

1562348

На правах рукописи

КАЛИНИН Дмитрий Юрьевич  
**МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОЙ  
ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛА**

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Калинин*

Москва 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Сгибнев Анатолий Васильевич

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор  
Назаров Юрий Федорович

д.т.н., профессор  
Солнцев Станислав Сергеевич

Ведущая организация: ОАО «Государственный институт стекла»,  
г. Москва

Защита диссертации состоится «22» февраля 1999 г. в 14<sup>30</sup> часов  
на заседании диссертационного совета К 053.15.09 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

ного Совета и прислать пись-  
мачью, в двух экземплярах по

в библиотеке МГТУ им.

1562348



Сгибнев А.В.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

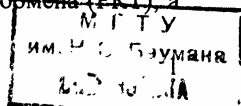
Актуальность проблемы. Благодаря уникальному комплексу свойств, изделия из стекла широко применяются в аэрокосмической технике, приборостроении, машиностроении, строительстве, медицине. Несмотря на древнюю историю, в производстве изделий из стекла остается множество проблем, типичных для всех современных производств: качество изделий, экономия энергоресурсов, экологические показатели и производительность.

Пути решения указанных проблем открывают, по мнению автора, термические технологии, объединяющие новые физические принципы обработки, конструкционные материалы и источники сырья. Дело в том, тепловая обработка является неотъемлемой частью любого технологического процесса производства изделий из стекла и оказывает большое, зачастую определяющее влияние на качество готовой продукции.

В последние годы начато освоение технологий отжига, обжига, полировки, закалки, спекания изделий из стекла потоками теплового излучения. Их отличают: лучшее качество изделий за счет повышения равномерности нагрева и охлаждения; снижение потерь энергии за счет сокращения потерь теплоносителя; улучшение экологических показателей производства за счет отказа от использования токсичных компонентов; увеличение производительности оборудования из-за интенсификации процессов переноса тепловой энергии в материале. Однако, имеющимися у отечественных конструкторов средствами проектирования использовать эти преимущества в полной мере не удастся. Так, как до сих пор в освоении технологий преобладают интуитивно-эмпирические приемы, а расчетное обеспечение режимов термообработки сводится к приближенным методикам. Данные методики оперируют с такими понятиями как среднemasовая температура изделий и тепловой баланс и не учитывают объемный нагрев изделий, пространственную неоднородность температурных полей, нелинейность физических свойств материалов. Кроме того, тепловые, физикохимические и структурные явления в стекле рассматриваются разобщенно. Все это приводит к низкой точности проектирования, а возникающие расхождения расчетных и реальных характеристик изделия не имеют строгих научных объяснений.

Разнообразие и новизна технологических процессов тепловой обработки порождают ряд новых проектных задач, таких как выбор мощности, схемы размещения и спектральных характеристик излучателей, определение закона перемещения изделий относительно поля излучения, которые не поддержаны пока общепризнанными методиками решения.

В силу избирательного характера поглощения стеклом теплового излучения обоснование технологических режимов требует разработки математического и программного обеспечения, основанного на моделях комбинированного, так называемого радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ), а



необходимость учета нелинейных тепловых процессов и структурных превращений – современных численных методов решения уравнений математической физики. Оптимизация режимов обработки и параметров оборудования невозможна без алгоритмов решения некорректных обратных задач (ОЗ).

В последние годы обострилась проблема утилизации отходов стекла. Промышленное освоение технологий переработки стеклобоя в высококачественные изделия также связано с проектированием нового оборудования и выбором рациональных режимов тепловой обработки.

Таким образом, на данном этапе разработка средств, включающих методы, модели, алгоритмы и программы и предназначенных для проектирования технологических процессов обработки изделий из стекла источниками теплового излучения, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Тема диссертации отвечает п.2.6.1 Комплексной программы фундаментальных исследований проблем машиностроения, механики и процессов управления, утвержденной РАН на 1995–1999 гг., где значатся вопросы создания методологии проектирования новых технологических установок для термообработки стеклянных изделий и внедрения новых технологических процессов в заводскую практику. Тема диссертации была связана с выполнением плана НИР и ОКР Миннауки России на 1998 г. по направлению «Производственные технологии» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения», проект № 03 04 04 003 П «Разработка технологии переработки промышленных и бытовых отходов стекла в экологически чистые строительные материалы», с реализацией проекта № 02.0015 «Перспективные технологии переработки отходов стекла» Межвузовской научно-технической программы Н.Т.485 «Эффективные технологии утилизации, обезвреживания и захоронения отходов» Минобразования России на 1998–2000 гг. Вопросы, рассмотренные в диссертации, были включены в планы НИР, проведенных в НИИ специального машиностроения (НИИ СМ) МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995–1998 гг., что нашло отражение в шести отчетах.

Цель работы: разработка методических средств проектирования технологических процессов обработки изделий из стекла источниками теплового излучения, способствующих повышению качества изделий из стекла, сокращению временных и материальных затрат на проектирование, увеличению производительности и экономичности оборудования, сокращению вредного воздействия на окружающую среду.

#### Основные задачи:

1. Проанализировать и выбрать перспективные направления совершенствования технологических процессов обработки изделий из стекла источниками теплового излучения.

2. Разработать методические средства проектирования новых технологических процессов тепловой обработки, основанные на решении прямых и обратных задач комбинированного теплообмена.

3. Теоретическими и экспериментальными методами восполнить недостающие для математического моделирования сведения о физических свойствах обрабатываемых материалов.

4. Обосновать рациональные режимы обработки и параметры технологического оборудования для инфракрасного (ИК) отжига стеклянных изделий, производства стеклокремнезитовых плит методом спекания, термической полировки рельефных поверхностей.

При выборе и разработке методов проведения исследований автор опирался на передовые достижения в области моделирования процессов комбинированного теплообмена, физикохимии стекла, методологии решения ОЗ, достигнутых в научных коллективах МГТУ им. Н.Э. Баумана, РХТУ им. Д.И. Менделеева, МАИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИ стекла, ОИВТ РАН, ИХС им. И.В. Гребенщикова, ГИС, ГОИ, ОНПП «Технология».

Научная новизна диссертации заключается в том, что впервые при проектировании технологических процессов обработки изделий из стекла источниками теплового излучения применены математико-алгоритмические средства, основанные на феноменологических моделях физических явлений и методологии ОЗ. В частности, принципиальной новизной обладают:

- математическая модель РКТ в слое спекающихся стеклянных частиц, учитывающая комбинированный характер переноса энергии, объемный характер поглощения и рассеяния излучения, кинетику процессов спекания и кристаллизации, изменение физических свойств материала в процессе его синтеза;
- универсальный алгоритм решения некорректных граничных ОЗ РКТ, учитывающий спектральные характеристики нагревателей и изделий и пригодный для определения динамичных режимов тепловой обработки;
- результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований температурных зависимостей теплопроводности и теплоемкости, спектральных зависимостей коэффициента отражения и степени черноты стеклокристаллического материала (СКМ) в условиях изменения его пористости;
- рациональные режимы ИК отжига стеклянных изделий, производства стеклокремнезитовых плит методом спекания, термической полировки рельефных поверхностей;
- выводы о влиянии спектральных характеристик нагревателей на режимы тепловой обработки изделий из стекла.

На защиту выносятся:

1. Методические средства проектирования технологических процессов обработки изделий из стекла источниками теплового излучения.

2. Математическая модель комбинированного теплообмена в слое спе-

кающихся стеклянных частиц.

3. Универсальный алгоритм решения некорректных граничных ОЗ РКТ.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований тепловых физических и оптических свойств СКМ.

5. Рациональные режимы обработки и параметры оборудования для технологий ИК отжига стеклянных изделий, производства стеклокремнезитовых плит методом спекания, термической полировки рельефных поверхностей.

Практическую ценность диссертационной работы представляют:

- методические средства проектирования технологических процессов обработки изделий из стекла источниками теплового излучения, объединяющие модели, алгоритмы и программы решения прямых и обратных задач РКТ, пригодные для моделирования температурного состояния изделий из стекла и определения режимов их обработки и параметров оборудования;
- данные о температурных зависимостях теплопроводности и теплоемкости, спектральных зависимостях коэффициента отражения и степени черноты поверхности СКМ для различных значений пористости;
- выводы и рекомендации, относящиеся к выбору режимов обработки и параметров оборудования для ИК отжига стеклянных изделий, производства стеклокремнезитовых плит методом спекания, термической полировки рельефных поверхностей;
- указанные результаты использованы в НИОКР НИИ Стекла (г. Гусь-Хрустальный Владимирской обл.), НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОАО «Ситалл» (г. Рославль Смоленской обл.), что отражено в соответствующих актах о внедрении.

Достоверность результатов исследования подтверждается данными численных и физических экспериментов, а также сопоставлением с результатами расчетов и экспериментов других авторов.

Личный вклад автора состоит в разработке моделей и алгоритмов, проведении расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, обработке, анализе и обобщении полученных результатов. Все основные результаты и выводы получены лично автором.

Апробация основных результатов диссертации проводилась на международных и российских научных конференциях «Обратные и некорректно поставленные задачи» (Москва, 1995), 3-м Минском международном форуме по тепломассообмену (1996), «Обратные задачи в технике: теория и практика» (Ле Круази, Франция, 1996), международном симпозиуме «Передовые термические технологии и материалы» (п. Кацивели, Крым, Украина, 1997), «Идентификация динамических систем и обратные задачи» (Москва–Санкт-Петербург, 1998), 2-й Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1998), «Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена» (Москва, 1998), на научных семинарах в

МГТУ им. Н.Э. Баумана.

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, которые отражают основное содержание диссертации и приведены в библиографическом списке.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 97 страниц текста, 55 рисунков, 18 таблиц. Список литературы включает 133 работы.

Автор выражает глубокую признательность доктору технических наук, профессору Резнику Сергею Васильевичу, при поддержке которого осуществлен замысел настоящей работы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, кратко сообщается о новизне и практической значимости полученных в ней результатов для производства изделий из стекла.

В первой главе обсуждаются направления совершенствования технологических процессов тепловой обработки изделий из стекла.

Формирующиеся в процессе тепловой обработки изделий из стекла температурные поля предопределяют их напряженно-деформированное состояние, макро и микроструктуру, а, следовательно, потребительские свойства продукции. Несмотря на разнообразные цели обработки соответствующее оборудование отличается, главным образом, способом передачи тепла от нагревателя к изделию. В работе подробно обсуждены преимущества и недостатки основных способов нагрева изделий из стекла: конвективного и радиационного. *Конвективный способ* нагрева изделий давно и наиболее широко распространен в стекольной промышленности. Однако, энергетический КПД установок, реализующих такой способ, низок и не превышает 10 %. В виду малой температуропроводности стекла при конвективном способе нагрева приходится поддерживать малые скорости нагрева и охлаждения, жестко контролировать движение потоков горячего газа, что усложняет оборудование, увеличивает его габариты и приводит к большой длительности обработки.

В последние годы получили развитие новые технологии на основе радиационного способа нагрева. В качестве нагревателей в этом способе выступают, как правило, электрические источники теплового излучения. Частичная прозрачность стекла для теплового излучения внешних источников и собственного дает уникальную возможность, комбинируя поглощение энергии *на поверхности и в объеме* изделия, добиться распределения температуры, соответствующего задачам тепловой обработки. Перенос энергии в стекле осуществляется теплопроводностью и излучением, т.е. реализуется РКТ. Стандартные методики расчета режимов обработки стекла РКТ не учитывают. Разработка новых методик для нагрева изделий тепловым излучением не завершена.

С позиций феноменологического подхода модели РКТ представляют собой системы уравнений энергии и переноса излучения. Близость математического описания процессов РКТ в различных видах тепловой обработки изделий из стекла создает предпосылки для разработки универсальных методических средств проектирования. Большой вклад в изучение процессов РКТ внесли Р. Висканта, Р. Гардон, Н.А. Рубцов, М. Оцисик, В.А. Петров, О.А. Сергеев, В.Н. Елисеев и другие ученые. Прикладные задачи РКТ исследовались в работах В.Д. Голышева, В.И. Дешко, А.А. Меня, О.В. Мазурина, Н.В. Марченко, С.В. Степанова, Р.З. Фридкина, В.Д. Чельцовой, И.П. Шахматовой. Однако, кинетические процессы усадки и объемной кристаллизации, характерные для спекания СКМ, в них не рассматривались. Несмотря на то, что модели РКТ обладают высокой точностью и позволяют исследовать температурное состояние изделий из стекла в широком диапазоне температур, круг их практического использования в проектно-конструкторских организациях стекольной промышленности пока узок.

Применение математического моделирования на этапе проектирования еще не означает создания оптимальных технологий. Выход видится в использовании методологии ОЗ. Основы теории ОЗ были заложены отечественными математиками А.Н. Тихоновым, В.К. Ивановым, М.М. Лаврентьевым. До недавнего времени методология ОЗ оставалась невостребованной в области тепловой обработки изделий из стекла.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей РКТ, характерных для изделий из стекла.

Математическая модель РКТ в изделии из монолитного стекла представлена системой уравнений (рис.1):

**уравнение энергии**

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_v; \quad (1)$$

$$\tau=0 \quad T = T_0(x); \quad (2)$$

$$x=0 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \int_{\Lambda_0} \varepsilon_{ef1,\Lambda} (q_{w1,\Lambda} + B_{M1,\Lambda} - B_{w1,\Lambda}) d\Lambda - \alpha_{f1} (T_{w1} - T_{f1}); \quad (3)$$

$$x=L \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \int_{\Lambda_0} \varepsilon_{ef2,\Lambda} (B_{M2,\Lambda} - B_{w2,\Lambda}) d\Lambda - \alpha_{f2} (T_{w2} - T_{f2}); \quad (4)$$

**уравнение переноса излучения**

$$\pm \mu \frac{dI_{\Lambda}^{\pm}}{dx} = -k_{\Lambda} I_{\Lambda}^{\pm} + k_{\Lambda} n_{\Lambda}^2 I_{p,\Lambda}; \quad (5)$$

$$x=0 \quad I_{\Lambda}^{+} = r_{ef1,\Lambda} I_{\Lambda}^{-} + n_{\Lambda}^2 (1 - r_{ef1,\Lambda}) (q_{w1,\Lambda} / \pi + I_{p,M1,\Lambda}); \quad (6)$$

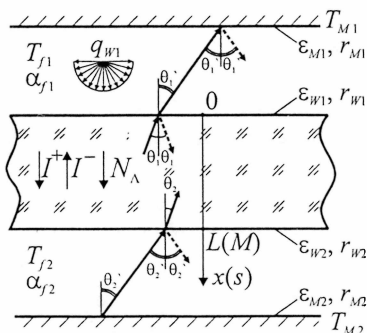


Рис.1. К описанию моделей РКТ



$$x=L$$

$$I_{\Lambda}^{-} = r_{ef2,\Lambda} I_{\Lambda}^{+} + n_{\Lambda}^2 (1 - r_{ef2,\Lambda}) I_{p,M2,\Lambda}; \quad (7)$$

**уравнение дивергенции потока излучения**

$$q_V = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{\Lambda_S} q_{R,\Lambda} d\Lambda = -2\pi \frac{\partial}{\partial x} \int_{\Lambda_S-1}^1 (I_{\Lambda}^{+} - I_{\Lambda}^{-}) \mu d\mu d\Lambda, \quad (8)$$

где:  $T$  – температура;  $\tau \in [0, \tau_K]$  – время;  $\tau_K$  – продолжительность нагрева;  $x \in [0, L]$  – пространственная координата;  $L$  – толщина изделия;  $C$  – объемная теплоемкость;  $\lambda$  – молекулярная теплопроводность;  $q_V$  – объемная мощность внутренних источников тепла;  $q_{W1}$  – плотность падающего потока излучения;  $\varepsilon$  – степень черноты;  $B$  – функция Планка;  $\alpha_f$  – коэффициент теплоотдачи;  $\Lambda$  – длина волны излучения в вакууме;  $I^{+(-)}$  – интенсивность излучения вперед/назад;  $\mu = |\cos \theta|$ , где  $\theta$  – угол между лучом и положительным направлением оси  $x$ ;  $I_p$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела в вакууме;  $k$  – коэффициент поглощения излучения;  $n$  – показатель преломления;  $q_R$  – плотность потока излучения;  $r$  – коэффициент отражения; индексы отнесения: 0 – к начальному моменту времени;  $ef1(2)$  – эффективные характеристики (с учетом многократного отражения в системе стекло–экран);  $f1(2)$  – к газу окружающей среды;  $M1(2)$  – к непрозрачным экранам;  $S$ ,  $O$  – к области частичной прозрачности или непрозрачности материала;  $W1(2)$  – к поверхностям слоя.

Перспективным способом формирования градиентной структуры изделий из СКМ является способ спекания стеклянных частиц под действием потоков теплового излучения. Формирование такой структуры сопровождается объединением частиц, усадкой материала и увеличением в нем объемной доли кристаллов. Модель РКТ в слое спекающихся стеклянных частиц, предлагаемая в работе, состоит из системы, включающей (рис.1):

**уравнение энергии**

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial s} \left( \lambda \rho \frac{\partial T}{\partial s} \right) + q_V; \quad (9)$$

$$\tau = 0 \quad T = T_0(s); \quad (10)$$

$$s = 0 \quad -\lambda \rho \frac{\partial T}{\partial s} = \int_{\Lambda_0} \varepsilon_{ef1,\Lambda} (q_{W1,\Lambda} + B_{M1,\Lambda} - B_{W1,\Lambda}) d\Lambda - \alpha_{f1} (T_{W1} - T_{f1}); \quad (11)$$

$$s = M \quad \lambda \rho \frac{\partial T}{\partial s} = \int_{\Lambda_0} \varepsilon_{ef2,\Lambda} (B_{M2,\Lambda} - B_{W2,\Lambda}) d\Lambda - \alpha_{f2} (T_{W2} - T_{f2}); \quad (12)$$

**уравнение диффузии излучения**

$$-\frac{\partial}{\partial s} D_{\Lambda} n_{\Lambda}^2 \rho \frac{\partial N_{\Lambda}}{\partial s} + \frac{k_{\Lambda} n_{\Lambda}^2}{\rho} N_{\Lambda} = \frac{k_{\Lambda} n_{\Lambda}^2}{\rho} B_{\Lambda}; \quad (13)$$

$$s = 0 \quad -D_{\Lambda} \rho n_{\Lambda}^2 \frac{\partial N_{\Lambda}}{\partial s} + \frac{1}{2} \frac{(1 - R_{ef1,\Lambda})}{(1 + R_{ef1,\Lambda})} n_{\Lambda}^2 N_{\Lambda} = 2 \frac{(1 - R_{ef1,\Lambda})}{(1 + R_{ef1,\Lambda})} n_{\Lambda}^2 (q_{w1,\Lambda} + B_{M1,\Lambda}); \quad (14)$$

$$s = M \quad D_{\Lambda} \rho n_{\Lambda}^2 \frac{\partial N_{\Lambda}}{\partial s} + \frac{1}{2} \frac{(1 - R_{ef2,\Lambda})}{(1 + R_{ef2,\Lambda})} n_{\Lambda}^2 N_{\Lambda} = 2 \frac{(1 - R_{ef2,\Lambda})}{(1 + R_{ef2,\Lambda})} n_{\Lambda}^2 B_{M2,\Lambda}; \quad (15)$$

**уравнение дивергенции потока излучения**

$$q_V = \int_{\Lambda_s} \frac{k_{\Lambda} n_{\Lambda}^2}{\rho} (N_{\Lambda} - B_{\Lambda}) d\Lambda; \quad (16)$$

**уравнения кинетики кристаллизации**

гомогенное зародышеобразование

$$X_{KP} = 1 - \exp \left( -g \int_0^{\tau} I \left( \int_{\tau'}^{\tau} U d\tau'' + r_{KP} \right)^3 d\tau' \right); \quad (17)$$

катализируемая кристаллизация

$$X_{KP} = 1 - \exp \left( -g n^* \left( \int_0^{\tau} U d\tau' \right)^3 \right); \quad (18)$$

удельная энтальпия

$$H = \int_0^{\tau} c \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau' - Q_{KP} \int_0^{\tau} \frac{\partial X_{KP}}{\partial \tau} d\tau'; \quad (19)$$

**уравнения кинетики спекания**

$$\Pi = \Pi_0 \exp \left( -\frac{9}{4} \int_0^{\tau} \frac{\sigma d\tau'}{r_p \eta} \right); \quad (20)$$

$$\xi^2 = (r_K/r_p)^2 = 1 - (\Pi/\Pi_0)^{4/3}; \quad (21)$$

**уравнения моделей теплопроводности**

модель Дульнева для структуры с взаимопроникающими компонентами

$$\lambda = \lambda_1 (\bar{L}^2 + \nu(1 - \bar{L})^2 + 2\nu\bar{L}(1 - \bar{L})(\nu\bar{L} + 1 - \bar{L})^{-1}); \quad (22)$$

модель Эйкена-Одеlevского для структуры с изолированными включениями

$$\lambda = \lambda_1 (1 - \Pi/(1 - \nu))^{-1} - (1 - \Pi)/3). \quad (23)$$

В (9)–(23) использованы обозначения, аналогичные (1)–(8), кроме:  $M = \rho_0 \cdot L_0$  – удельная масса слоя;  $s \in [0, M]$  – массовая координата;  $\rho$  – плотность;  $H$  – удельная энтальпия;  $D$  – коэффициент диффузии излучения;  $N$  – приведенная спектральная плотность энергии излучения;  $R$  – полусферический коэффициент отражения;  $g$  – фактор формы растущего кристалла;  $I$  – скорость образования зародышей кристаллизации;  $r_{KP}$  – критический радиус зародыша кристаллизации;  $X_{KP}$  – относительная объемная доля кристаллической фазы;  $n^*$  – число зародышей кристаллизации;  $U$  – линейная скорость роста кристалла;  $c$  – удельная теплоемкость;  $Q_{KP}$  – удельная

теплота экзотермического эффекта кристаллизации;  $P$  – пористость;  $r_p$  – средний радиус частиц;  $\eta$  – коэффициент сдвиговой вязкости материала частиц;  $\sigma$  – удельное поверхностное натяжение;  $\xi$  – относительный линейный размер пятна контакта;  $r_k$  – радиус пятна контакта соседних частиц;  $v = \lambda_2 / \lambda_1$ , где  $\lambda_1, \lambda_2$  – соответственно коэффициенты теплопроводности материала частиц и газа в порах;  $\bar{L}$  – относительный размер элемента каркаса структуры с взаимопроникающими компонентами.

При записи системы (13)–(15) автором использованы результаты работы А.В. Галактионова и С.В. Степанова (Воздействие излучения на сильно распадающиеся керамики // ТВТ.– 1990.– Т. 28, № 1.– С. 124–130). Методики определения зависимостей оптических свойств материала ( $D, n, k$ ) от пористости разработаны В.А. Петровым, С.В. Степановым. При расчете доли кристаллической фазы, образованной путем объемной кристаллизации, в диссертации объединены подходы академика А.Н. Колмогорова, В.Н. Филипович, С.С. Вильковского, что позволяет учесть наличие в СКМ некоторой первоначальной концентрации зародышей, их образование в процессе тепловой обработки. Определение пористости материала основано на феноменологической теории спекания академика В.В. Скорохода. Для описания механизмов кондуктивной передачи тепла в СКМ в работе введены модели теплопроводности для двух состояний: начального (свободная засыпка, частично связанные частицы) и конечного (частично или полностью спеченный материал).

Определение поля температур изделия при заданных условиях однозначности представляет собой прямую задачу для моделей РКТ (1)–(8) или (9)–(23). Численное решение данной задачи осуществлялось в работе с помощью метода конечных разностей. Для уравнений энергии использовались неявные разностные схемы. Решение систем алгебраических уравнений строилось по методу прогонки. Численное интегрирование проводилось по методам Гаусса (для уравнения переноса излучения) и прямоугольников (в остальных случаях). На каждом шаге по времени итерационно уточнялись значения пористости, свойства материала и мощность внутренних источников тепла.

Математическая модель РКТ в слое спекающихся стеклянных частиц обладает принципиальной новизной и позволяет в едином расчетном цикле наряду с температурным состоянием изделия определять изменение пористости и образование кристаллической фазы. Численные алгоритмы решения систем уравнений РКТ реализованы в виде программ для ПЭВМ. Адекватность математических моделей подтверждена удовлетворительным согласием результатов расчетов с результатами численных и физических экспериментов, полученных в диссертации и другими авторами. Разработанные математические модели, численные алгоритмы и программы использованы в НИОКР НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В третьей главе задачи проектирования оборудования для тепловой обработки изделий из стекла рассматриваются в рамках методологии ОЗ.

Разнообразные виды тепловой обработки отличаются, главным образом, температурными полями изделий. В тоже время на их формирование при радиационном способе нагрева сильное влияние оказывает тепловой поток источников излучения. В связи с этим, центральным вопросом проектирования рассматриваемых технологий является определение условий нагрева изделий, отвечающих заданному режиму обработки. Решение такого рода проблем целесообразно строить в рамках методологии ОЗ. Обладая информацией об изменении плотности теплового потока можно перейти к детализации технических характеристик оборудования, в частности, определить мощность отдельных источников излучения, схему их размещения в рабочем пространстве, характеристики отражающих экранов и т.п.

При решении ОЗ в экстремальной постановке решение выбирается из условия минимума функционала невязки расчетных и заданных значений величин. Для минимизации функционала хорошо зарекомендовал себя метод итерационной регуляризации, разработанный профессором О.М. Алифановым и его коллегами из МАИ. В диссертации идеи метода итерационной регуляризации впервые применены в универсальном алгоритме решения граничных ОЗ РКТ. В настоящей работе впервые:

- получено решение нелинейной граничной ОЗ нестационарного РКТ в частично прозрачных поглощающих материалах, в том числе рассеивающих;
- вычисление градиентов функционала невязки заданных и расчетных значений температуры построено с учетом внутренних источников тепла и спектрального распределения падающего теплового потока.

Принципиальная новизна разработанных средств проектирования заключается в возможности строго учета динамических нелинейных тепловых процессов и оптимального выбора внешних воздействий, удовлетворяющих заданным температурным режимам обработки (темпы нагрева/охлаждения, уровни и градиенты температуры), которые в свою очередь определяют необходимые качества изделий, например, остаточные напряжения, градиентную структуру СКМ, глубину оплавленного слоя материала на поверхности.

Достоверность и точность результатов решения ОЗ проверена численным моделированием. Установлено, что точность алгоритма решения граничных ОЗ РКТ находится на уровне погрешности вычислений, которая не превышает 1 %.

В четвертой главе содержатся результаты исследований технологий обработки изделий из стекла источниками теплового излучения с помощью разработанных методических средств.

Перспективный способ *ИК отжига* изделий из стекла, запатентованный группой авторов из НИИ стекла, НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и

ОАО «Ситалл», позволяет добиться существенного уменьшения перепадов температуры по толщине изделия, и, тем самым, значительно сократить время отжига (Патент РФ № 2078063 от 27.04.94. Способ отжига стеклоизделий / В.Е. Тютюник, Е.А. Чугунов, С.В. Резник и др. // Бюллетень изобретений.– 1997.– № 12).

В туннельных печах ИК отжига заданные режимы обработки обеспечиваются размещением источников излучения – галогенных ламп накаливания (ГЛН), вдоль пути следования изделий. На основе программы изменения плотности падающих тепловых потоков (рис.2), полученной с помощью решения ОЗ РКТ, определена схема размещения нагревателей, т.е. их количество в каждой секции установки. Детально исследована динамика перепадов (рис.3) и профилей температуры в процессе обработки. Проанализировано влияние на температурные режимы изделий неопределенности условий конвективного теплообмена и начальной температуры изделий, изменение температуры нагревателей и толщины стенки изделий.

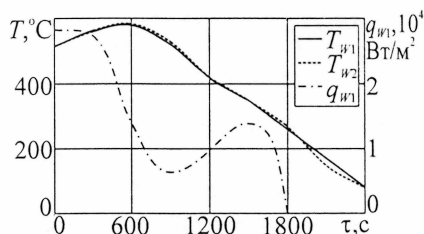


Рис.2. Программа изменения плотности теплового потока при отжиге

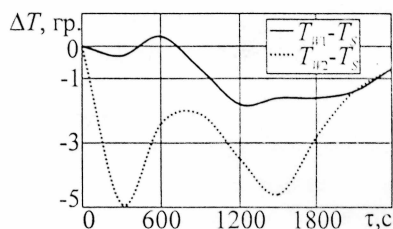


Рис.3. Динамика перепадов температуры при отжиге ( $T_s$  - температура серединной поверхности)

В результате исследований установлено, что:

- При интенсификации конвективного теплообмена в рабочем пространстве для поддержания температуры изделий в заданных пределах необходимо увеличить мощность нагревателей. При прочих равных условиях повышение коэффициента теплоотдачи на 50 % требует увеличения плотности падающих тепловых потоков на 20 %.
- Изменение температуры нити накала ГЛН в пределах от 1730 до 2330°C, связанное с регулированием их мощности, практически не сказывается на уровне и перепадах температуры изделий;
- Варьирование начальной температуры в пределах  $\pm 10\%$  слабо влияет на температурное состояние изделий в интервале отжига.
- Повышение толщины изделий с 2 до 10 мм приводит к возрастанию перепадов и скорости роста температуры. При этом максимальное значение перепада температуры 2,5 град. для толщины 2 мм возрастает до 17 град. для толщины 10 мм.

Математическое моделирование позволило обосновать проектные реше-

ния и режимы технологии ИК отжига изделий из стекла. Результаты переданы в НИИстекла и использованы при создании первой опытно-промышленной технологической установки «УТРО-2», что подтверждено актом о внедрении. Испытание установки, проведенное на стекольном заводе ОАО «Ситалл» под руководством В.Е. Тютюнника, показало, что при уровне остаточных напряжений менее 50 нм/см продолжительность отжига сокращается более чем в 2 раза по сравнению с серийно выпускаемыми печами отжига отечественного и зарубежного производства, а удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных значений температуры свидетельствует об адекватном описании теплового процесса моделью РКТ (1)–(8) (рис.4).

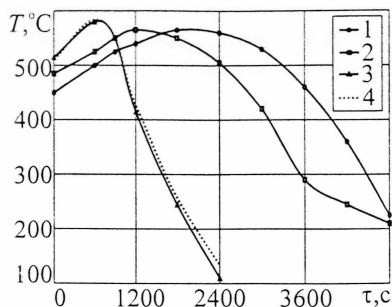


Рис.4. Отжиг на различных технологических установках: 1 - CNOOD (Бельгия); 2 - ПКЭ-324 (Россия); 3 - «УТРО-2», экп. (В.Е. Тютюнник); 4 - тоже, расчет (наст. раб.)

В начале 70-х годов предложена технология производства СКМ методом спекания. Одна из распространенных марок такого материала известна как «стеклокремнезит». Однако, удовлетворительные результаты, полученные на лабораторных и опытно-промышленных установках, не удалось в полной мере реализовать в отечественной промышленности. Так, на Ленинском стекольном заводе, Экспериментальном керамическом заводе МО РФ, заводе им. Ф.Э. Дзержинского, Керченском стекольном комбинате были созданы технологические установки, серийно выпускавшие стеклокремнезитовые плиты невысокого качества. Оборудование имело низкий КПД, а для понижения температуры спекания и кристаллизации материала применялись токсичные фтористые добавки.

В результате анализа выявилась тепловая природа несовершенства технологии: большие оттоки тепла из рабочего пространства вследствие применения некачественной теплоизоляции формовой оснастки и корпуса печи, недостаточно высокий уровень температур в зоне спекания, неравномерный нагрев изделий из-за сильной деформации нагревателей.

Применение математического моделирования осложнялось тем, что литературные данные о свойствах СКМ были ограничены и противоречивы. С целью их восполнения были исследованы теплофизические и оптические свойств СКМ. В диапазоне температур от 20 до 400°C определены теплопроводность и удельная теплоемкость образцов СКМ, изготовленных из различных слоев спеченного изделия (рис.5). Установлено, что на теплопроводность СКМ сильное влияние оказывает содержание кристаллической фазы, кото-

рая, достигая в нижних слоях уровня 15...20 %, вызывает повышение теплопроводности при комнатной температуре с 1,01 до 1,18 Вт/(м·К). Полученные данные о спектральной зависимости коэффициента отражения в диапазоне 0,75–9 мкм позволили применять формулы С.Г. Агабабова при вычислении степени черноты СКМ в зависимости от пористости.

Установлено, что для ускорения процесса спекания температуру нагревателей  $T_H$  целесообразно повысить до уровня 1150°C и изготавливать их из железохромалюминиевых сплавов, что позволит снизить продолжительность технологического цикла и удельные затраты энергии более чем в 2 раза, увеличить производительность более чем в 3 раза (рис.6) и уменьшить перепад температуры по толщине плит (рис.7). Нагреватели с  $T_H > 1250^\circ\text{C}$  могут быть применены в перспективных конструкциях технологических установок.

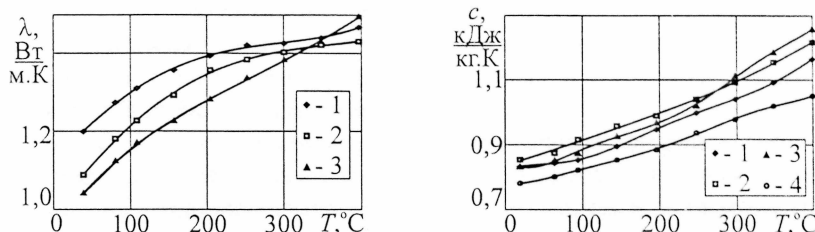


Рис.5. Экспериментальные данные о теплофизических свойствах СКМ:  
1 - нижний слой; 2 - средний; 3 - верхний; 4 - исходные гранулы

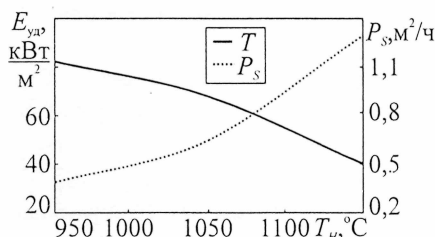


Рис.6. Удельные затраты энергии  $E_{\text{уд}}$  и производительность  $P_s$  при спекании

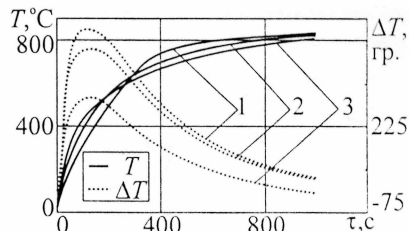


Рис.7. Кинетика нагрева и перепадов температуры в СКМ:  
1 -  $T_H=950^\circ\text{C}$ ; 2 - 1150; 3 - 2200

Сокращению количества брака по причине коробления плит способствует замена чугуновой формовой оснастки на более совершенную из ксерсила, снижающую неравномерность полей температуры и утечки тепла с тыльной поверхности изделия в 1,7 раза. Возможность отказа от фтористых добавок обоснована серией численных экспериментов, в которых определены режимы спекания бесфтористого стеклогранулята. Показано, что расширение сырьевых ресурсов технологии спекания за счет боя тарного стекла требует уровня температуры нагревателей не ниже 1100°C.

Результаты исследований использованы при проектировании нагревателей, теплоограждения и формовой оснастки усовершенствованной техноло-

гической установки спекания ОАО «Ситалл». Принятые меры позволят обеспечить для заданных тепловых режимов спекания СКМ более высокую степень однородности температурных полей, более высокие значения температуры, меньшие потери тепла и продолжительность технологического цикла, возможность применения в качестве сырья как бесфтористых стекол, так и стеклобоя. Эффективность результатов диссертационной работы подтверждена актом о внедрении.

*Способ термической полировки* изделий с рельефной поверхностью основан на эффекте оплавления и сглаживания микронеровностей граней, обработанных алмазным инструментом. По данным НИИстекла начальная шероховатость поверхности в течение нескольких секунд уменьшается с 50...100 мкм до 0,3...0,5 мкм. Внедрение данного способа позволит отказаться от химического полирования в среде агрессивных кислот.

В рамках исследования технологии термической полировки изучена программа перемещения стеклянного изделия в поле действия высокотемпературного нагревателя. С помощью решения граничной ОЗ РКТ определена временная зависимость теплового потока, подводимого к обрабатываемой поверхности изделия (рис.8). По зависимости теплового потока от расстояния между нагревателем и изделием сформулированы требования к режимам работы привода (рис.9). Результаты моделирования использованы при проектировании опытно-промышленной установки «УТРО-3» НИИстекла. Участие автора подтверждено актом о внедрении.

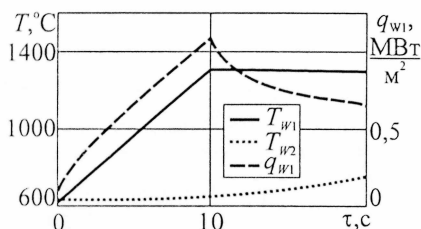


Рис.8. Программа изменения плотности теплового потока при полировке

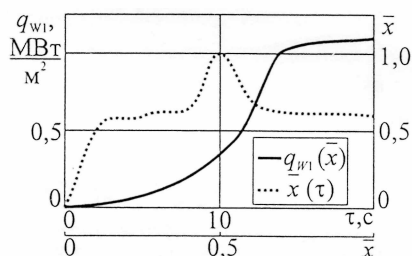


Рис.9. Программа перемещения изделия относительно нагревателя ( $\bar{x} = x/x_{\max}$ )

Заключение содержит выводы по результатам исследований.

В технологических процессах обработки изделий из стекла источниками теплового излучения определяющее влияние на температурное состояние изделий оказывает РКТ. Задачи, возникающие при проектировании оборудования и выборе режимов обработки, не могут быть решены с помощью традиционных методов. В связи с этим в диссертации впервые созданы методические средства, построенные на принципах методологии ОЗ комбинированного теплообмена, позволяющие моделировать и оптимизировать технологиче-



ские процессы производства изделий из стекла. При этом:

1. Разработаны математические модели и алгоритмы решения прямых задач РКТ в слое монолитного стекла и в слое спекающихся стеклянных частиц. В последнем случае модель учитывает усадку пористого материала и объединение частиц за счет сил поверхностного натяжения, изменение физических свойств материала в процессе спекания, объемный характер поглощения и рассеивания излучения, образование кристаллов. Алгоритмы реализованы в виде программ для ПЭВМ и выступают как самостоятельные средства моделирования температурного состояния изделий из стекла, а также входят в состав алгоритма решения граничных ОЗ РКТ.

2. Осуществлено решение задач проектирования новых термических технологий на основе методологии ОЗ. Разработанный универсальный алгоритм решения граничных ОЗ РКТ реализован в виде программ для ПЭВМ и впервые позволяет с достаточной для практики точностью и оперативностью определять параметры оборудования и режимы обработки изделий из стекла источниками теплового излучения.

3. С помощью новых методических средств проектирования проведено комплексное исследование термических технологий ИК отжига стеклянных изделий, производства стеклокремнезитовых плит методом спекания, термической полировки изделий с рельефной поверхностью, в частности:

- Для технологии ИК отжига определена схема размещения источников излучения и динамика изменения во времени перепадов и профилей температуры изделий. Установлено, что сильное влияние на режимы обработки оказывают условия конвективного теплообмена и незначительное влияние – изменения температуры нагревателей в процессе регулирования их мощности, начальной температуры и толщины стенки изделий.
- Для технологии производства стеклокремнезитовых плит определены недостающие для моделирования температурного состояния изделий параметры теплопереноса. Впервые получены температурные зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости СКМ в диапазоне температур 20–400°C, спектральные зависимости коэффициента отражения и степени черноты поверхности СКМ в диапазонах длин волн от 0,75 до 9 мкм и пористости от 0 до 46 %. Установлено, что повышение температуры нагревателей в зоне спекания позволяет снизить продолжительность обработки, удельные энергетические затраты, повысить равномерность полей температуры и производительность оборудования. Теоретически исследована возможность производства изделий из гранулята без фтористых добавок и получаемого из отходов стекла.
- Для технологии термической полировки изделий с рельефной поверхностью определена программа перемещения изделий в поле действия интенсивного теплового излучения, необходимая для разработки привода установ-

ки шахтного типа.

4. Внедрение результатов диссертации в НИИстекла, НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОАО «Ситалл» позволило сократить временные и материальные затраты на проектирование и отладку новых термических технологий, получать изделия из стекла более высокого качества, с меньшими энергетическими затратами и вредными выбросами.

В приложении представлены акты о внедрении результатов работы.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Резник С.В., Просунцов П.В., Калинин Д.Ю.* Граничная обратная задача радиационно-кондуктивного теплообмена // Обратные и некорректно поставленные задачи: Матер. междунар. конф.– М., 1995.– С. 41.

2. Исследование радиационно-кондуктивного теплообмена при термообработке изделий из стекла / *С.В. Резник, И.С. Виноградов, Д.Ю. Калинин* и др. // Теплообмен – ММФ-3: Матер. 3-го Минск. междунар. форума.– Минск, 1996.– Т. 2.– С. 28–30.

3. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Kalinin D.Yu.* Boundary inverse problem of radiative and conductive heat transfer // *Plem. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice.– Le Croisic (France), 1996.– Vol. 2.– 8 p.* ‡

4. Прогрессивные термические технологии переработки бытовых и промышленных отходов стекла / *С.В. Резник, Д.Ю. Калинин, В.Г. Калыгин* и др. // Передовые термические технологии и материалы: Матер. 1-го междунар. симп., 22–26 сент. 1997 г., п. Кацивели (Крым, Украина).– М., 1997.– С. 17.

5. *Калинин Д.Ю.* Определение режимов термообработки на основе решения обратной задачи радиационно-кондуктивного теплообмена // Передовые термические технологии и материалы: Матер. 1-го междунар. симп., 22–26 сент. 1997 г., п. Кацивели (Крым, Украина).– М., 1997.– С. 45.

6. *Резник С.В., Калинин Д.Ю.* Выбор режимов термообработки с помощью граничной обратной задачи радиационно-кондуктивного теплообмена // Идентификация динамических систем и обратные задачи: Матер. 3-й Междунар. конф., 30 мая – 5 июня 1998 г., г. Москва – г. Санкт-Петербург.– М., 1998.– С. 96–106.

7. *Резник С.В., Калинин Д.Ю., Шуляковский А.В.* Моделирование тепловых процессов в стеклокристаллических материалах // Труды 2-й Российской национ. конф. по теплообмену.– М., 1998.– Т. 5.– С. 263–266.

8. *Резник С.В., Калинин Д.Ю.* Использование методологии обратных задач в проектировании новых термических технологий // Труды 2-й Российской национ. конф. по теплообмену.– М., 1998.– Т. 7.– С. 189–192.

9. *Резник С.В., Калинин Д.Ю.* Определение оптимальных условий радиационного нагрева изделий из частично прозрачных материалов // Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена: Матер. междунар. науч. конф.– М., 1998.– С. 121.