакнеста топлоизолационна плоча с дебелина 60 mm и диаметър 600 mm. Между цилиндричния метален корпус и дъното, стените и отвора на работното пространство на пещта е положена влакнеста високотемпературна изолация с приблизителна дебелина 150 mm.



фиг. 2.2 Конструкция на опитен образец 1 на стъклотопилна пещ

1 – стъкломаса; 2 – тигел; 3 – нагревател; 4 – изолационни елементи – носачи на нагревателя; 5 – изолация на стената; 6 – изолация на дъното (6а – дъно на тигела–обмазка, 6б – шамотна плоча, 6в – шамотни тухли, 6г – обемно уякчена влакнеста плоча); 7 – капак с топлоизолация

Топлинен баланс и инсталирана мощност

Топлинният баланс включва следните четири етапа:

- етап I – разгриване до 1300°C с $t = 52$ h, съобразена с изискването за максимална скорост на повишаване на температурата на тигела и керамичните носачи на нагревателя 25°C/h;

- етап II – задържане на температурата на 1300°C с цел хомогенизиране на стъкломасата ($t = 4$ h);

- етап III – понижаване на температурата от 1300°C до 1000°C

(работна температура, при която се формира стъкленото изделие) $t = 6$ h;

- етап IV – изработване на стъклено изделие при температура 1000°C ($t = 4$ h).

Съставеният топлинен баланс съдържа пресмятания за:

- полезно количество топлина и загуби от топлопроводност:

$$Q = \sum_{i=1}^k Q_{\text{пол.}i} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{заг.}i} \quad (2.3)$$

$$Q_{\text{пол.}i} = m_{\text{елем.}i} c_{\text{елем.}i} \Delta\tau_{\text{елем.}i} \quad (2.4)$$

$$Q_{\text{заг.}i} = m_{\text{елем.}i} c_{\text{елем.}i} \Delta\tau_{\text{елем.}i} \quad (2.5)$$

където: $Q_{\text{елем.}i}$, [J] – количество топлина: полезно – елемент 1 и на загубите – елементи 2, 4, 5, 6, 7 (фиг.2.2)); $m_{\text{елем.}i}$, [kg] – маса на i -тия елемент на пещта, определена от размерите и плътността на материала; $c_{\text{елем.}i}$, [J/(kg.°C)] – специфична топлина на материала на i -тия елемент на пещта; $\Delta\tau_{\text{елем.}i}$, [°C] – разлика между крайната и началната температури на i -тия елемент на пещта за съответния етап.

На тази основа се пресмятат полезната мощност $P_{\text{пол.}i}$, [W] и мощностите на топлинните загуби $P_{\text{заг.}i}$, [W]:

$$P_{\text{пол.}i} = \frac{Q_{\text{пол.}i}}{t_{\text{етап } i}} \quad (2.6)$$

$$P_{\text{заг.}i} = \frac{Q_{\text{заг.}i}}{t_{\text{етап } i}} \quad (2.7)$$

където: $t_{\text{етап } i}$, [s] – продължителност на съответния етап;

Инсталираната мощност се намира чрез израза:

$$P_{\text{инст.}} = k_p \left(\sum_{i=1}^k P_{\text{пол.}i} + \sum_{i=1}^n P_{\text{заг.}i} \right) \quad (2.8)$$

$k_p \approx 1.8 \div 2.5$ – коефициент на резерв – отчита остаряване на тигела и топлинната изолация, нарушения при уплътнение на изолацията и др.

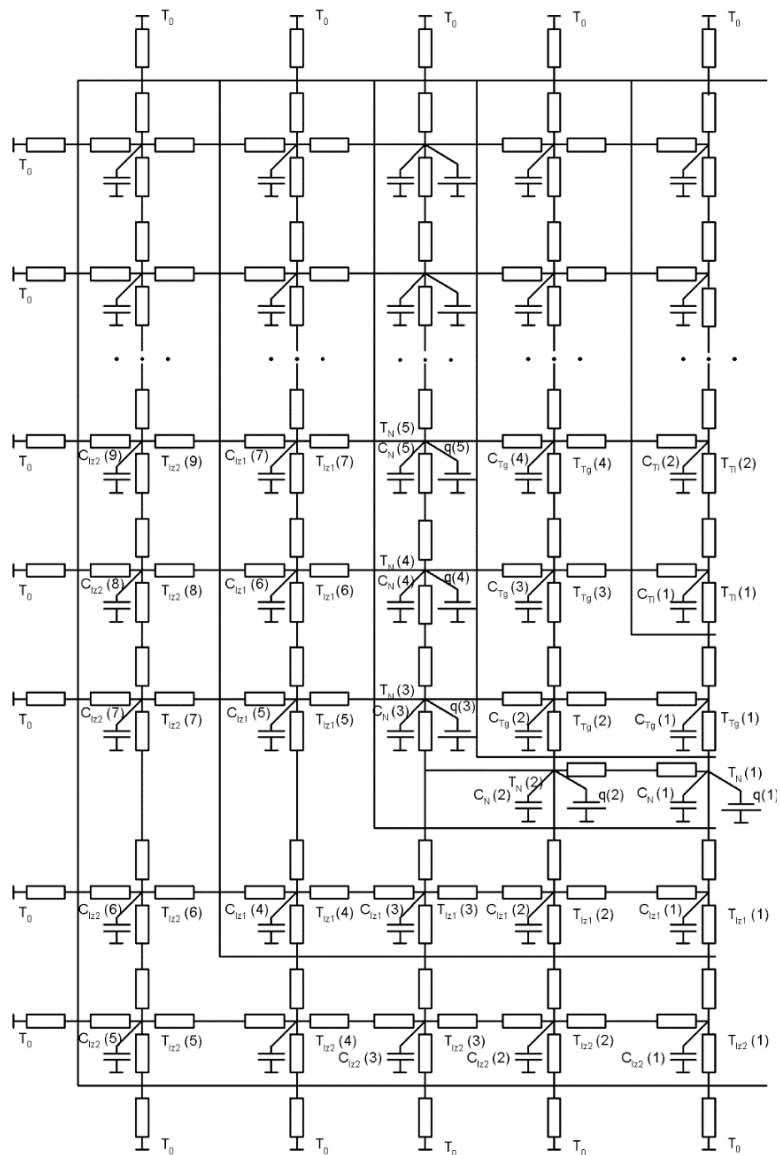
Масите са пресметнати на база плътностите на материалите и обемите на съставните части на пещта. Разпределението на температурите е получено чрез базово моделиране на преходния процес на нагряване и съответно достигането на установен режим посредством тримерна топлинна заместваща схема със съсредоточени параметри. Поради наличието на аксиална симетрия математичният модел на топлинните процеси е съставен за едната половина на устройството – фиг. 2.4. Един елемент от топлинната заместваща схема е представен на фиг. 2.5.

Топлинните съпротивления $R_{\lambda,i}$, [°C/W] в радиална и аксиална посока се изчисляват за всеки елемент в съответствие с характера и посоката на преносния топлинен поток съгласно зависимостите (2.9), (2.10) и (2.11).

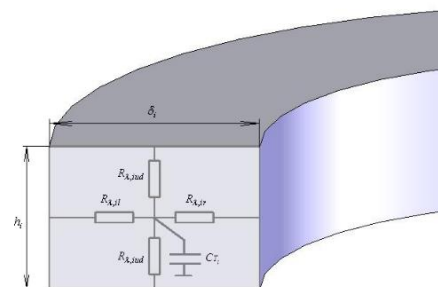
$$R_{\lambda,ir} = \frac{1}{2\pi h_i \lambda_i} \ln \frac{d_{i-1} + \delta_i}{d_{i-1}} \quad (2.1)$$

$$R_{\lambda,il} = \frac{1}{2\pi h_i \lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_i - \delta_i} \quad (2.2)$$

$$R_{\lambda,iud} = \frac{h_i/2}{\lambda_i S_i}, \quad S_i = \frac{\pi(d_i^2 - d_{i-1}^2)}{4} \quad (2.3)$$



фиг. 2.4 Топлинна заместваща схема на стъклотопилната пещ при преходен процес на нагряване



фиг. 2.5 Елемент от топлинната заместваща схема

Топлинният капацитет $C_{\tau,i} = c_{\text{елем},i} m_{\text{елем},i}$, [J/°C] – се определя като функция на текущата температура. Предвид участието на всеки елемент от заместващата схема в провеждането на топлинен поток в аксиално и радиално направление, числените стойности на величините от зависимостите се коригират с полученото препоръчително съотношение $R_{\lambda,i,\text{изч.}} = R_{\lambda,i}/2$.

- топлообмен в течната стъкломаса:
 - конвекция в течната стъкломаса:

Поради високия вискозитет конвекцията е ограничена и при пресмятанията на топлообмена се пренебрегва. Тя има влияние върху хомогенизацията на стопилката. Ограниченото разстояние между нагревателя и тигела (5 mm) затруднява конвективния топлообмен и се изчислява само лъчистия топлинен поток;

- топлинен поток на лъчение от стените на пещта през стъкломасата към капака и/или към околната среда през работния отвор:

$$q_{\text{л отв}} = c_S \varepsilon_{\text{ст}} \psi S_{\text{л отв}} (T_{\text{ст}}^4 - T_0^4) \quad (2.13)$$

където: $c_S = 5,6703 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$ – константа на Стефан-Болцман; $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степен на излъчване на стопилката; ψ – коефициент на свиване, отнасящ се за отвори; $S_{\text{л отв}}$, [m²] – повърхнина на излъчване; $T_{\text{ст}}$ – абсолютна температура на стопилката; T_0 – абсолютна температура на обкръжаващата среда.

В периода на получаване на стъкломасата тези загуби не е необходимо да се отчитат, освен в случаите, когато се изисква допълнително зареждане на материали.

- топлообмен с околната среда – конвекция и лъчение:
 - топлинни загуби от конвекция q_k , [W]:

$$q_k = \alpha_k S_k \Delta\tau_k \quad (2.15)$$

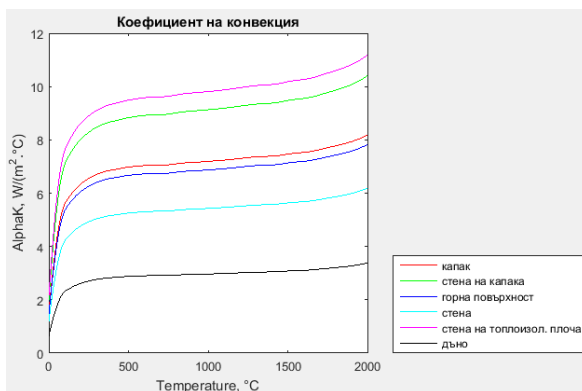
където: α_k , [W/(m²·°C)] – коефициент на топлопренасяне чрез конвекция на съответната топлоотдаваща повърхност; S_k , [m²] – повърхнина на топлоотдаващата повърхност; $\Delta\tau_k$, [°C] – температурна разлика между околната среда и топлоотдаващата повърхност.

Коефициентите на топлопренасяне чрез конвекция са изчислени за всяка форма и положение на топлоотдаващата повърхност при естествена конвекция. За целта са изчислени и температурните им зависимости, представени на фиг. 2.6.

- топлинни загуби от излъчване от външната стена на пещта q_l , [W]:

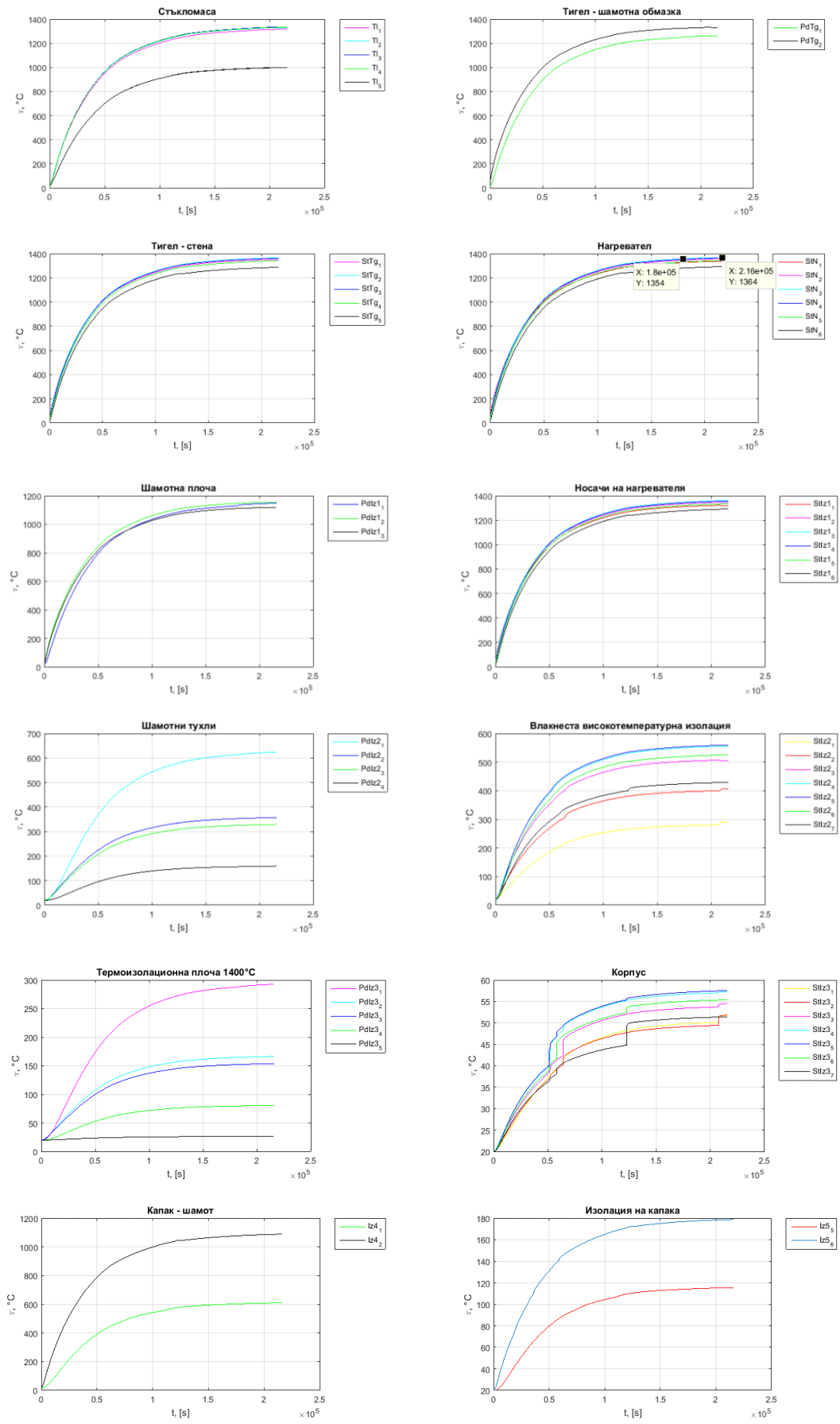
$$q_l = c_S \varepsilon_{\text{корп}} S_l (T_{\text{корп}}^4 - T_0^4) \quad (2.20)$$

където: $c_S = 5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²·K⁴)] – константа на Стефан-Болцман; $\varepsilon_{\text{корп}}$ – степен на излъчване на материала на корпуса; S_l , [m²] – повърхнина на топлоотдаващата повърхност; $T_{\text{корп}}$, [K] – температура на корпуса на пещта; T_0 , [K] – температура на околната среда.



фиг. 2.6 Коефициент на конвекция на външните повърхности на пещта

Решението на системата ОДУ, описваща топлинната заместваща схема при преходен процес на нагряване на пещта е извършено в програмна среда MATLAB. На фиг. 2.7 са представени графичните резултати от пресмятането на преходния процес за $P = 3000$ W на всички елементи.



фиг. 2.7 Преходен процес на нагряване в отделните елементи на пещта при P=3000W

Изискването за предварителен избор на времетраене на процеса T се изпълнява чрез задаване по препоръки $T = 4 \cdot T_q$ (T_q е времеконстантата на процеса), съответстващо на достигане на 98% от установената стойност на величината. Поради сложността на заместващата схема е необходимо уточняване на времетраенето, което за конкретното устройство се установява на 60 h (216000 s). Това отговаря приблизително на време $T = (6 \div 7) \cdot T_q$.

Пресмятанията за първия етап показват необходима мощност 3 kW. Компенсация на загубите от лъчение, повишени при постоянно отваряне на работния отвор на печта за изтегляне на стъкломаса (четвърти етап), се извършва чрез преизчисляване на отдаваната мощност. Поради чувствителността на характеристиките на стъкломасата при изменение на температурата е необходима бърза реакция, т.е. инсталираната мощност трябва да превишава изчислената за нормална работа. В резултат на допълнителното изчисление за Образец 1 се приема инсталирана мощност $P=7$ kW. На тази база са определени параметрите на нагревателя и топлинната изолация.

Оразмеряване на нагревателния елемент

Съгласно каталожни данни за нагревателни елементи Kanthal A1, положени в открити канали е извършено предварително пресмятане на нагревателния елемент, което е основно за изпълнение условието по мощност. Броят канали на полагане, респ. броят секции на нагревателния елемент (HE), се приема предварително въз основа конструктивните размери на избрания носещ елемент. Резултатите са представени в табл. 2.5.

табл. 2.5 Оразмеряване на нагревателния елемент

Среден диаметър на една секция	$D_{к\text{сп}}, [m]$	0,225
Брой секции на нагревателя	$N_k, [-]$	12
Специфично повърхностно натоварване на проводника Kanthal A1 при 1300°C	$w, [W/m^2]$	2,20E+04
Специфично електрическо съпротивление на проводника Kanthal A1 при 20°C	$r_{0\ 20}, [\Omega \cdot m]$	1,45E-06
Фактор за получаване на съпротивлението при работна температура 1300°C	$C_p, [-]$	1,04
Специфично електрическо съпротивление на проводника Kanthal A1 при 1300°C	$r_{0\ 1300}, [\Omega \cdot m]$	1,51E-06
Номинално напрежение	$U, [V]$	220
Електрическа мощност	$P, [W]$	7000
Диаметър на проводника	$d_{np}, [mm]$	3
Диаметър на дорника	$D_{дрн}, [mm]$	14
Сечение на проводника	$S_{np}, [mm^2]$	7,07
Съпротивление на нагревателя в работно (горещо) състояние	$R_n, [\Omega]$	6,91
Съпротивление на нагревателя в начално (студено) състояние	$R_{н\text{ст}}, [\Omega]$	6,64
Дължина на проводника	$L_{np}, [m]$	32,38
Брой навивки на нагревателя	$n, [-]$	607
Дължина на навигия нагревател	$L_{HE}, [m]$	8,49
Стъпка на навиване на проводника	$s, [mm]$	14

$$d_{np} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \left(\frac{P}{U}\right)^2 \cdot \frac{r_{0\ 20}}{w}}$$

$$R_n = \frac{U^2}{P}$$

$$R_{н\text{ст}} = \frac{R_n}{C_t}$$

$$L_{np} = \frac{R_{н\text{ст}} \cdot S_{np}}{r_{0\ 20}}$$

$$n = \frac{L_{np}}{\pi(D_{дрн} + d_{np})}$$

$$L_{HE} = \pi \cdot D_{к\text{сп}} \cdot N_k$$

$$s = \frac{L_{HE}}{n}$$

Изработване на опитен образец 1

Конструкцията на образец 1 (фиг. 2.8) е за получаване на максимално количество стъкломаса $m = 20$ kg. Формата на печта е определена от цилиндричната форма на тигела. Нагревателят е изпълнен от съпротивителен проводник с диаметър 3 mm, навит върху дорник с диаметър 14 mm. Поставен е в 12 керамични пръстена с вътрешен диаметър 190 mm, стъпка по височина на тигела 30 mm.

Топлинната изолация е двуслойна: първи слой – керамични пръстени, втори слой – влакнест керамичен



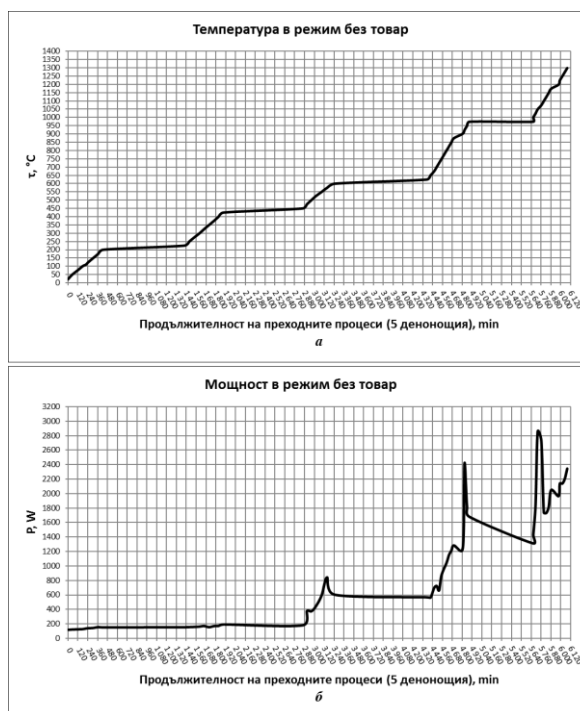
фиг. 2.8 Реализиран опитен образец на малогабаритна стъклотопилна печ

материал с дебелина 150 mm и работна температура 1400°C. Дъното е изпълнено с трислойна изолация: първи слой – шамотна обмазка; втори слой – шамотен блок с дебелина, съответстваща на номенклатурата и шамотни тухли и трети слой – обемно-уякчена влакнеста топлоизолационна плоча.

Процесът на разгриване на стъклотопилната пещ според условията на производителя изисква зададена скорост на повишаване на температурата. В съответствие с изискванията на керамичните материали, които се характеризират със зони на задържане на температурата, продължителността на процеса независимо от режима (празен ход или натоварване) е от две до пет денонощия. Времетраенето е изкуствено удължено за получаване големината на загубите, разпределението на температурите в установен режим и еквивалентната мощност:

$$P_{\text{екв.}} = UI \frac{t_{\text{работа}}}{t_{\text{работа}} + t_{\text{пауза}}} \quad (2.32)$$

Датчикът на терморегулатора е поставен в средата на тигела по височина в пространството, заето от нагревателя.

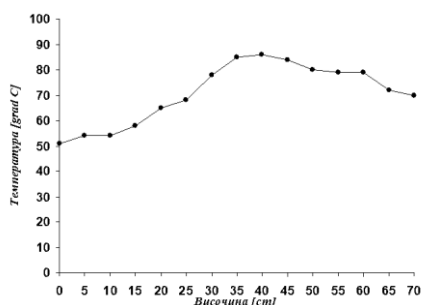


фиг. 2.9 Образец 1: Температура и мощност в режим без товар

табл. 2.6 Образец 1:
Режим на натоварване 1

– обобщени експериментални данни

Процес №	τ_n от...до... [°C]	$t_{\text{процес}}$ [h]	$P_{\text{екв.}}$ [W]
1	25÷225	8	450
2	225	16	250
3	225÷575	7	1040
4	575	14	800
5	575÷875	6	2000
6	875	18	1600
7	875÷1300	9	3800



фиг. 2.10 Разпределение на температурата по височина на корпуса на пещта при температура на термопреобразувателя 1300°C

Режим на празен ход

В режим на празен ход е изследван процесът на разгриване на пещта до температура 1300°C със зададена скорост 25°C/h. В графичен вид резултатите са изобразени на фиг. 2.9: фиг. 2.9а – изменение на температурата и зоните на задържане; фиг. 2.9б – изменение на мощността, съгласувано с предходната фигура. Пиковото нарастване на мощността в началото на всеки период след температурата на задържане е особеност на терморегулатора.

За температури 575°C и 875°C задържането е съответно за 80 и 100 min за предотвратяване обратимостта на модификационните превръщания, поради наличието на кварц в огнеупорните материали.

Режим на натоварване 1 – топене на стъкло в тигел

Аналогично са получени данни за разгриването на пещта в режим с товар от

студено състояние. Технологичният процес изисква първоначално запълване със студени отпадъци, към които при необходимост след размекване и частично разтопяване се добавя допълнителното количество.

Експериментът се провежда при зададена крайна температура за всеки период, която се задържа до установен режим за получаване на мощността на празен ход. В табл.2.6 са показани обобщените експериментални данни. На фиг. 2.10 е изобразено разпределението на температурата на кожата по височина.

2.3. Опитен образец 2.

Конструкция

Конструкцията на образец 2 съответства на образец 1, но поради смяна на тигела са заменени елементите на дъното, част от носачите и нагревателния елемент при запазване вида на материалите.

Проведените експерименти обхващат:

- Режим на натоварване 1 – топене на стъкло в тигел с достигане на температура 1300°C;
- Режим на натоварване 2 – топене на стъкло в гипсова форма с достигане на температура 1000°C.

Режим на натоварване 1 – топене на стъкло в тигел

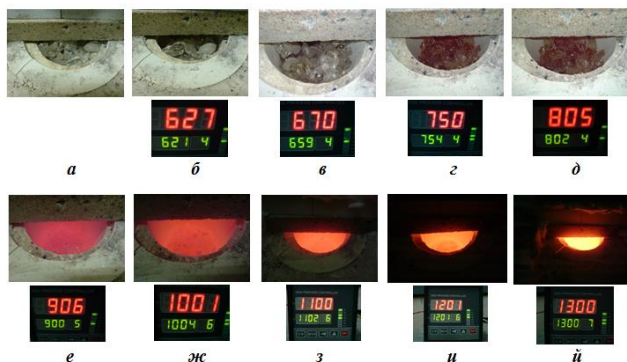
Изменени са настройките на терморегулатора в съответствие с експериментите с образец 1. Програмираният температурен график, (състоящ се от седем точки, т.е. седем цикъла) във вида, в който се задава на терморегулатора е представен на табл. 2.7.

табл. 2.7 Задание за терморегулатора

	1	2	3	4	5	6	7
t, min	60	480	900	540	900	480	60
$\tau_{\text{зад}}$, °C	50	450	450	900	900	1300	1300

където: $\tau_{\text{зад}}$, [°C] – задание (SP) за точката от температурния график; t, [min] – време за неговото достигане.

На фиг. 2.14 са представени етапите от процеса на топене на стъкломасата. На малките снимки са визуализирани показанията на терморегулатора.



фиг. 2.14 Процес на топене на стъкломасата



фиг. 2.15 Действащ образец 2 на пещта

Режим на натоварване 2 – топене на стъкло в специална форма

Поради специфичните физико-химични характеристики на гипса процесът на нагряване се реализира при температура до 1000°C. При по-висока от тази температура настъпва частично разлагане на гипса, а при 1193°C се извършват полиморфни

превръщания – гипсовата форма се разпада. Стъклотопенето се осъществява по температурен график, зададен чрез терморегулатор.



фиг. 2.17 Етапи от процеса на стопяване на стъклото

За формуването на изделията (фиг.2.17) са използвани стъклени отпадъци (трошки) от кристално стъкло. Експерименталните резултати са представени в табл.2.8.

На фиг. 2.18 е представена получената стъклена скулптура.

табл. 2.8 Образец 2: Режим на натоварване 2 – обобщени експериментални данни

Ден	Час	$\tau_{\text{ТД}}$, [°C]	$P_{\text{екв.}}$ [W]
1 ден	10:00 - 17:05	27 - 153	125 - 440
2 ден	07:30 - 19:00	325 - 956	400 - 2012
3 ден	10:00	1067	2000

При неизпълнение на изискванията гипсът се разлага и се отделят отровни серни оксиди, а оставащият в стъкломасата калциев оксид довежда до нарушаване на структурата на формата и бързото ѝ втвърдяване (фиг. 2.20).



фиг. 2.20 Стъкломаса с нарушена структура

Последващото ѝ втечняване с цел отстраняването ѝ от тигела налага термообработка при много по-висока температура (минимум 1300°C).



фиг. 2.18 Готовата стъклена скулптура

Експлоатационните условия и ремонтпригодността при подмяна на тигела, нагревателния елемент и смяна на технологичните режими определя конструкцията на трети опитен образец.

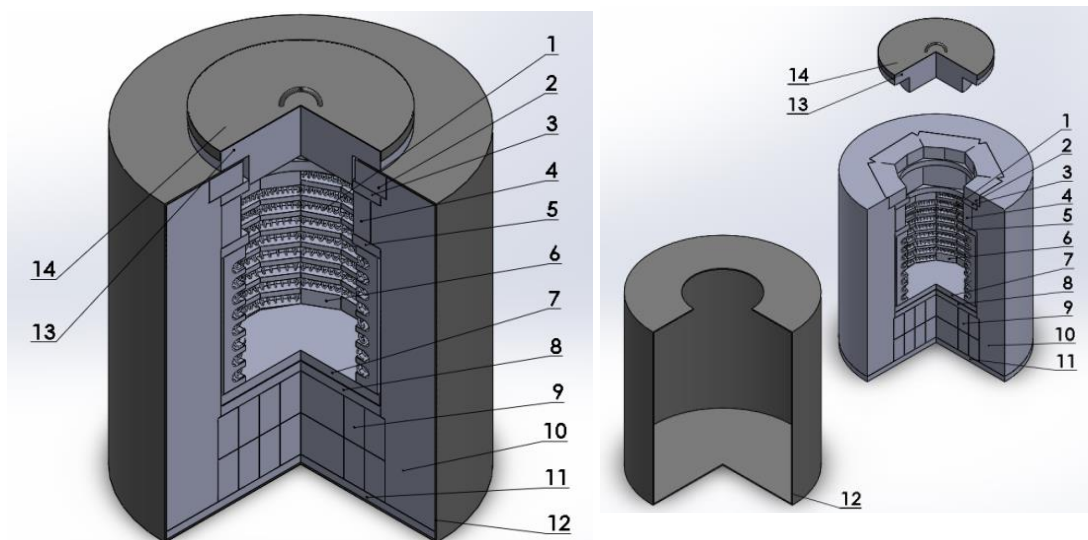
2.4. Опитен образец 3.

Конструкция

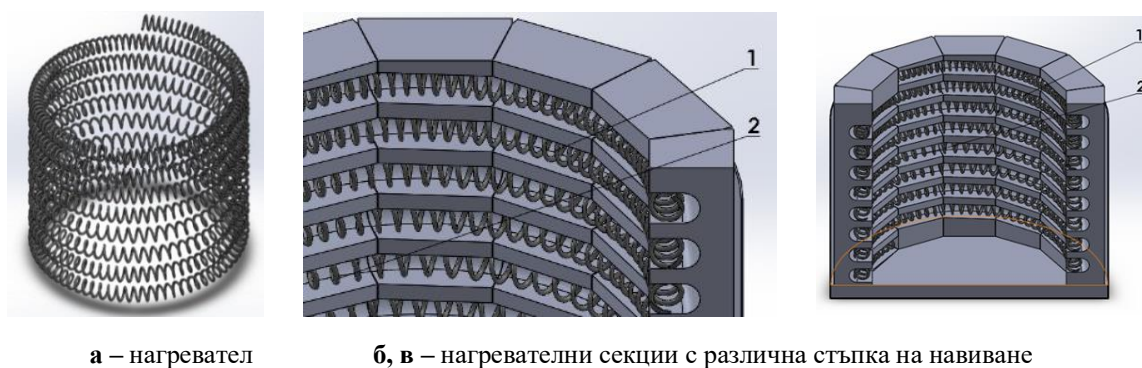
Конструкцията на опитен образец 3 е представена на фиг. 2.21. Основата на печта се състои от три слоя обемно уякчена влакнеста топлоизолационна плоча с дебелина 20 mm, респ. с работни температури съответно 1260°C и 1400°C и два слоя огнеупорни тухли FL28-10 с дебелина 63 mm с максимална работна температура 1540°C. Нагревателният елемент от Kanthal A1 (фиг. 2.22a) се състои от 8 секции в конструкция от огнеупорни тухли, фиксирани в метален цилиндър, който не позволява изтичане на стъклото към основата и стените при евентуално нарушаване целостта на тигела или гипсовата отливка.

В резултат на теоретичните и експерименталните изследвания на образци 1 и 2 нагревателният елемент е изработен с различна плътност на мощността чрез различна стъпка на навиване на всяка секция (фиг. 2.22б и 2.22в). Изолацията на стената на печта е от влакнест керамичен материал с дебелина 150 mm и работна температура 1400°C. Над работната зона е оформено газово пространство и отвор с капак с двуслойна

високотемпературна топлинна изолация. Датчикът на терморегулатора е разположен непосредствено над най-горната секция на нагревателя.



фиг. 2.21 Конструкция на опитен образец 3 на стъклотопилна пещ
 1 – нагревателен елемент Kanthal A1; 2,4,9 – огнеупорни тухли; 3,8,11 – влакнеста топлоизолационна плоча 1400°C; 5,7 – топлоизолационна плоча 1260°C; 6 – огнеупорни тухли с канали, в които е положен нагревателния елемент; 10 – високотемпературна топлинна изолация; 12 – кожух; 13 – капак; 14 – стоманена обвивка на капака.



а – нагревател

б, в – нагревателни секции с различна стъпка на навиване

фиг. 2.22 Нагревателен елемент: 1 – участък с малка стъпка на навиване; 2 – участък с голяма стъпка на навиване.

Съоръжението, аналогично на образец 2, е предназначено за работа в два технологични режима на топене на стъкло. За целта пещта е изградена на модулен принцип. В първия случай в цилиндричното работно пространство се поставя керамичен тигел (фиг. 2.23), в който от шихта и трошки или само от трошки се получава желаното количество стъкломаса, а във



фиг. 2.23 Тигел



фиг. 2.24 Готова форма

втория – тигелът се изважда и на негово място се поставя заредената със стъквени трошки гипсова форма (фиг. 2.24). Отделните елементи на опитния образец на пещта са показани на фиг. 2.26 и фиг. 2.28.



фиг. 2.26 Нагревателен елемент, носачи и изолация на отвора



фиг. 2.28 Високотемпературна изолация, корпус и капак

Режим на натоварване 2 – топене на стъкло в специална форма

Планираният експеримент по предварително изготвен температурен график на нагряване до температура 900°C и задържане за три часа на тази температура е с времетраене 45 часа.

На фиг. 2.29а е показан товарът на печта преди началото на термообработката – запълнената с трошки гипсова форма, изолирана допълнително с огнеупорен цимент.



а



б

фиг. 2.29 Стъклена скулптура: *а* – запълнена със стъклени трошки гипсова форма с външен слой от огнеупорен цимент; *б* – готово изделие.

За последния етап от процеса на нагряване (температура на термодвойката 900°C) е отчетена еквивалентната мощност и са измерени температурите в характерните точки по височина на корпуса на печта (табл. 2.9).

табл. 2.9 Експериментални резултати от работата на образеца на печта

Температури [°C]									$t_{\text{работа}}$	$t_{\text{цикъл}}$	$P_{\text{екв.}}$
$\tau_{\text{ТД}}$	$\tau_{10\text{cm}}$	$\tau_{20\text{cm}}$	$\tau_{30\text{cm}}$	$\tau_{40\text{cm}}$	$\tau_{50\text{cm}}$	$\tau_{60\text{cm}}$	$\tau_{70\text{cm}}$	$\tau_{80\text{cm}}$	[s]	[s]	[W]
900	43	46	56	59	62	59	52	47	2	10	1240

2.5. Изводи от втора глава.

В съответствие с експерименталните изследвания, проведени върху опитните образци могат да се направят следните по-важни изводи:

- предложената в предварителните изчисления програма за изчисляване на стъклообразуващата смес предлага решение за получаване на стъклomаса с определен

състав на база съществуващи зависимости за изчисляване на изходните суровини; използва се за вариантно изчисляване на различни състави на шихтата, при което поради специфичните проблеми са анализирани възможностите на различните методи за решаване на задачата; получените грешки са в допустими граници като най-големите грешки възникват в суровините с минимална концентрация;

- получената по-висока от допустимата температура на някои части от околните стени на пещта и неравномерното ѝ разпределение са определени от технологията на изработване на опитния образец – получават се зони с намалена дебелина на топлинната изолация, т.е. не трябва да се допуска различна степен на уплътняване на керамичната вата;

- опитните образци удовлетворяват изискванията за безопасна работа по отношение температурите на повърхността;

- получените готови скулптурни изделия показват максимална степен на запълване на гипсовата форма, т.е. пълно стопяване на стъкломасата, което доказва правилно проведени процеси на нагриване и охлаждане съобразно зададения температурен график.

Глава 3 ТЕОРЕТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА ТОПЛИННИТЕ ПРОЦЕСИ В МАЛОГАБАРИТНА ЕЛЕКТРОСЪПРОТИВИТЕЛНА ПЕЩ ЗА ТОПЕНЕ НА СТЪКЛО.

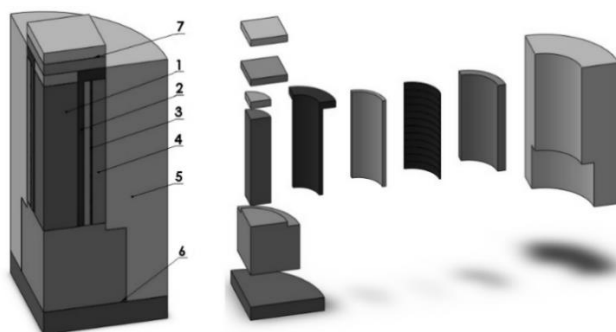
3.1. Въведение.

Условията на провеждане и резултатите от извършените експериментални изследвания се използват в настоящата глава за съставяне на теоретичните модели, необходими за топлинния анализ на малобагаритна ЕСП за топене на стъкло. Усилията в производствения процес на стъklarски изделия са съсредоточени главно за намиране на подходящо разпределение на температурата в стъклената стопилка. Същевременно от съществено значение е и постигането на такова разпределение на температурите в огнеупорните и топлоизолационни елементи, при което да се намалят загубите на енергия. Следващият задължителен в технологичния цикъл процес, за чието качествено провеждане е необходим теоретичен анализ е темпериването на стъклените изделия.

Анализите се извършват с помощта на метода на крайните елементи, реализиран в програмния продукт SolidWorks Simulation, използвайки зависимостта на физическите параметри на материалите от температурата поради големия диапазон на изменението им.

3.2. Теоретично моделиране на ЕСП за топене на стъкло.

Геометричен модел на пещта



фиг. 3.3 Конструктивен модел на пещта

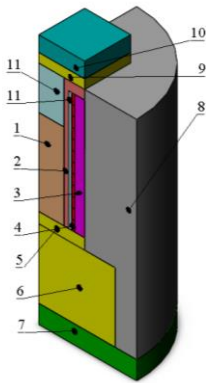
1 – стъкломаса; 2 – тигел; 3 – нагревател; 4 – изолационни елементи – носачи на нагревателя; 5 – изолация на стената; 6 – изолация на дъното; 7 – капак.

Физични характеристики на материалите

Физичните характеристики на материалите на отделните елементи на печта са въведени със съответните стойности и функционални зависимости от температурата на необходимите за изследването на процеса физически параметри (Прил. 2, табл. П2.1).

Начални и гранични условия

- Топлинна мощност: образци 1 и 2 – за четвърт от съоръжението; образец 3 – за половината от съоръжението поради специфичната форма на товара;
- Теплопренасяне чрез излъчване във вътрешността на печта – радиация от повърхност към повърхност със степен на чернота: от горната повърхност на стъкломасата към капака на печта; от нагревателя към: 1) страничната повърхност на тигела при режим на натоварване 1; 2) страничните повърхности на товара при режим на натоварване 2;



фиг.3.4 Четвърт геометричен модел на печта

- 1 – стъкломаса; 2 – тигел;
- 3 – керамични пръстени;
- 4 – нагревателен елемент Kanthal A1; 5 – дъно на тигела от шамот;
- 6 – шамотна плоча; 7 – влакнеста топлоизолационна плоча; 8 – високотемпературна изолация; 9 – капак; 10 – топлоизолация на капака; 11 – въздух.

- Конвективен теплообмен с околната среда: коефициентите на конвекция са температурно зависими и са изчислени и интерполирани за всяка топлоотдаваща повърхност;

- Радиационен теплообмен с околната среда, зададен чрез степента на чернота на материала на корпуса;

- На границите на равнините на симетрия не са задавани допълнителни гранични условия, тъй като задачата е осесиметрична и по този начин се дефинира непрекъснатост на разпределение на топлинния поток.

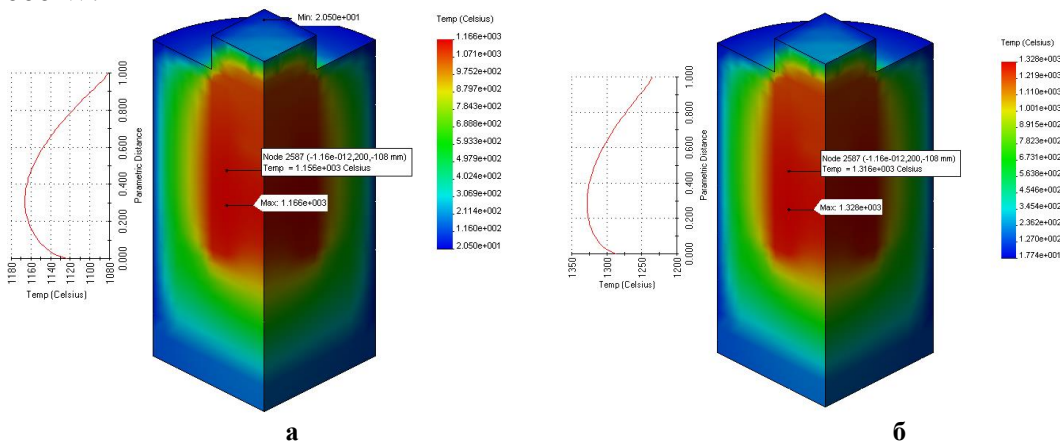
- Анализът на преходните процеси изисква задаването на начални условия (начални температури на всички подобласти: 293 K) със съответстваща екви-валентна мощност.

Образец 1: Режим на натоварване 1

Геометричният модел е представен на фиг. 3.4.

- **Стационарен режим;**

Теоретичното пресмятане (фиг. 3.5) е извършено при равномерно разпределение на мощността като цилиндрична стена по околната повърхност на тигела. Проведено е за два случая, съответстващи на мощности 3000 W и 4000 W.



фиг. 3.5 Разпределение на температурата в цялото съоръжение и по височина на нагревателя за: а – P=3000 W и б – P=4000 W

Точността на модела се оценява чрез съпоставка с резултатите от експерименталното изследване върху лабораторен образец 1.

- **Преходни процеси.**

Изчислителната процедура е проведена в два варианта:

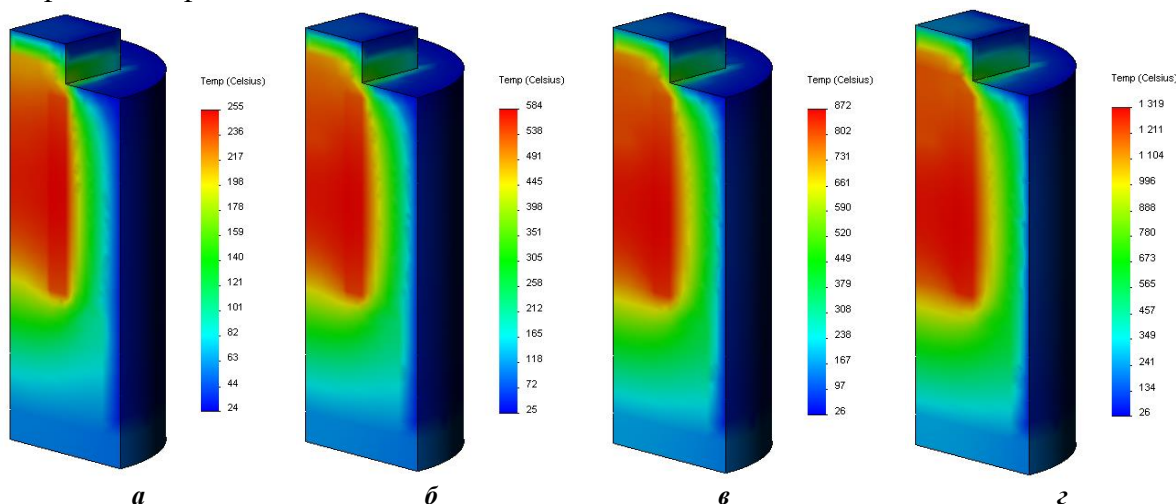
- от експеримент с опитен образец (табл. 2.6, с.14) са получени еквивалентните мощности в края на всеки един от четирите етапа на нагряване. Те са представени в табл. 3.1, където: P_H , τ_H – еквивалентна мощност и температура на нагревателя в края на съответния цикъл с времетраене $t_{\text{процес}}$.

- с мощността, съответстваща на всеки етап се изчислява преходния процес, за да се оцени възможната максимална скорост, както и времетраенето за достигане на зададената температура на следващия етап.

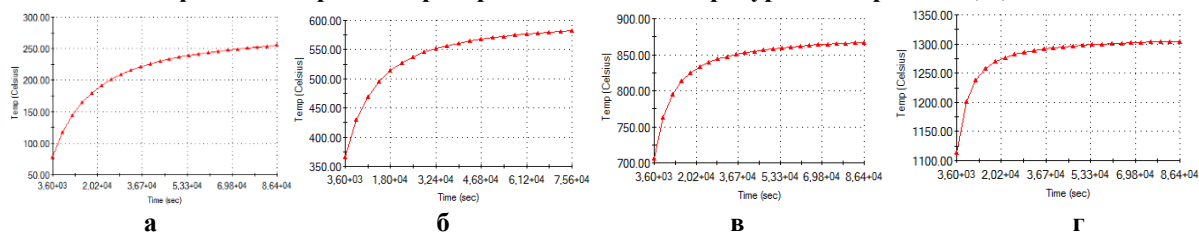
Теоретичното разпределение на температурите в елементите на съоръжението за четирите етапа е показано на фиг. 3.7 и фиг. 3.8.

табл. 3.1 Температури на нагревателя в края на всеки един от четирите етапа на нагряване

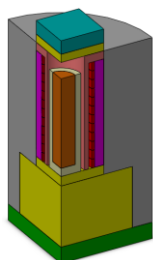
Процес №	P_H [W]	$t_{\text{процес}}$ [h]	τ_H [°C]
1 (фиг.3.11а)	250	24	255
2 (фиг.3.11б)	800	21	584
3 (фиг.3.11в)	1600	24	872
4 (фиг.3.11г)	3800	24	1319



фиг. 3.7 Теоретично разпределение на температурите за процеси 1, 2, 3 и 4



фиг.3.8 Температура на термодвойката за процеси 1, 2, 3 и 4



фиг. 3.9 Геометричен модел (1/4) на печта

Образец 2: Режим на натоварване 2

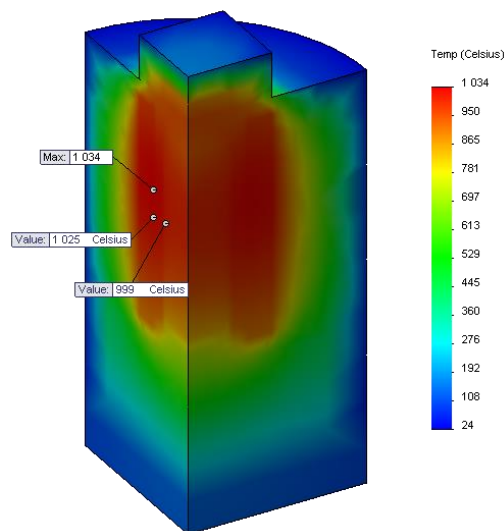
- **Преходен процес на нагряване;**

Теоретичният модел на тиглова електросъпротивителна пещ (фиг.3.9) за топене на художествено стъкло в гипсова отливка съответства на елементите от реалната конструкция на лабораторния образец на печта. Стъклената скулптура е моделирана като цилиндрично тяло с размери диаметър 100 mm и височина 330 mm в гипсова форма с дебелина на стената 20 mm и на дъното – 30 mm.

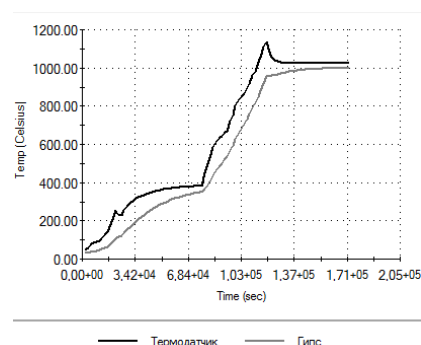
При моделирането се използва получената при експеримент еквивалентна мощност на нагриване за всеки етап (табл. 2.8, с.16). Данните за моделирането на преходния процес са представени в табл. 3.2.

табл. 3.2 Образец 2: Режим на натоварване 2 – данни за моделиране процеса на нагриване

№	$t_k, [s]$	$P_{\text{екв.теор.}}, [W]$
1.	0 ÷ 12600	31,25
2.	12600 ÷ 12605	62,5
3.	12605 ÷ 16200	95
4.	16205 ÷ 19800	150
5.	19805 ÷ 22500	31,25
6.	22505 ÷ 24300	65
7.	24305 ÷ 25500	110
8.	25505 ÷ 77400	100
9.	77405 ÷ 81000	237,5
10.	81005 ÷ 93600	272,5
11.	93605 ÷ 97200	375
12.	97205 ÷ 104400	425
13.	104405 ÷ 108000	475
14.	108005 ÷ 111600	550
15.	111605 ÷ 115200	625
16.	115205 ÷ 118800	725
17.	118805 ÷ 172800	500



Фиг. 3.10 Температура на термодвойката и максималната температура от точка на повърхността на гипса



Фиг. 3.11 Изменение на температурата в същите точки

На фиг. 3.10 са показани крайните (установени) температури на характерни точки от пещта и товара: максимална температура, температура на термодвойката, максимална температура от точка на външната повърхност на гипса в края на интервала на нагриване. Резултатът от числения анализ на преходния процес е изобразен на фиг. 3.11.

• **Преходен процес на охлаждане.**

Качественото провеждане на темперирването на изделията е особено важно при производството на единични и уникални екземпляри, при които е невъзможно извършването на опити за настройка на процеса.

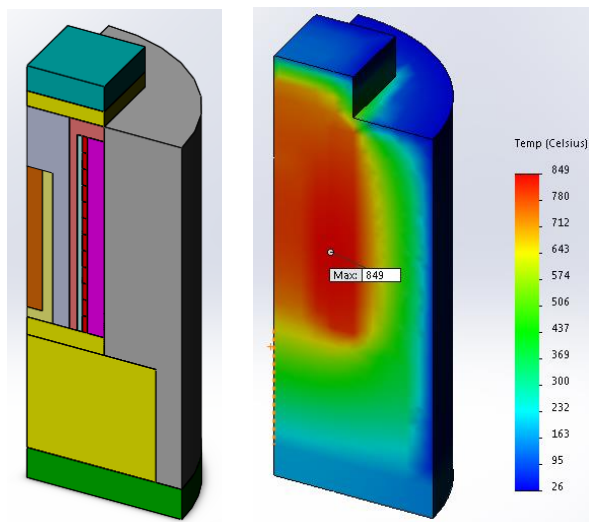
Практическите изисквания за нормално протичане на процеса охлаждане (със съответни скорости) са разделени на три температурни диапазона: скорост на понижаване на температурата от 900 до 600°C – 50°C/h (6h); етап на задържане при температура ≈ 600°C (18 h); скорост на понижаване на температурата от 600 до 400°C – 10°C/h (етап на бавно охлаждане) (20h); скорост на понижаване на температурата под 400°C (до 25°C) – 25°C/h (етап на бързо охлаждане) (15h);

С тези изисквания се сравняват резултатите от теоретичния анализ на процесите. Изискванията определят пълно време на процеса ~ 59 h, при което определящи са характеристиките на първия етап. Представените числени резултати се отнасят към този

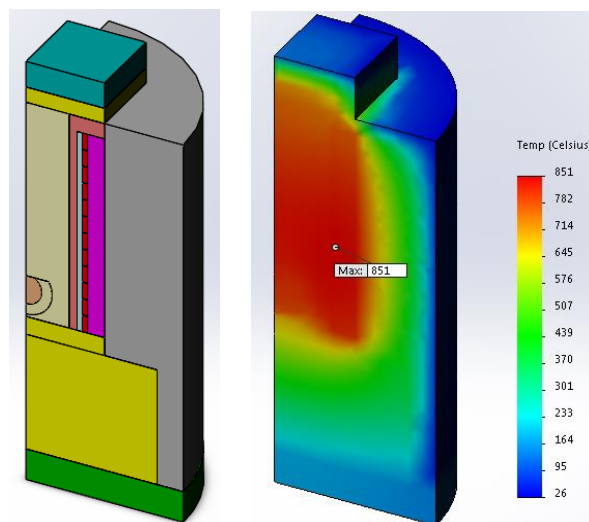
период, с основна цел да се определят характеристиките на пещта (мощност по време на охлаждане), които осигуряват такъв режим.

Режимът на охлаждане е изследван за два различни по размери и форма товара – стъклено изделие с цилиндрична форма (обект на изследване режима на нагриване от предходната точка) и стъклено изделие със сферична форма. Геометричните модели на пещта са представени съответно на фиг.3.12а и фиг.3.13а.

Процесът на охлаждане е моделиран като за начални температури на отделните елементи са въведени получените при установения режим на нагриване при зададена топлинна мощност на нагревателя 1.5 kW. На фиг.3.12б и фиг.3.13б са показани температурите в началото на процеса на охлаждане (резултати от нагриването).

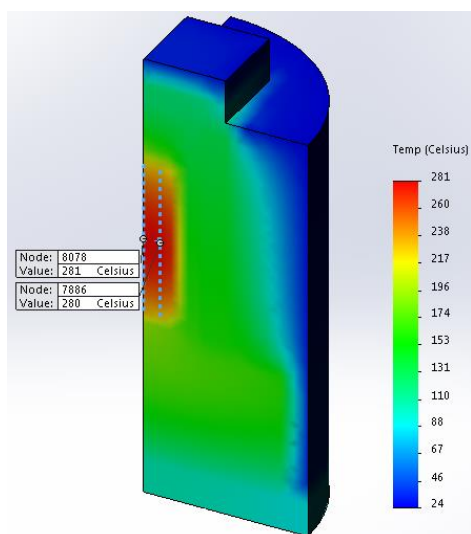


а–геометричен модел; **б**–установен режим
фиг. 3.12 Изделие с цилиндрична форма

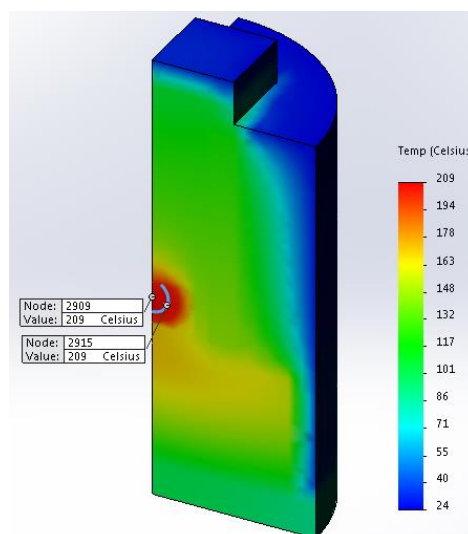


а–геометричен модел; **б**–установен режим
фиг. 3.13 Изделие със сферична форма

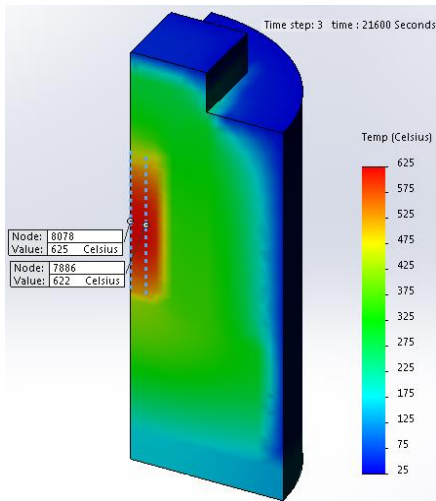
Крайните резултати от числения анализ за двете форми на изделията са представени на фиг. 3.14 и фиг. 3.15. Те показват разпределението на температурите при завършване на процеса до 20 h. На фиг. 3.16 и на фиг. 3.17 е показано температурното разпределение в процес на свободно охлаждане при изминали 6 h.



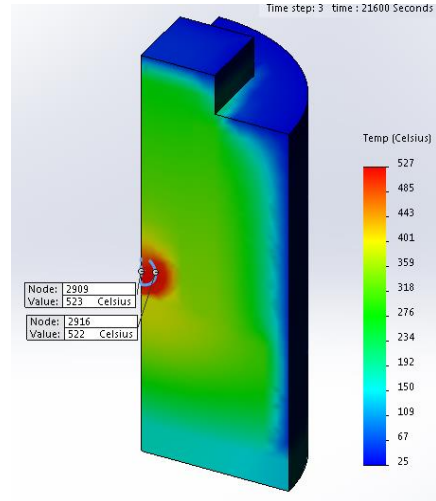
фиг. 3.14 Процес на свободно охлаждане 20 h на изделие с цилиндрична форма



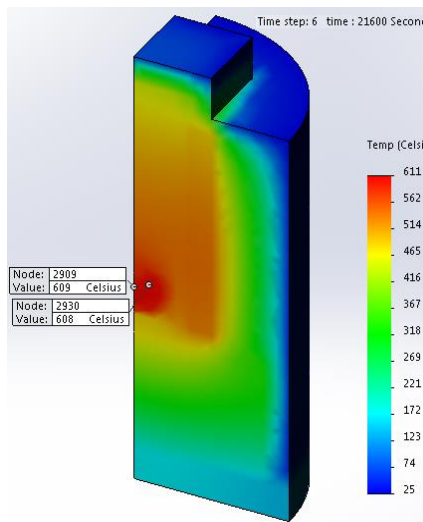
фиг. 3.15 Процес на свободно охлаждане 20 h на изделие със сферична форма



фиг. 3.16 Процес на свободно охлаждане на изделие с цилиндрична форма при изминали 6 h

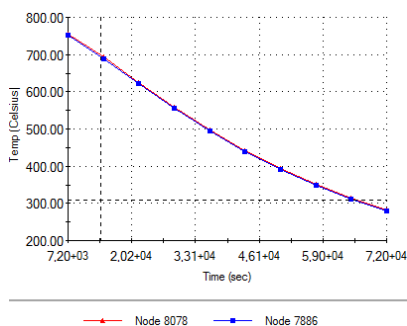


фиг. 3.17 Процес на свободно охлаждане на изделие със сферична форма при изминали 6 h

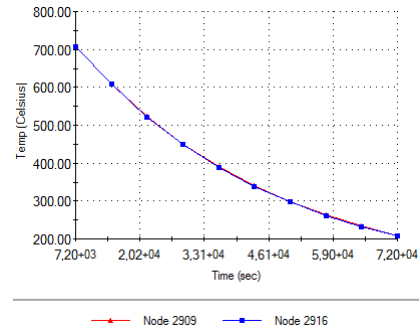


фиг. 3.18 Процес на охлаждане на изделие със сферична форма при изминали 6 h при зададена топлинна мощност 500 W

Практическото изискване температурата 600°C да бъде достиганата за 6 ч., налага задаването на определена мощност за този период с цел спазване на необходимата скорост на понижаване на температурата при изделието със сферична форма. На фиг. 3.18 е показано изпълнението на горепосоченото изискване. Окончателното приключване на процеса и достигнатата температура не са достатъчни за оценка на режима. При анализ на преходния режим на охлаждане се оценява разликата между температурите в характерни точки от изделието – центърът и повърхността на изделието, т.е. границата между стъклото и гипсовата форма, като определящи за възникването на механични напрежения. Резултатите са представени на фиг. 3.19 и фиг. 3.20, показващи почти пълно съвпадение на температурите.



фиг. 3.19 Температури в центъра и повърхността на изделие с цилиндрична форма



фиг. 3.20 Температури в центъра и повърхността на изделие със сферична форма

Резултатите от моделиране на процеса на охлаждане показват следното:

- поради неизвестно разпределение на температурите в пещта е необходимо предварително изчисляване на процеса на нагряване. Получените резултати се използват като входни данни в процедурата за анализ на охлаждането;

- моделирането на изделията с апроксимиращи форми дава възможност за анализ на разпределението на температурите и оценка на състоянието на отделните елементи;
- крайното разпределение на температурите съответства на практическите препоръки.

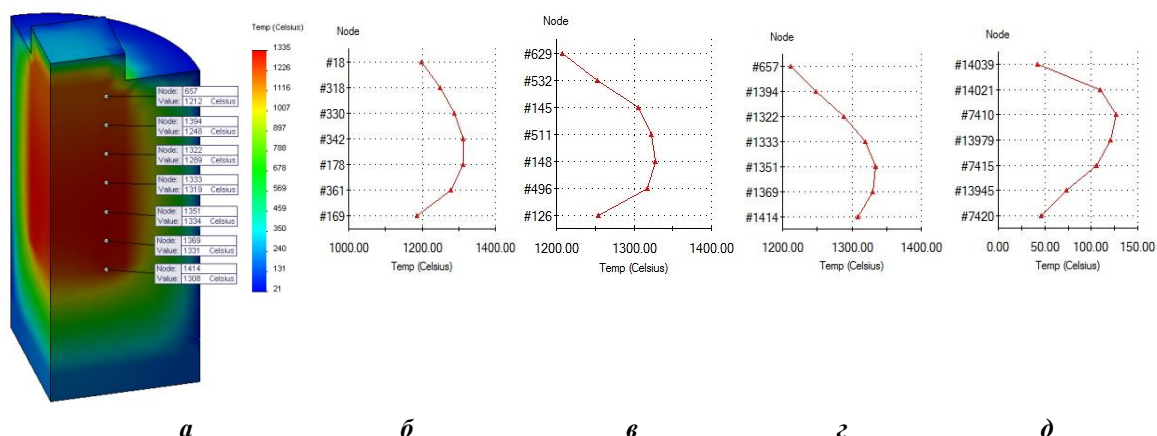
Образец 2: Разпределение на плътността на мощността

Анализът чрез модела и експеримента с лабораторния образец показват, че при равномерно разпределение на плътността на мощността се получава неравномерно температурно поле по височина. Този недостатък се преодолява чрез подходящо разпределение на мощността на нагревателя.

Резултатите от теоретичния модел (фиг. 3.22) показват това явление при равномерно разпределена мощност 4500 W – в средната част на нагревателния елемент (възел #1333) температурата е 1319°C. От експеримента при същите условия терморегулаторът отчита температура 1300°C (грешка 1,5 %).

табл. 3.3 Разпределение на мощността при нагревател с 12 секции

Секция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вариант 1 (фиг. 3.22)	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75	93,75
Вариант 2 (фиг. 3.23)	90	90	90	35	35	35	35	50	70	175	200	220
Вариант 3 (фиг. 3.24)	90	90	90	35	35	35	35	130	130	130	130	195



фиг. 3.22 Температурно разпределение (табл. 3.3, вариант 1): а – в цялото съоръжение; и по височина на: б –осевата линия на стъкломасата; в – периферията на стъкломасата; г – нагревателя; д – корпуса.

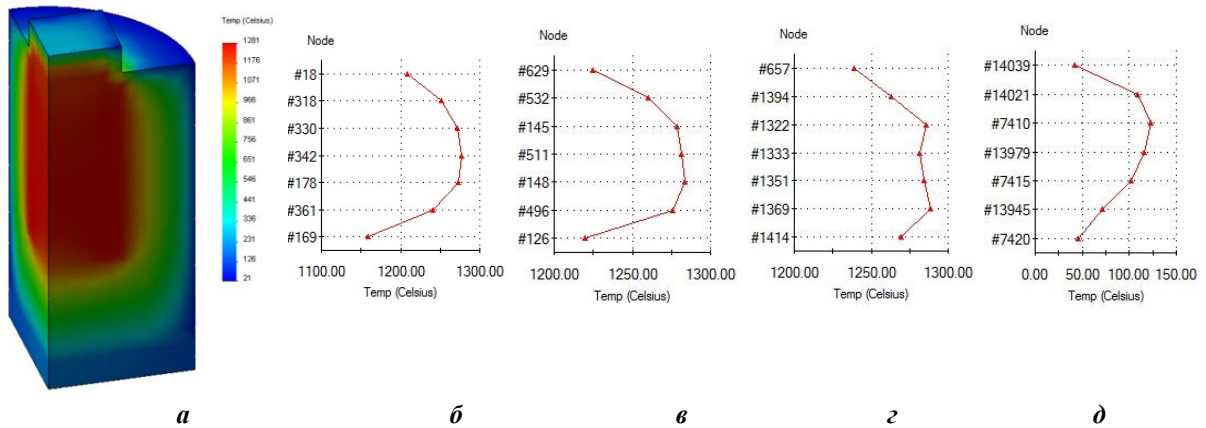
Вариант 2 (табл. 3.3) показва възможността чрез итерационни изчисления да се постигне произволно по вид температурно поле (фиг. 3.23). В случая е представено решение за получаване на температурно поле, което за осевата линия на стопилката има равномерност $\varepsilon=4,3\%$.

Технологичните затруднения при изработване на нагревателя определят необходимостта от намаляване на броя секции. Предвид на това във вариант 3 е показано технологично възможно решение с нагревател с 4 секции. За него са показани резултати на фиг. 3.24. Получената неравномерност за същата област е 5,2 %, което удовлетворява процеса.

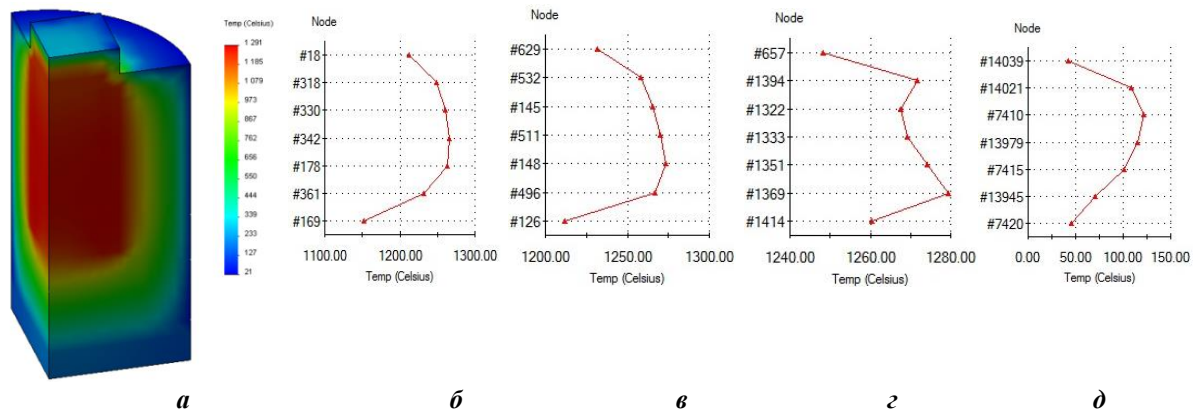
Степента на неравномерност ε е изчислена по зависимостта:

$$\varepsilon = \left| \frac{\tau_{\max} - \tau_{\text{ср.}}}{\tau_{\text{ср.}}} \right| \cdot 100\% \quad (3.1)$$

$$\text{където: } \tau_{\text{ср.}} = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad (3.2)$$



фиг. 3.23 Температурно разпределение (табл. 3.3, вариант 1): а – в цялото съоръжение; и по височина на: б –осевата линия на стъклomasата; в – периферията на стъклomasата; г – нагревателя; д – корпуса.

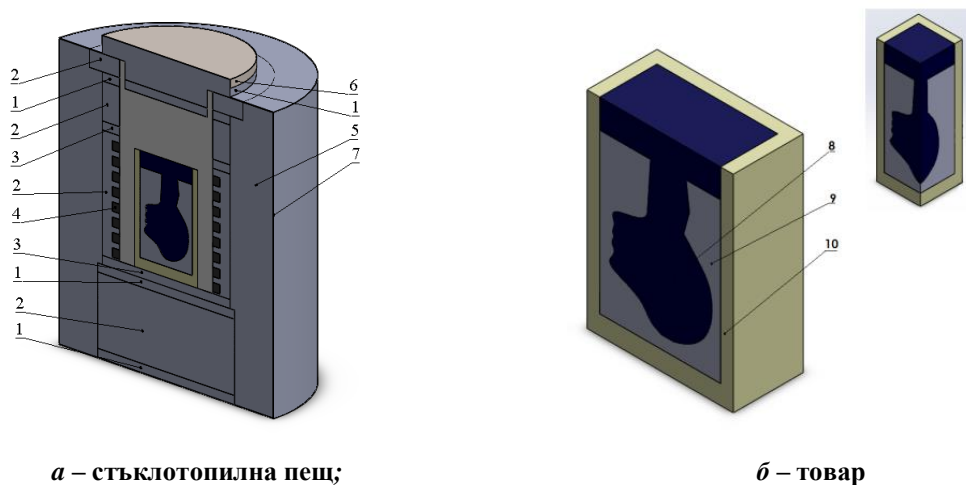


фиг. 3.24 Температурно разпределение (табл. 3.3, вариант 1): а – в цялото съоръжение; и по височина на: б –осевата линия на стъклomasата; в – периферията на стъклomasата; г – нагревателя; д – корпуса.

Образец 3: Режим на натоварване 2

- Геометричен модел на пещта и на товара

Компонентите на теоретичния модел, показани на фиг. 3.27а съответстват на елементите от реалната конструкция на образец 3 на пещта и на товара.



а – стъклотопилна пещ;

б – товар

фиг. 3.27 Геометричен модел на половината от изследваната система

1 – влакнеста топлоизолационна плоча 1260°C; 2 – огнеупорни тухли; 3 – влакнеста топлоизолационна плоча 1400°C; 4 – нагревателен елемент Kanthal A1; 5 – високотемпературна топлинна изолация; 6 – капак; 7 – кожух на пещта; 8 – стъкло; 9 – гипс; 10 – огнеупорен цимент.

Товарът (фиг. 3.27б) представлява гипсова форма, запълнена със стъклени трошки. Стъклената скулптура е начертана с максимално близки до действителните форма и размери (фиг. 3.27в).

Качествата на образеца се проверяват и сравняват с модела при моделирането с получената от експеримента еквивалентна мощност 1200 W за последния етап от процеса. На фиг. 3.29 е представено теоретичното разпределение на температурното поле в цялото съоръжение за 44-тия час от процеса. Показани са температурата на мястото на разположение на термодвойката (937°C) и температурите в характерни точки от корпуса, за които са налични и експериментални данни.

3.3. Изводи от трета глава.

- Общият извод за теоретичния анализ по класически методики е, че са приложими само числени методи, поради характера на системата уравнения и големия диапазон на изменение на температурата на топлинните характеристики на материалите;

- Анализът показва, че температурното поле в пещта при равномерно разпределена мощност на нагревателя, т.е. еднаква плътност на мощността, е силно неравномерно – в средната зона е максимално и намалява към дъното на тигела и към капака на пещта. Това е неприемливо поради влиянието му в следните направления:

- в средната зона нагревателят достига граничните стойности на температурата, което намалява експлоатационния срок;

- поради различната температура на стъклосмасата се получават различни условия за протичане на физико-химичните процеси, което понижава характеристиките ѝ, особено за повърхностния слой, който определя избистрянето на стъклото;

- От теоретичния анализ при изменение на разпределението и големината на топлинните източници се получават:

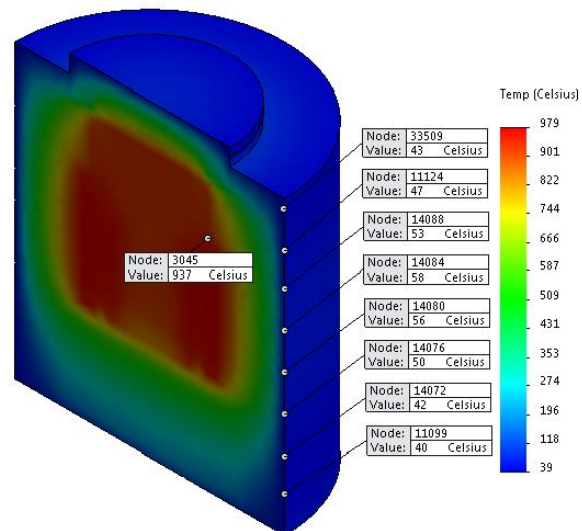
- разпределението на температурното поле във всички елементи;

- чрез изменение големината и разпределението на топлинните източници при голям брой итерации се получават зададените разлики в температурата на характерните точки – по височината на кожуха, тигела и в топлинната изолация.

Теоретичният анализ с малка електросъпротивителна пещ за топене на стъкло дава основание за следните препоръки:

- Анализът на разпределение на плътността на мощността е необходим за получаване на изискваното разпределение на температурите, за да се отговори на технологичните изисквания;

- Поради необходимостта от предварително изработване на опитен образец за получаване на експериментални данни и впоследствие теоретичен анализ чрез модел се получават различия спрямо изискванията за равномерност на температурното поле. Освен това в опитния образец съществуват области в изолацията, които са несъвършени и на които съответстват области от повърхността на пещта с повишени



фиг. 3.29 Температурно разпределение в режим на преходен процес при P = 1200 W

температури, а в модела конструкцията е идеализирана и предвид случайния характер на дефектите, те не са отчетени като технологични несъвършенства;

- Технологичните отвори за извеждане на нагревателните елементи и отворът за поставяне на термодвойката определят области с повишени загуби поради намалената топлинна изолация и топлинните къси съединения. Поради това получените теоретични температури са по-високи от реално измерените на нагревателния елемент;
- Конструкцията, геометричните размери и топлофизичните характеристики на топлинната изолация определят скорости на нарастване на температурата при константна мощност по-високи от максимално допустимите. Поради това е задължително използването на програмируем терморегулатор, в който се задават температурите и периодите на задържането им, за да се извършат процесите на прекристализация на керамичните елементи. В тези случаи преходните процеси трябва да се използват за определяне на енергийните характеристики на пещта.

Глава 4 СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА ТЕОРЕТИЧНИТЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ РЕЗУЛТАТИ.

4.1. Въведение.

Сравнението на резултатите се извършва с цел оценка адекватността на модела и възможностите за използване при проектиране на нови устройства. Величините, които се сравняват по числени стойности от разработените модели след избор на еквивалентна мощност в установен режим при различни температури са:

- температура в мястото на разположение на термодвойката на програмируемия терморегулатор;
- температури по височина на външната стена на съоръжението;

Изборът се определя от възможностите за максимално точно измерване на температурата в съответната точка. На базата на теоретичните модели и проведените експерименти е определена грешката ε в %:

$$\varepsilon_{\text{инт}} = \frac{\tau_{\text{експ.}} - \tau_{\text{теор.}}}{\tau_{\text{експ.}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

4.2. Сравнителен анализ чрез топлинна заместваща схема.

Резултатите показват, че независимо от съществуването на съвременни методи за числен анализ на установени и преходни процеси, използването на модели с топлинни заместващи схеми (ТЗС) е оправдано в начален етап или при липса на други програмни продукти. Условието за получаване на надеждни резултати е правилното разделяне на елементите и използване на температурните зависимости на материалите.

Сравнението на резултатите (табл. 4.1) се отнася за установените стойности на температурите в контролната точка – мястото на терморегулатора до нагревателния елемент. Получаваната грешка е по-малка от 10 %, което доказва адекватността на модела и възможността да бъде използван метода с топлинни заместващи схеми. При работата с него възникват затруднения при описание на възможните недостатъци при изпълнение на конкретно устройство. Те определят повишената грешка, която в случая се дължи основно на проблемите около уплътняването на пространството между капака и отвора на работното пространство.

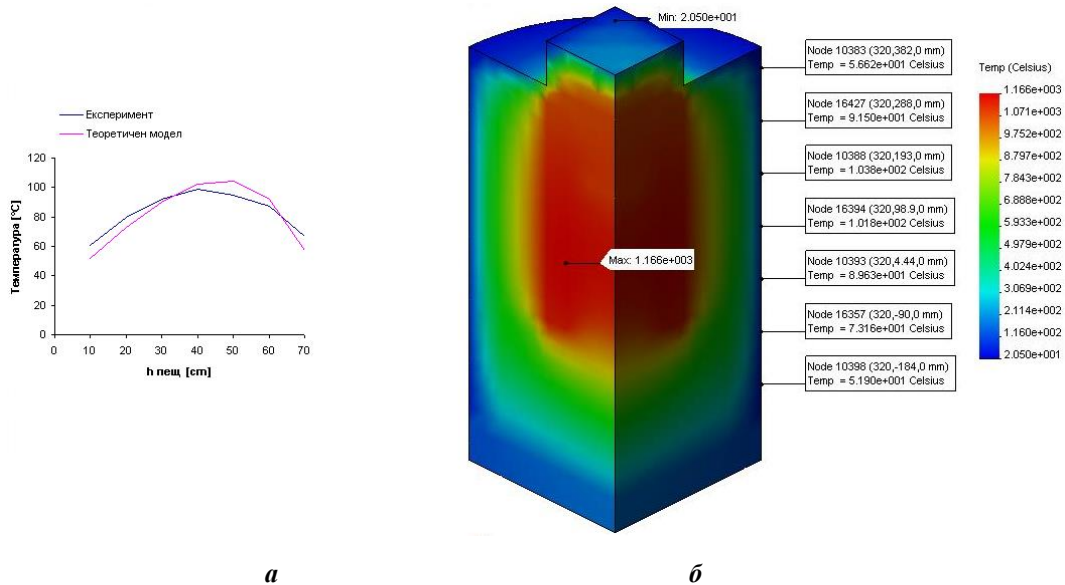
табл. 4.1 Сравнение на теоретични (ТЗС) и експериментални резултати

Входни данни	Модел с ТЗС	Експеримент	Грешка
$P_{\text{н2}}$ [W]	$\tau_{\text{н2}}$ [°C]	$\tau_{\text{н2}}$ [°C]	$\varepsilon_{\text{инт}}$ [%]
800	518	575	9,9
1600	953	875	-8,9
3000	1364	1265	-7,8

4.3. Сравнителен анализ чрез метод на крайните елементи.

- **Образец 1 – стационарен режим;**

В графичен вид резултатите за температурата на външната стена при температура на нагревателя 1156 °C са представени на фиг.4.1a. Теоретичната крива съответства на температурите от модела в точките от корпуса на печта (фиг.4.1б).



фиг.4.1 Изменение на температурата по височина на външната стена на печта за мощност на нагревателния елемент $P = 3000 \text{ W}$

В табл. 4.2 са сравнени резултатите от теоретичния модел и експеримента с грешка от 3,3 до 8,6% (получена при по-малка мощност). Причина е технологията на изработване на образеца и вследствие на това случайното разпределение на загубите от стените и особено от капака.

табл. 4.2 Сравнение на теоретични и експериментални резултати в стационарен режим

Теоретичен модел		Експеримент		Относителна грешка ϵ
P_H	τ_H	P_H	τ_H	
[W]	[°C]	[W]	[°C]	[%]
3000	1156	3000	1265	8,6
4000	1316	4000	1360	3,3

Независимо от неговото изпълнение е практически невъзможно да се осигури добро уплътнение. Това е необходимо да се отчете при конструктивното изпълнение чрез повишаване мощността на нагревателния елемент.

- **Образец 1 – преходни процеси.**

Сравнителният анализ на резултатите от експерименталното изследване и теоретичното моделиране на преходния процес на режима на нагряване е представен в табл.4.3.

табл. 4.3 Сравнение на теоретични и експериментални резултати в режим на преходен процес

Входни данни		Теоретичен модел		Експеримент		Грешка ϵ , [%]
P_H , [W]	$t_{\text{процес}}$, [h]	Процес №	τ_H , [°C]	Процес №	τ_H , [°C]	
250	24	1	255	2	225	13,3
800	21	2	584	4	575	1,6
1600	24	3	872	6	875	0,4
3800	24	4	1319	7	1350	2,3

Изследваният модел е адекватен и може да се използва за анализ на процесите в такива пещи. Максималната грешка е при ниската температура, поради особеност на терморегулатора, уточнена с производителя – в областта до 350°C чувствителността е по-малка и толерансът при регулиране на температурата е по-голям.

- **Образец 2 – режим на натоварване 2.**

Сравнението на моделните и експериментални резултати е представено в табл. 4.4: разлики в абсолютна стойност $\Delta\tau_{max}$ и относителна грешка.

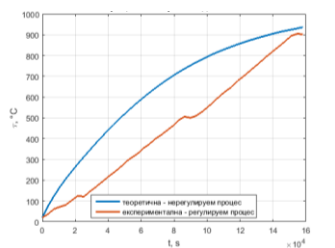
табл. 4.4 Сравнение на моделните и експериментални резултати

$t_k, [s]$	$\tau_{експ.}, [^{\circ}C]$	$\tau_{теор.}, [^{\circ}C]$	$\varepsilon, [\%]$
0 ÷ 77400	325	381	17,2
77405 ÷ 172800	1067	1025	3,9

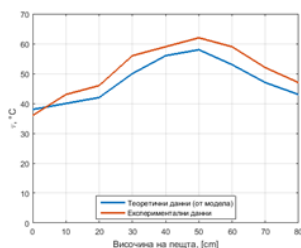
Резултатите от моделирането и експерименталните изследвания показват, че опитният образец се характеризира с повишени загуби спрямо модела. Поради това температурите на образца при едни и същи условия са по-ниски, което трябва да се използва за оценка на качеството на изпълнение на топлинната изолация. В модела тя е дадена с параметрите на фирмата-производител с идеализирано разположение, без да се отчитат местните дефекти.

- **Образец 3 – режим на натоварване 2.**

Преходният процес се изчислява като едноетапен режим на нагриване с мощност, получена от експеримента. Сравнението се извършва за температурите на термопреобразувателя (фиг. 4.2) и корпуса на пещта (фиг. 4.3) в режим на преходен процес. Анализът показва, че за получаването на установената температура от преходния процес чрез МКЕ е необходимо предварително задаване на време, превишаващо препоръчителното: $t = 4 T_q$ (T_q – времеконстанта на процеса). Различията в протичането на процеса както и в преходните случаи се дължи на различните условия: при експеримента поради изисквания свързани с материалите се задава



фиг. 4.2 Процес на нагриване до 900°C при P = 1200 W



фиг. 4.3 Разпределение на температурите на корпуса на пещта при P = 1200 W

регулируем режим на линейно нарастване на температурата със задържане на предвидени стойности; при теоретичното пресмятане се използва нерегулируем режим на едноетапно разгриване.

За оценка адекватността на модела се използва установената температура, получена за 44-тия час от процеса при P = 1200 W.

Получени са температури:

- от експеримента със задържане от регулатора – 900°C;
- от модела чрез изчислителна процедура – 937°C.

Относителна грешка: $\varepsilon = 3.95 \%$.

При температура 900°C е направено съпоставяне на теоретичните и експериментални температури на външната повърхност на пещта (фиг. 4.3). Максималната стойност на относителната грешка е $\varepsilon = 9.68\%$.

4.4. Изводи от четвърта глава.

- Моделирането чрез топлинни заместващи схеми е възможен вариант за изчисление, което се характеризира със следните особености:
 - не показва разпределението на температурите с достатъчна разделителна способност;
 - при използването му затруднение представлява предварителното определяне на времетраенето на процеса. То трябва да отговаря на ориентировъчно приемане $T = (6 \div 7) \cdot T_q$;
 - грешката между експеримент и модел се дължи на невъзможността да се моделира точното разположение и съответстващите връзки в областта на капака;
 - това определя ограниченото му приложение в случаи с минимални изисквания към качествата на температурното поле в обема на нагриваното тяло или стопилка;
 - при правилно определяне на средните температури, с които се изчисляват топлинните характеристики на елементите може да се постигне достатъчна за практиката точност за установения режим на работа.
- Програмна среда SolidWorks Simulation осигурява решение на топлинната задача с достатъчна точност с възможност за оценка на топлинното поле във всяка точка от конструкцията и обекта;
- Получените грешки определят насоките за работа при отчитане на проблемите и факторите, влияещи в процеса на изработка и експлоатация на пещта:
 - Технологични проблеми:
 - При изпълнение на изолацията са възможни случайно получени по-слабо уплътнени участъци, в които възникват повишени загуби;
 - Капакът винаги създава условия за конвективен топлообмен, поради невъзможността да се изолира напълно;
 - Случайни фактори:
 - въздушни течения в помещението;
 - смяна местоположението на опитния образец;
 - възможност за изместване на термопреобразувателя;
 - изменения във влажността и температурата на околната среда и др.
- Разпределението на температурата в стъклomasата е неравномерно при равномерно разпределен нагревател, поради което при проектиране на нова пещ се изисква специално конструиране на нагревателя и разпределение на мощността;
- Оценката за точността на работа с програмата определя възможността за бързо решаване на задачи за конструиране и получаване характеристиките на малки електросъпротивителни пещи за производство на стъкло.

Глава 5 МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА МАЛОГАБАРИТНА ЕЛЕКТРОСЪПРОТИВИТЕЛНА ПЕЩ ЗА ТОПЕНЕ НА СТЬКЛО

5.1. Въведение.

Проектирането на електросъпротивителна пещ за топене на стъкло, поради особеностите на материалите се различава по някои елементи в методиката и последователността на отделните етапи. Възможността за използване на същото устройство за темпериране на стъклени изделия определя допълнителни изисквания към конструкцията и управлението на процесите. Независимо от приложението, най-тежките условия на работа са при топене на стъкло – получаването му изисква определен температурен режим, поради което предлаганата методика е разработена за този случай.

Методиката обхваща следните етапи:

- Задание;
- Предварително конструктивно оформяне и геометрично проектиране;
- Материален баланс на стъклото;
- Топлинен баланс и инсталирана мощност;
- Електрическо проектиране;
- Проверовъчни пресмятания;
- Корекции на геометричните размери и разпределението на мощността на нагревателния елемент.

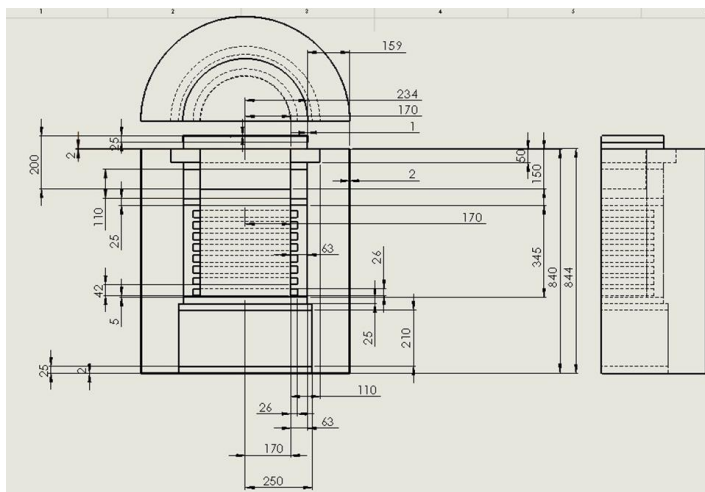
5.2. Задание.

- Изходни суровини за получаване на стъклото: трошки; шихта и трошки;
- Вид на стъклото, например: натриево-калиево; кристално;
- Количество стъкломаса или производителност на пещта;
- Режим на работа: периодичен – от студено състояние; периодичен – повторно-кратковременен.

5.3. Геометрично проектиране на пещта.

Геометричното проектиране се основава на изискваното по задание количество стъкло и специфичната геометрия на пещта (фиг. 5.2), която се определя на базата на фирмена литература за размерите и характеристиките на основния елемент – тигела. Основната част от произвежданите тигли са с цилиндрична форма с близки или приблизително равни диаметър и височина и се получава характерна с размерите си цилиндрична пещ. Нейната геометрия се различава от тази на класическа шахтова пещ, поради което пред оразмеряването на топлинната изолация и нагревателния елемент се поставят допълнителни изисквания:

- Топлинната изолация на дъното на пещта трябва да бъде механично усилена в ограничена област (около дъното на тигела);
- Електрическият нагревател трябва да бъде много точно разпределен поради относително малката височина на работното пространство (определя се от тигела);
- Поради високите изисквания към експлоатацията на тигела и високата цена се изисква точно регулиране на топлинния режим;
- Поради достигане на граничните стойности на топлинния режим на нагревателния елемент се изисква широчинно-импулсна модулация на управляващото устройство и следователно безконтактен комутиращ елемент.



фиг. 5.2 Геометрия на цилиндрична стъклотопилна пещ (изгледи: фронтален, отдясно и отгоре)

Размерите на работното пространство се приемат: диаметър 20-40 mm по-голям от външния диаметър на тигела, за да се осигури поставяне и изваждане; и височина, определена от условията за формване на течната стъкломаса.

Съобразно номенклатурата от изолационни материали се извършва предварителното конструктивно оформяне и геометрично проектиране на пещта (фиг.5.2). Вертикалните стени на работното пространство на пещта се оформят от цилиндрична топлинна изолация (обикновено тухли с канали), с поставен в тях нагревателен елемент. Броят на каналите, респ. броят секции на нагревателя се приема на база конструктивните размери на избрания носещ елемент.

Препоръчителен избор на топлинна изолация по височина на съоръжението, съгласувана с номенклатурата на фирмите-производители е: огнеупорни тухли в основата и отвора на работното пространство и обемно уячени влакнести топлоизолационни плочи, положени под и над огнеупорните тухли. Между цилиндричния метален корпус и дъното, стените и отвора на работното пространство на пещта се полага влакнеста високотемпературна изолация.

5.4. Материален баланс на стъклото.

Количественият състав на материалите, необходими за получаването на зададения вид и количество стъкло се определя според методиката, представена във втора глава. Препоръчително е определянето на количествата материали с минимални концентрации да се провери допълнително със съответната програма за минимизиране на грешката. Определя се енергията, необходима за нагриване на стъклотомасата: $Q_i = m_i c_i \Delta t$.

5.5. Топлинен баланс на пещта.

- Топлинни съпротивления и топлинни капацитети;

В съответствие с разположението на изолационните слоеве, вида и характеристиките на материалите се изчислява големината на топлинните съпротивления и топлинните капацитети на всеки елемент.

- Топлинни потоци през изолационните слоеве;

Приетата работна температура и тази на околната среда определят загубите, респективно температурите на всеки слой, които се използват в топлинния баланс.

- Акумулирана енергия и мощност в топлинната изолация;

Акумулираната енергия са изчислява със стойностите на топлинните капацитети. В периода на разгриване на пещта, независимо от режима, се определя еквивалентната мощност на източника, необходима за нагриване на пещните елементи и топлината изолация. В зависимост от режима на работа тяхната големина определя енергийните характеристики на пещта.

- Мощности на източниците.

На база материалния баланс за получаване на определено количество стъклотомаса по съответна технология и производителност на пещта се извършва пълен топлинен баланс. Изчисляват се енергиите и мощностите за целия процес на стъклотопене. Резултатите се сумират с резултатите за топлинните потоци в изолационните слоеве и акумулираната мощност в топлинната изолация, като допълнително се приема най-тежкият режим на работа – отворен капак и съответстващите на това загуби. Полученият резултат се умножава с коефициент на запас $K_{\text{зап}} = 1,2$ и се получава инсталираната мощност на пещта.

5.6. Електрическо проектиране.

Предварително конструктивно решение за вида и разположението на нагревателния елемент.

В съответствие с работната температура винаги се избира съпротивителен проводник тип Kanthal A1 с работна температура 1370°C. Поради вида на

конструкцията се приема, че нагревателният елемент ще бъде с формата на винтова линия, разположен около тигела.

Електрическо оразмеряване на нагревателния елемент.

В зависимост от изискванията на потребителя се приема големината на захранващото напрежение. Поради това е правилно изчислението на нагревателния елемент да се проведе с няколко стойности, за да се изберат подходящи в конструктивно отношение размери. Независимо от получената големина на напрежението, включването към захранващата мрежа се извършва през съгласуващ трансформатор, който едновременно изпълнява функциите на разделителен трансформатор.

Оразмеряването на проводника се извършва по методика в съответствие с изискванията на фирмата-производител. Препоръчителните стойности на специфичното повърхностно топлинно натоварване са определени в каталога на фирмата, като в случая те не трябва да превишават $w = 2-2.2 \text{ W/cm}^2$ за нагревателни елементи в канали и температура на топлоприемащата повърхност 1300°C . Резултатите трябва да отговарят на изискване за големина на стъпката на навиване $s \geq 2$.

5.7. Етапи на проверка на елементите на пещта.

Проверката се извършва с цел анализ на конструкцията по методите и със средствата, използвани при теоретичните изследвания на работа на пещта:

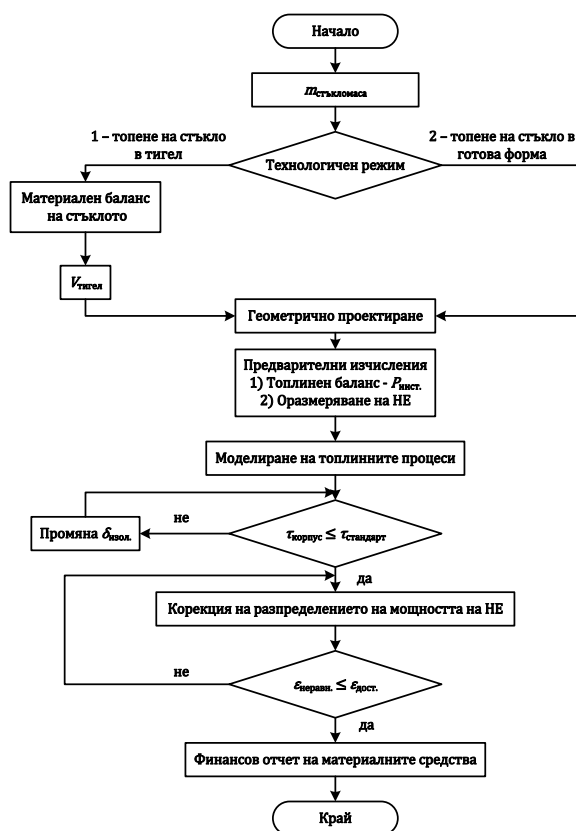
- Моделиране и анализ на топлинните процеси;
- Проверка разпределението на температурите при равномерно разпределена мощност;
- Корекция на разпределението на нагревателя за получаване на топлинно поле със зададена степен на неравномерност.

5.8 Блок-схема на програмата за работа при проектиране на пещта.

Отделните елементи на изследването и проектирането са обединени в обща система, включваща етапите на проверка чрез моделиране. Моделирането е определящо за окончателното геометрично оформяне на пещта. В обобщен вид процедурата на проектиране на съпротивителна стъклотопилна електропещ е представена на фиг. 5.3. Степента на неравномерност на температурното поле се изчислява по зависимостта (5.2), представена в трета глава.

$$\epsilon_{\text{неравн.}} = \left| \frac{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{ср.}}}{\tau_{\text{ср.}}} \right| \cdot 100\% \quad (5.1)$$

$$\text{където: } \tau_{\text{ср.}} = \frac{\tau_{\text{max}} + \tau_{\text{min}}}{2}$$



фиг. 5.3 Алгоритъм за проектиране на съпротивителна електропещ за топене на художествено стъкло

В съответствие с технологичния режим или в съответствие с изискванията на потребителя се избира допустима стойност $\varepsilon_{\text{дост.}}$. Получената при изчисленията стойност на степента на неравномерност трябва да бъде по-малка или равна на зададената.

5.9 Изводи от пета глава.

Предлаганата методика за проектиране дава възможност:

- В началните етапи на проектиране да се определи с достатъчна точност количествения състав на материалите за получаване на определено количество стъкломаса;
- Тук се използват резултатите от програмни продукти за моделиране на топлинни процеси с оценка на влиянието на товара и разпределението на мощността на нагревателния елемент;
- Чрез итерационни изчисления е възможно достигането на подходящо разпределение на мощността на нагревателния елемент за получаване на температурно поле с допустима степен на неравномерност.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертацията се отнася до разработване на електротехнологичен проблем: създаване на малка стъклотопилна пещ за получаване на висококачествено стъкло. При това са решени следните задачи:

- Разработена е методика за комплексно проектиране на пещта, която включва:
 - програма за получаване количествен състав на изходните суровини при зададен състав на стъкломасата;
 - програма за определяне на електрическите характеристики и механичното изпълнение на нагревателните елементи;
- Разработена е методика за анализ на процесите при стопяване на стъкломасата;
- Извършен е анализ на електротермичните процеси и специфичните условия на работа на пещта чрез адаптиране на програмни продукти към съответната конструкция;
- Доказана е приложимостта на използваните аналитични методи чрез съпоставка с експериментални резултати от опитни образци;
- Анализирани са проблемите, свързани с технологични фактори и конкретно необходимостта от точно изпълнение на топлинната изолация за правилно разпределение на температурата по повърхността на кожуха.

В заключение въз основа на анализа са направени следните основни изводи:

- Методиката за определяне състава на суровините е приложима за електрически стъклотопилни пещи и е възможно използването ѝ от производители на стъклени изделия;
- Проведените теоретични изследвания показват чрез картината на разпределение на топлинното поле в обема на работното пространство на пещта без и с товар, че е необходимо неравномерно разпределение на мощността на нагревателния елемент. По този начин се получава температурно поле със зададена степен на неравномерност;
- Като електротехнологично устройство пещта е система с променящи се в широк диапазон параметри, поради което трябва да се използват само числени методи за анализ;

- При проектирането са необходими различен брой итерации за определяне големината и разпределението на мощността, след което трябва да се извърши механичното оформяне на нагревателния елемент. В зависимост от изискванията това трябва да се извършва по различен начин.

ПРИНОСИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

- Разработен е тримерен теоретичен модел за анализ на стационарни и нестационарни топлинни процеси в съпротивителна стъклотопилна електропещ на базата на тримерна топлинна заместваща схема със съсредоточени параметри, отчитаща особеностите на устройството: форма и размери на пещта; мощност на нагревателния елемент; брой и размери на слоевете топлинна изолация; механични и топлофизични свойства на материалите; условия на топлопренасяне;

- Създадена е програма в програмна среда MATLAB, симулираща процесите на разгриване на пещта, която използва разработения на базата на заместващи схеми тримерен математичен модел на топлинните процеси. Програмата е използвана за изследване на стационарни и преходни процеси на базата на симулираното с нейна помощ топлинно разпределение в изследваните обекти;

- Разработен е тримерен симулационен модел на топлинните стационарни и нестационарни процеси в стъклотопилна електропещ при използване на метода с крайни елементи в софтуерния продукт SolidWorks Simulation. Тримерният крайно-елементен модел позволява прецизно отчитане на реалната геометрия на отделните конструктивни детайли на пещта, разпределението и особеностите на нагревателните елементи, сложната форма и особеностите на гипсовата матрица, както и нелинейните характеристики на отделните материали;

- На базата на 3D моделиране с крайни елементи са симулирани и детайлно изследвани топлинните процеси на нагриване и охлаждане с различна продължителност и скорост, съответстващи на проведените експериментални изследвания на опитните образци;

- Направен е обстоен сравнителен анализ на резултатите от експерименталните изследвания и численото моделиране на стационарните и нестационарните топлинни процеси в изследваните устройства и като резултат е получено следното:

- доказана е възможността за приложение на теоретичния анализ, проведен по класически методики и чрез числени методи за получаване вида на температурното поле (в случая силно неравномерно);

- определена е областта на приложение на отделните методи: системите обикновени диференциални уравнения са за предварителни изчисления, а програмната среда SolidWorks Simulation осигурява решение на топлинната задача с достатъчна точност и възможност за оценка на топлинното поле;

- определени са причините за получаване на различни температури на някои части от околните стени на опитния образец на пещта – резултат от технологията на изработване – тя трябва да осигури еднаква степен на уплътняване на керамичната вата.

Приложни приноси:

- Разработена е програма, която на база съществуващи зависимости за изчисляване на изходните суровини предлага решение за получаване на стъклочна маса с определен състав. Програмата се използва за вариантно изчисляване на различни състави на шихтата като се препоръчва и съответен метод за решаване на системата уравнения;

- Разработени са и са изследвани експериментално три различни конструктивни варианта на опитни образци на пещ за обработка на малки количества стъкло. Експерименталните изследвания са проведени за работни режими: празен ход, топене на стъкло в тигел и топене и обработка на стъкло в специална гипсова форма;

- Предложена е комплексна методика за проектиране на съпротивителна електропещ за топене стъкло, която обединява всички елементи на проекта и осигурява чрез итерационни изчисления изискваните условия на работа – подходящо разпределение на мощността на нагревателния елемент за получаване на температурно поле с допустима степен на неравномерност.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Н. Цветкова**, Хр. Тахрилов. Сравнителен анализ на стационарните процеси в съпротивителна електропещ за топене на стъкло. Международна научно-техническа конференция ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, 14-16 Октомври 2010 Варна, България. Технически университет – Варна, Електротехнически факултет. с. 347-354. ISBN 978-954-20-0497-4.
2. **Н. Цветкова**, Хр. Тахрилов. Анализ на преходните процеси в тиглова съпротивителна електропещ за топене на стъкло. Thirteenth International Conference of Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2011, 21-22 October 2011, Varna, Bulgaria. pp. 148-151. ISSN 1313-4965.
3. **N. Tsvetkova**, Hr. Tahrilov. About power density distribution in a small electric resistance glass melting furnace. XVII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2012, Vol. 1. 28-30 May 2012, Bourgas, Bulgaria. pp. 322-327. ISSN 1314-6297.
4. **Н. Цветкова**, Хр. Тахрилов. Анализ на топлинните процеси в тиглова съпротивителна електропещ за топене на художествено стъкло. Third International Scientific Congress – 50 Anniversary Technical University of Varna, Vol. 3, 04-06 October 2012, Varna, Bulgaria. pp. 136-139. ISBN 978-954-20-0552-0.
5. **N. Tsvetkova**. Some Problems in the Heat Treatment of Glassware in Resistive Electric Furnaces. Proceedings of the XIV-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA'2015, pp. 249-252. ISSN 1313-4965, Technical University-Varna 2015. <http://www.vtp-tuv.com/elma/>
6. **Nadezhda Tsvetkova**, Piona Iatcheva, Hristofor Tahrilov, Maik Streblau. Study of the relationship between the distribution of the power and temperatures in a small resistive art glass melting furnace. XIX-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2016, Proceedings, 29 May – 1 June 2016, Bourgas, Bulgaria. ISBN 978-1-4673-9521-2, IEEE Catalog Number CFP1628Z-PRT pp. 346-349.
7. Тахрилов, Христофор П.; **Цветкова Надежда Д.**; Цветков Димитър В.; Апрахамян, Бохос Р. „Електрическа съпротивителна пещ за топене и термообработка на стъкло“, Свидетелство за регистрация на полезен модел № 2235 / 31.05.2016 г., Официален бюлетин (официално месечно издание на Патентното ведомство, София, 2016 г.), бр. 5, 31.05.2016, с. 46.
Притежател: Технически университет – Варна, 9010 Варна, ул. “Студентска“ 1.

Благодарности

Изказвам благодарност на доц. д-р инж. Христофор Тахрилов и на проф. д-р инж. Илона Ячева за огромната помощ по осъществяването на дисертационния труд, на колегите от катедра „Електротехника и Електротехнологии“ към Технически Университет – Варна и всички оказали ми помощ и подкрепа в работата. Специална благодарност на баща ми инж. Димитър Цветков за консултациите по технологията на стъклото.

КОРОТКОЕ ОПИСАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

для присуждения образовательной и ученой степени „доктор”

Тема: РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТЕКЛА

маг. инж. Надежда Димитрова Цветкова

Предмет диссертации является малогабаритная электрическая печь для двух технологических режимов получения стекла – плавильный тигель или в сборном виде с возможностью термической обработки готового продукта.

Целью диссертации является реализация и исследование малогабаритной электропечи сопротивления для плавки стекла с достаточной степенью неравномерности температурного поля.

Первая глава посвящена технологии для производства стекла и рассмотрению типов газовых и электрических печей для плавления стекла.

Во второй главе описаны экспериментальные исследования образцов малогабаритной электрической печи сопротивления для обеих технологических режимов плавления стекла.

В третьей главе разработаны теоретические модели для термического анализа печи. Исследовано распределение температурного поля в стекле для двух вариантов – равномерное и неравномерное распределение плотности мощности нагревающего элемента.

В четвертой главе доказана адекватность разработанных программных моделей на основе сравнительного анализа и оценки результатов, полученных теоретическим и экспериментальным путем.

В пятой главе предложена методика проектирования малогабаритной электрической плавильной печи сопротивления для обработки небольших количеств высококачественного стекла.

ABSTRACT

Of PhD Thesis

Subject: DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SPECIAL RESISTANT ELECTRIC
FURNACES FOR GLASS TREATMENT

By Nadezhda Dimitrova Tsvetkova

Subject of the dissertation is a small-scale resistance electric furnace for two technological regimes of glass melting – melting pot or in prefabricated form with the possibility of heat treatment of the finished product.

The aim is to obtain such a furnace at a predetermined uniformity of distribution of the temperature field in the workspace.

The first chapter presents glass production technology and types of gas and electric glass melting furnaces.

The second chapter describes experimental studies of specimens of small-scale electric resistance furnace in both technological regimes of glass melting.

In the third chapter theoretical models for thermal analysis of the furnace (steady state and transient) are developed. The temperature field distribution in the glass is investigated for uniform and unequal power density of the heating element.

In the fourth chapter, the adequacy of the developed programming models is proven through comparative analysis and evaluation of the theoretical and experimental results.

In the fifth chapter, a methodology for designing small-scale resistance electric furnace for melting of small amounts of high-quality glass is proposed.