



## ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю

Зав. кафедрой МНЭ

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Лучинин В.В.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Студентка Данилова И.В.

Группа 7282

Тема работы: Моделирование и расчет термических процессов при удалении микро- и наночастиц с поверхности произведений масляной живописи с помощью фторводородного лазера

Место выполнения ВКР: Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Исходные данные (технические требования): Масляная живопись, фторводородный лазер с плотностью энергии 100 мДж/см<sup>2</sup>, время воздействия 100 нс

Содержание ВКР: Обзор источников литературы по темам: лазерная реставрация, лазерная абляция, воздействие лазерного излучения на вещество; создание модели термических процессов, создание базы данных теплофизических свойств используемых материалов, реализация модели в программе Elcut, обработка полученных результатов

Перечень отчетных материалов: пояснительная записка, иллюстративный материал

Дополнительные разделы: Безопасность жизнедеятельности

Дата выдачи задания

Дата представления ВКР к защите

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Студентка

\_\_\_\_\_

Данилова И.В.

Руководитель к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_

Бройко А.П.

Консультант к.ф-м.н.

\_\_\_\_\_

Смирнов С.А.

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю

Зав. кафедрой МНЭ

\_\_\_\_\_ д.т.н., доц. Лучинин В.В.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Студентка Данилова И.В.

Группа 7282

Тема работы: Моделирование и расчет термических процессов при удалении микро- и наночастиц с поверхности произведений масляной живописи с помощью фторводородного лазера

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Обзор литературы по теме работы	27.02 – 25.04
2	Создание модели	15.03 – 20.04
3	Обработка результатов	21.04 – 25.04
4	Дополнительный раздел	04.05 – 13.05
5	Оформление пояснительной записки	14.05 – 26.05
6	Оформление иллюстративного материала	27.05 – 30.05

Студентка \_\_\_\_\_

Данилова И.В.

Руководитель \_\_\_\_\_

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_

Бройко А.П.

Консультант \_\_\_\_\_

к.ф-м.н \_\_\_\_\_

Смирнов С.А.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 57 с., 21 рис., 3 табл., 36 ист.

### ЛАЗЕРНАЯ РЕСТАВРАЦИЯ, ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ЖИВОПИСИ, ФТОРВОДОРОДНЫЙ ЛАЗЕР, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ELCUT

Объектом исследования является произведение масляной живописи, загрязнённое копотью.

Цель работы – разработка теплофизической модели, которая позволит определить температуру покровного лака и красочного слоя в результате лазерного воздействия.

В процессе работы произведён анализ информационных источников, после изучения которых стало ясно, что для очистки картин с помощью лазера, необходимо установить, до какой температуры будет нагреваться красочный слой, чтобы оценить будет ли повреждена краска. Была создана база данных теплофизических свойств используемых материалов. Были рассмотрены модели, позволяющие определить температуру поверхности после воздействия лазерного излучения, была разработана модель, учитывающая термические процессы, к которым приводит лазерное воздействие, реализованная в программе Elcut.

В результате работы было установлено, что при воздействии фторводородным лазером с плотностью энергии  $100 \text{ мДж/см}^2$  в течение 100 нс, нагревания красочного слоя практически не происходит.

## **ABSTRACT**

The object of study is easel painting contaminated with black wax.

The main goal of the work is to create a thermophysical model that will allow determining the temperature of the coating varnish and paint layer as a result of laser exposure.

In the process of work, an analysis of information sources was made, a database of thermophysical properties of the materials was created, existing models were reviewed, a thermophysical model was developed and implemented in the Elcut.

As a result of the work, it was found that when exposed to a HF laser with an energy density of  $100 \text{ mJ/cm}^2$  for 100 ns, the paint layer is practically not heated.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	8
ВВЕДЕНИЕ .....	9
1 Лазерные технологии в реставрации .....	11
1.1 Необходимость реставрации .....	11
1.2 Традиционные способы восстановления объектов культурного наследия .....	12
1.3 Лазерная очистка .....	13
1.4 Лазеры, применяемые в реставрации .....	17
1.5 Модели .....	21
1.6 Выводы .....	25
2 Создание модели термических процессов при удалении микро- и нанообъектов с поверхности масляной живописи .....	26
2.1 Предпосылки для создания модели .....	26
2.2 Исходные данные .....	26
2.3 Основные уравнения .....	28
2.4 Выводы .....	30
3 Использование программы Elcut для решения теплофизической задачи. 31	
3.1 Краткие сведения об используемом программном обеспечении .....	31
3.2 Создание геометрии .....	32
3.3 Определение физических свойств и граничных условий .....	34
3.4 Создание базы данных .....	36
3.5 Результат лазерного нагрева и уточнение модели .....	39
3.6 Граничные условия охлаждения .....	41
3.7 Результаты моделирования .....	44
3.8 Выводы .....	46
4 Безопасность жизнедеятельности .....	47
4.1 Мотивация разработки раздела .....	47
4.2 Основные опасные и вредные факторы, связанные с разработкой модели и анализом результатов .....	47

4.3	Методы снижения выявленных опасных и вредных факторов .....	48
4.4	Оценка условий труда .....	49
4.5	Выводы .....	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....		54

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

Er:YAG – легированный эрбием иттрий-алюминиевый гранат

Nd:YAG – легированный неодимом иттрий-алюминиевый гранат

ЛИФ – лазерно-индуцированная флуоресценция

ЛИЭС – лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ПО – программное обеспечение

ПК – персональный компьютер

ЭВМ – электронно-вычислительная машина



## ВВЕДЕНИЕ

Не всегда можно проводить эксперименты над реальными объектами. Например, лазерная очистка произведений живописи не вызывает доверия у большинства реставраторов, потому что в их глазах лазер может нанести неопределимый ущерб бесценному объекту культуры. Поэтому, для увеличения доверия среди реставрационного сообщества необходимо предоставить научные исследования с результатами, которые покажут безвредность лазерного воздействия при очистке картин от загрязнений. Хорошим способом является моделирование лазерной очистки.

Модель существующей системы включает в себя её основные свойства, которые наиболее важны для решения поставленной задачи, а незначительные детали отбрасываются. Вначале создается самая простая модель, а по мере увеличения исследований она может усложняться. Но, как правило, она является менее сложной, чем оригинальный объект. Необходимо создать адекватную модель, которая будет максимально приближена к моделируемому объекту.

Развитие компьютерных технологий открывает большие возможности для моделирования объектов и процессов. Существует множество программных средств, позволяющих проводить исследования в различных научных областях. Так, программа Elcut, разработанная в российской организации «Тор», позволяет решать задачи в области электромагнитных полей, механики и теплофизики. Для описания процессов в ней используются дифференциальные уравнения, которые решаются методом конечных элементов.

Процесс создания модели начинается с изучения поведения исследуемой системы, её физических и химических свойств, процессов, происходящих под интересующими исследователя воздействиями. Затем отбрасываются второстепенные явления, не являющиеся важными на данном этапе моделирования, и создается модель в подходящем программном обеспечении. Далее происходит тестирование, в котором прорабатываются различные сценарии. Если необходимо, модель корректируется. Окончательный результат моделирования сопоставляется с результатами в реальном мире.

В выпускной квалификационной работе будет разрабатываться модель термических процессов при удалении микро- и нанообъектов с поверхности масляных произведений живописи, это является целью работы. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить определённые задачи:

- анализ информационных источников и создание базы данных, содержащей теплофизические свойства исследуемых красок, покровного лака и свечной копоти;
- создание модели термических процессов при удалении микро- и наночастиц с поверхности произведений масляной живописи;
- реализация модели в программе Elcut;
- обработка и анализ полученных результатов.

# 1 Лазерные технологии в реставрации

## 1.1 Необходимость реставрации

Объекты искусства находятся под постоянным влиянием окружающей среды. Воздействие климата, излучения, загрязнителей различной природы приводит к повреждению произведений искусства, в результате они теряют свой первоначальный облик.

Рассмотрим данную проблему на примере станковой живописи. Картины для защиты от механических повреждений покрываются слоем лака, помимо защитной функции он придает краскам яркость и выразительность. Но в процессе старения происходит окисление и полимеризация продуктов, входящих в состав покровного лака [1, 2]. Это приводит к тому, что он перестает выполнять защитную функцию и теряет свои оптические свойства: приобретает желтоватый оттенок или вовсе перестает быть прозрачным. Как следствие, красочный слой подвергается воздействию окружающей среды, а колорит картины изменяется [3].

Актуальной для нашей страны проблемой является утрата церковного убранства. Микроклимат в храмах и церквях зачастую не является благоприятным для икон и настенной живописи. Высокая влажность, повышенная или пониженная температура, плохая вентилируемость помещений наносят ущерб церковному интерьеру [4, 5].

Но микроклимат является не единственным негативным фактором, влияющим на церковную живопись. Традиционно в храмах и церквях используются свечи и лампы. Продукты их горения, оседая на иконе, загрязняют её поверхность. При этом наиболее вредными загрязнителями являются продукты сгорания парафиновых свечей, которые из-за более низкой цены, по сравнению с восковыми свечами, начали широко использоваться в XIX веке [6].

Образующаяся копоть глубоко проникает в трещины, находящиеся на поверхности икон, из-за чего её удаление традиционными методами без нарушения целостности авторской живописи весьма затруднительно [7, 8].

## **1.2 Традиционные способы восстановления объектов культурного наследия**

Для того чтобы сохранить культурное наследие, необходима реставрация. В традиционной реставрационной практике используются методы химической и механической очистки загрязнённых поверхностей картин [9].

Примерный процесс удаления лакового слоя: растворителем размягчают покровный лак, а затем удаляют с помощью ватного тампона. Также в некоторых случаях плёнки очищаемого материала приходится удалять с помощью скальпеля. Это трудоёмкий процесс, который требует постоянного контроля и мастерства реставратора [10, 3].

При механической очистке картин можно случайно повредить материалы, а также текстуру окрашенной поверхности. Ситуация ухудшается, если в процессе старения на картинах образуются кракелюры (трещины), через которые возможно проникновение растворителя в красочный слой. Его нейтрализация становится проблематичной, потому что под действием растворителя увеличивается объем покровных лаков и связующих. В их толще растворитель блокируется, и с течением времени происходит разрушение изображения [11].

Процесс реставрации традиционными методами требует аккуратности, мастерства реставратора, а также большого количества времени. Но в то же время не всегда удастся предсказать поведение химических реагентов, используемых в очистке покровных лаков, поэтому это может привести к непоправимым изменениям живописных произведений. А в некоторых случаях использовать традиционные методы реставрации оказывается просто невозможно, потому что вероятность повредить произведение искусства оказывается высока.

### 1.3 Лазерная очистка

В 70-х годах XX века Джоном Асмусом была предложена технология очистки мраморных скульптур с помощью лазера. Спустя почти 50 лет было произведено большое количество исследований, и к данному моменту разработаны технологические установки, позволяющие проводить лазерную очистку масляной живописи.

Удаление загрязнений происходит за счет лазерной абляции, которая вызывается воздействием сфокусированного лазерного пучка на поверхность произведения искусства.

Пример картины, очищенной с использованием лазера, представлен на рисунке 1.1.

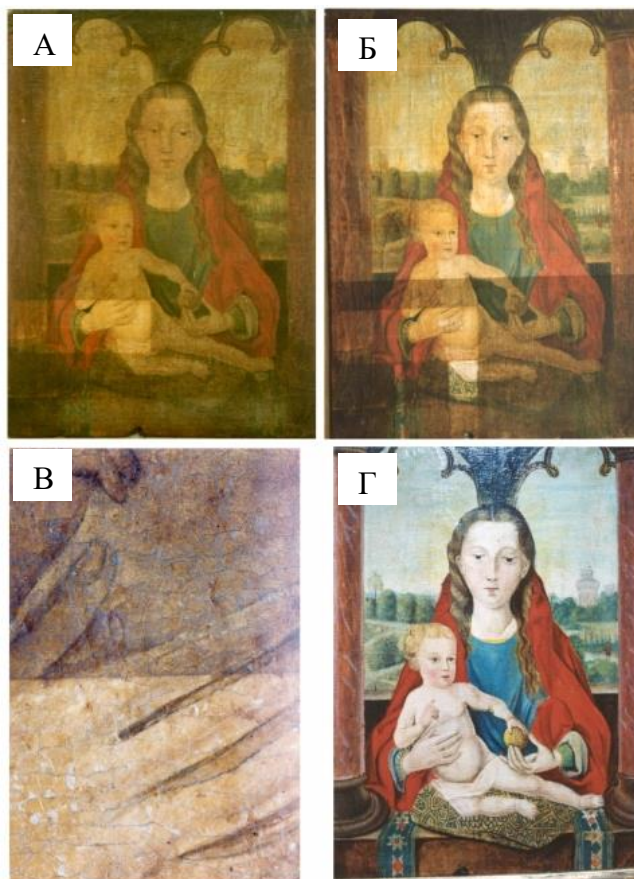


Рисунок 1.1 – Образец масляной живописи: а) оригинальная картина с очищенной лазером прямоугольной областью; б) верхняя часть очищена дополнительно, две малые области снизу для сравнения очищены химическим методом; в) увеличенное изображение оригинальной картины (сверху) и очищенной с помощью лазера области (снизу); г) отреставрированная картина с применением лазерной очистки и традиционных методов реставрации [12]

Помимо того, что лазерная очистка является бесконтактной и может быть автоматизированной, лазерные технологии позволяют получить данные об элементном составе материалов, используемых в произведениях искусства, а также помогают контролировать процессы, протекающие на поверхности очищаемого материала [9].

Одним из методов анализа и контроля является лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия (ЛИЭС). Суть её в том, что при воздействии сфокусированного лазерного луча на поверхность материала генерируется плазма, спектр излучения которой позволяет определить качественный и количественный состав материала. Пики, отражаемые на спектре, позволяют различать пигменты. Существуют элементы, характерные для определенной краски. Так, присутствие сульфида ртути (HgS) с большой вероятностью указывает на киноварь. А наличие свинца в белом пигменте говорит о присутствии свинцовых белил. Пример анализа картины показан на рисунке 1.2.

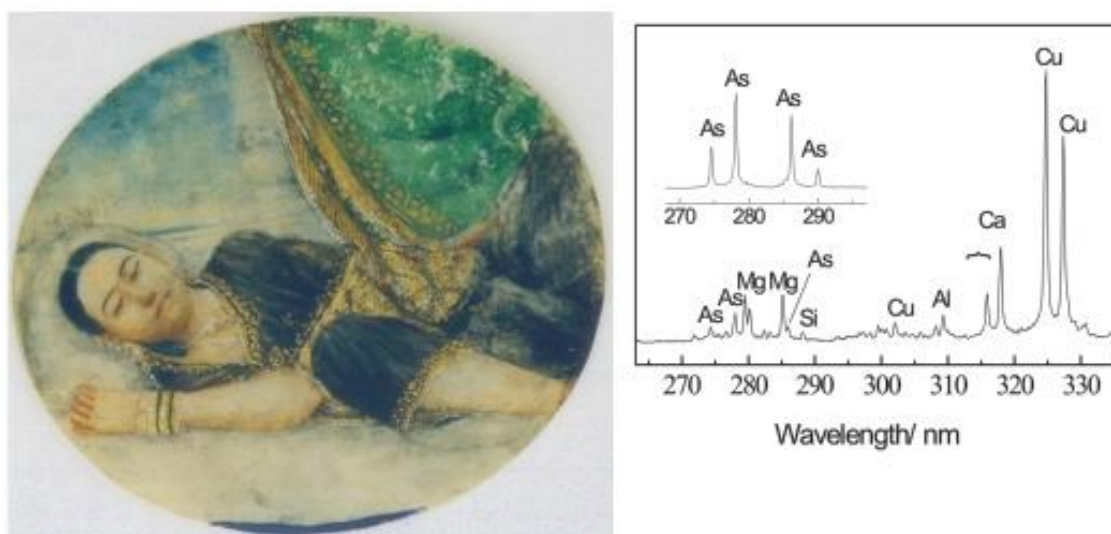


Рисунок 1.2 – Пример исследования с помощью ЛИЭС миниатюры XIX века [12]

Помимо анализа качественного и количественного состава, с помощью ЛИЭС можно контролировать лазерную очистку. Изменение спектра излучения плазмы при достижении лазерным лучом пигментного слоя сигнализирует о необходимости прекращения воздействия. Тогда лазер меняет своё положение, и начинается очистка нового фрагмента живописи [13].

Другим способом является лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ). При поглощении лазерного излучения атомы или молекулы возбуждаются и переходят на более высокий энергетический уровень. Когда молекулы возвращаются из возбуждённого состояния в основное, происходит флуоресценция, регистрируемая детектором. Спектры, регистрируемые с помощью ЛИФ, имеют широкие пики, поэтому не всегда возможна исчерпывающая идентификация веществ. Но, с использованием лазерно-индуцированной флуоресценции можно контролировать процесс лазерной очистки. При удалении загрязнений на спектре флуоресценции сначала наблюдается увеличение интенсивности до максимальной точки (это соответствует удалению первых загрязнённых или окисленных слоев лака), затем интенсивность уменьшается (это свидетельствует о достижении пигментного слоя). Таким образом, процесс лазерной очистки необходимо завершить при наблюдении максимума на спектре [14].

Несмотря на преимущества, указанные выше, данный способ требует тщательного подбора режима очистки. Необходимо учитывать эффекты, вызванные лазерным излучением, чтобы не повредить живопись.

#### *Термическое воздействие*

При взаимодействии лазера с веществом часть излучения отражается, поглощается, а часть распространяется вглубь материала. Поглощённая энергия приводит к возбуждению атомов кристаллической решетки, благодаря чему материал нагревается. «Температура, до которой нагревается материал, зависит от плотности мощности излучения, длительности воздействия, теплофизических свойств вещества, геометрии образца и оптических свойств материала» [15]. Она может повыситься до температуры плавления, при которой произойдет фазовый переход из твердого состояния в жидкое. Дальнейшее увеличение температуры приводит к испарению облучаемого материала. Вещество удаляется с поверхности, то есть происходит его абляция. Помимо испарения, может происходить процесс сублимации, то есть фазовый переход из твердого состояния в газообразное.

### *Химическое воздействие*

Нагрев вызывает химические реакции, приводящие к изменению свойств и состава облучаемого материала. Данные изменения могут являться причиной разрушения поверхности образца [15].

### *Механическое воздействие*

При поглощении лазерного излучения материалом в нём возможно преобразование оптической энергии в акустическую, то есть в облучаемом образце генерируется звуковая волна. Можно выделить несколько механизмов генерации в зависимости от плотности мощности лазерного излучения [16].

#### 1. Тепловой механизм.

Тепловой механизм возникает при поглощении энергии, не вызывающей фазовый переход в облучаемом материале. При этом в областях, облучаемых лазером, за счёт теплового расширения возникают механические напряжения, которые обуславливают генерацию звуковой волны [16].

#### 2. Испарительный механизм.

Если же поглощённой энергии достаточно для фазового перехода твёрдое тело-жидкость, а затем жидкость-пар, то генерация звуковой волны носит испарительный характер. Акустические колебания возбуждаются за счёт реакции отдачи, образующейся при испарении жидкости [16].

#### 3. Механизм оптического пробоя.

При превышении некоторого порогового значения плотности мощности лазерного излучения возникает оптический пробой, который сопровождается образованием плазмы в лазерном кратере. Лазерный кратер разогревается и расширяется благодаря увеличению энергии из-за плазменного поглощения падающего излучения. Разогрев и последующее расширение кратера приводит к образованию звуковой волны [16, 17, 7].

Вышеперечисленные процессы могут привести к разрушению красочного слоя (повреждению картины), поэтому необходимо выбрать такой лазер и режим его работы, при котором возможно очищение загрязнений без негативных воздействий на произведение искусства.



## 1.4 Лазеры, применяемые в реставрации

В реставрационной практике для очистки поверхности в основном используются неодимовые, эксимерные и эрбиевые лазеры. В данной работе будет исследована эффективность применения фтороводородного лазера HF для удаления покровного лака с произведений живописи и очистки свечной копоти с поверхности икон.

### *Эксимерный лазер*

Эксимерные лазеры – это газовые лазеры, работающие в ультрафиолетовой области спектра. Длина волны зависит от состава газовой смеси: для ArF  $\lambda = 193$  нм, для KrF  $\lambda = 248$  нм, для XeCl  $\lambda = 308$  нм, для XeF  $\lambda = 351$  нм [10].

Наиболее эффективным для решения задач реставрации считается эксимерный KrF-лазер. На основе этого лазера разработаны рабочие станции (рис. 1.3), содержащие сам лазер, современный мехатронный инструмент, называемый «оптической рукой», позволяющий точно манипулировать лучом так, что и лазер, и произведение искусства могут оставаться неподвижными, и систему контроля воздействия [18].

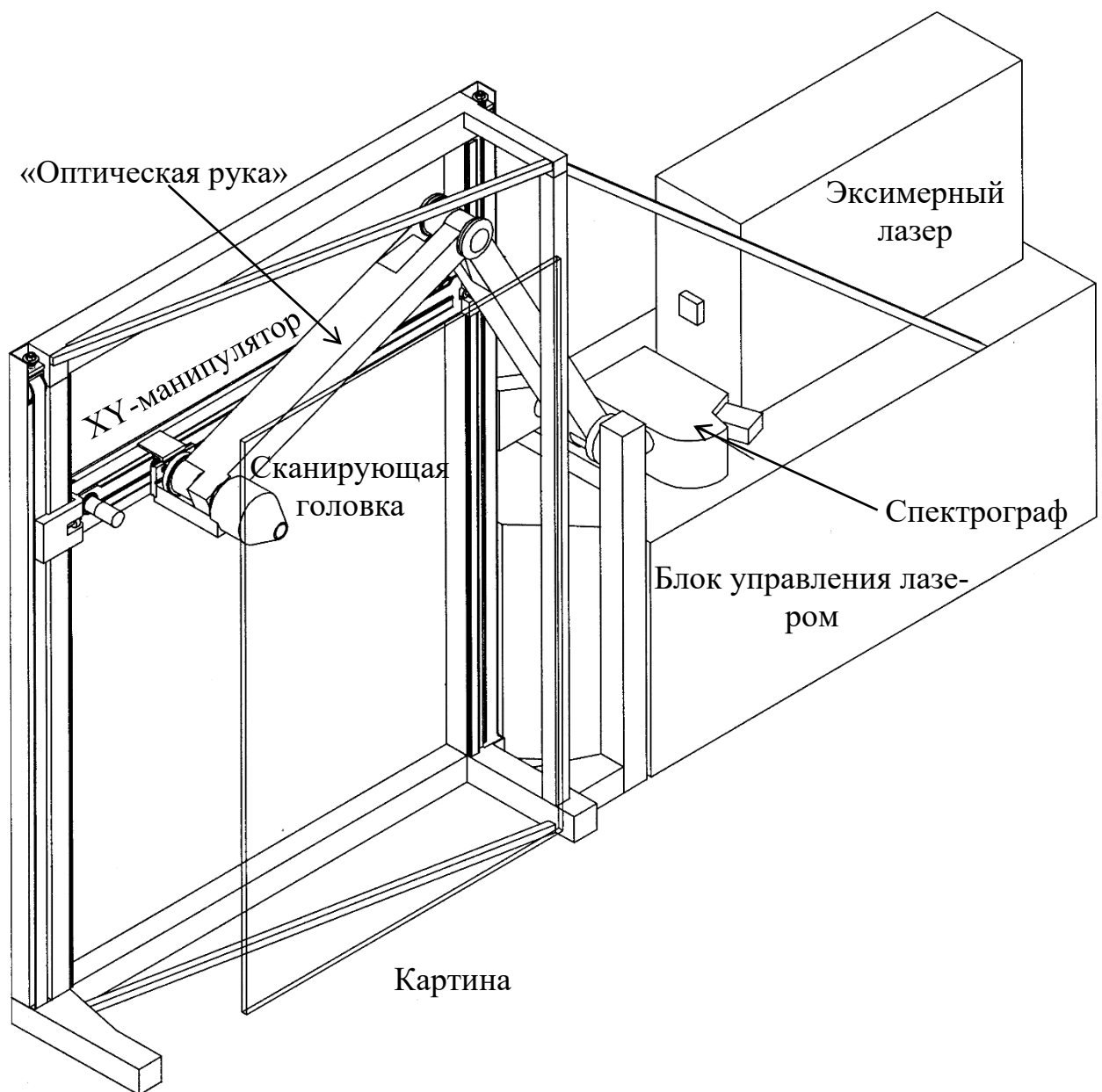


Рисунок 1.3 – Схематичное изображение станции лазерной очистки [18]

Главным недостатком применительно к реставрации живописи является то, что эксимерные лазеры – это ультрафиолетовые лазеры, которые оказывают фотохимическое воздействие на органические и неорганические составляющие красочного слоя, такое воздействие может привести к изменению цвета пигментов. Но, если оставить часть покровного лака, он защитит красочный слой от прямого воздействия УФ излучения, цвет красок останется неизменным, и проблема изменения цвета будет решена. Если же не обеспечить необходимую для защиты толщину покровного лака, это приведет к повреждению слоя краски. Поэтому данный технологический ход требует

высокоточной техники контроля, которая увеличивает и без того высокую цену лазерной установки [8].

Дороговизна рабочей станции и использование в газовой смеси высокотоксичного фтора являются причиной, по которой установки с KrF-лазером не получили широкого распространения. Поэтому в дальнейшем начали использовать более дешевые и компактные неодимовые лазеры [2].

#### *Неодимовый лазер – Nd:YAG*

Nd:YAG – это твердотельный лазер, аббревиатура расшифровывается как легированный неодимом иттрий-алюминиевый гранат ( $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Основной гармоникой является  $\lambda = 1064$  нм. Применяя нелинейные кристаллы в качестве преобразователей частоты, можно добиться излучения на удвоенной частоте (II гармоника) с  $\lambda = 532$  нм. Суммирование  $\lambda = 1064$  нм и  $\lambda = 532$  нм в нелинейном кристалле позволяет получить излучение на длине волны с  $\lambda = 355$  нм (III гармоника), а удвоение частоты II гармоники – излучение на длине волны с  $\lambda = 266$  нм (IV гармоника), также возможно получение V гармоники с длиной волны  $\lambda = 213$  нм. Таким образом, с помощью преобразователей частоты можно получить излучение на различных длинах волн, в том числе и в УФ диапазоне. Длительность импульса данного лазера варьируется от пикосекунд до миллисекунд [11, 19].

Благодаря разнообразным параметрам лазерного излучения неодимовые лазеры являются самыми распространенными в реставрационной практике. С их помощью возможна очистка архитектурных памятников, металлических и деревянных поверхностей, а также очистка живописи и удаление восковых пятен с поверхности икон [4, 8].

Недостатком неодимового лазера является то, что при генерации в ультрафиолетовом диапазоне он уступает по уровню выходной энергии эксимерным лазерам.

### *Эрбиевый лазер – Er:YAG*

Er:YAG – это аббревиатура, которая расшифровывается как легированный эрбием иттрий-алюминиевый гранат (Er: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>). Лазер генерирует длину волны  $\lambda = 2,94$  мкм в средней инфракрасной области. Это излучение хорошо поглощается водой и соединениями, содержащими гидроксильную группу [19].

Эрбиевые лазеры применяются для очистки покровных лаков, для удаления перерисовок поверх оригинальной картины, а также для удаления сажи или других загрязнителей [2].

Преимуществом, по сравнению с эксимерными лазерами, является малая энергия кванта (примерно 0,4 эВ), фотон с такой энергией не может привести к изменению электронных состояний молекул, а следовательно, не может вызвать диссоциацию, окисление, восстановление и другие явления, разрушающие оригинальный красочный слой. Основным недостатком используемых эрбиевых лазеров является большая длительность импульса генерации (150–300 мкс), которая приводит к сильному нагреву очищаемой поверхности. Для предотвращения негативных эффектов картину смачивают водой либо растворителями, которые ограничивают температуру на поверхности картины на уровне кипения жидкостей [2].

Таким образом, для наиболее безопасного эффекта эрбиевый лазер следует применять в качестве дополнительного инструмента к традиционным методам очистки.

### *Фторводородный лазер*

Фторводородный лазер в отличие от лазеров, излучающих в ультрафиолетовой области спектра, не оказывает фотохимического влияния на очищаемые образцы.

Генерирует в инфракрасной области спектра с  $\lambda = 2,6–3$  мкм. Также преимуществом по сравнению с эксимерными лазерами является малая энергия кванта ( $\sim 0,4$  эВ), фотон, обладающий такой энергией, не может вызвать фотохимические реакции, изменяющие цвет картины. Другим достоинством

является безопасностью излучения с длиной волны  $\lambda \approx 3$  мкм для глаз, поэтому возможно осуществление визуального контроля процесса очистки поверхностей [2, 7].

## 1.5 Модели

Лазерное излучение, взаимодействуя с поверхностью вещества, частично отражается и частично проникает вглубь материала, и изменяет его состояние, в частности, вызывает нагрев. Тепловые источники распределяются в объеме вещества, таким образом, они являются объемными. При этом из-за неравномерной интенсивности лазерного излучения в объеме материала (интенсивность уменьшается при проникновении в глубину материала) нагрев происходит неоднородно, возникает нестационарное температурное поле  $T(\vec{r}, t) = T(x, y, z, t)$  [15].

Для того чтобы проводить очистку поверхности материала с помощью лазерного излучения, необходимо выбрать такой режим лазера, который не нанесет вреда очищаемой поверхности. Необходимо удостовериться в том, что температура, до которой нагревается красочный слой, не является критической температурой, при которой происходят необратимые изменения свойств материала.

Распределение температуры по координатам и времени является решением уравнения теплопроводности [15]:

$$\rho(\vec{r}, T)c(\vec{r}, T)\frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(k(\vec{r}, T)\operatorname{grad}(T)) = q_v(\vec{r}, t), \quad (1.1)$$

где  $\rho(\vec{r}, T)$  – плотность,  $c(\vec{r}, T)$  – теплоёмкость,  $k(\vec{r}, T)$  – теплопроводность,  $q_v(\vec{r}, t)$  – плотность мощности объемного источника тепла, который образуется в результате поглощения лазерного излучения.

### *Модель 1*

Альтудов и Гарицын в своей книге [20] рассматривает нагревание мишени в соответствии с одномерной тепловой моделью, для которой уравнение теплопроводности (1.1) принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial T^2}{\partial x^2}, \quad (1.2)$$

где  $a = \frac{k}{\rho c}$  – коэффициент температуропроводности.

В рамках данной модели приняты следующие приближения: энергия лазерного излучения поглощена в слое, который намного тоньше, чем глубина проникновения волны высокой температуры, поэтому объемными источниками тепла пренебрегают, потерями на переизлучения также пренебрегают.

Предполагается, что профиль лазерного импульса во времени имеет прямоугольную форму  $I = I_a$  ( $0 < t < t_p$ ), где  $I_a$  – плотность мощности поглощенного лазерного излучения,  $t_p$  – продолжительность лазерного импульса. Также предполагается, что в квадранте  $x \geq 0$  поток тепловой энергии в мишени имеет такую же временную форму, как поглощенный лазерный поток. Тогда решение уравнения теплопроводности (1.2) имеет точное решение:

$$T(x, t) = \frac{\sqrt{a}}{k\sqrt{\pi}} \int_0^{t_p} \frac{I_a(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{2a(t-\tau)}\right) d\tau. \quad (1.3)$$

Если представить температуру нагретой области мишени, усредненной по месту к концу лазерного импульса:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{(at_p)^{\frac{1}{2}}} \int_0^{\infty} T(x, t_p) dx, \quad (1.4)$$

то можно получить значение средней температуры как функцию параметров лазерного излучения и параметров мишени:

$$\langle T \rangle = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{I_a (at_p)^{\frac{1}{2}}}{k}. \quad (1.5)$$

В формуле (1.5) представлена средняя температура поверхности мишени в момент времени после окончания лазерного излучения.

## Модель 2

В этой модели Парфенов В.А. [21] использует закон Бугера-Ламберта (1.6) для учета распространения излучения, проникающего в объем материала:

$$q(z) = q_0 A \exp\left(-\int_0^z \alpha(z) dz\right), \quad (1.6)$$

где  $q(z)$  – плотность мощности излучения на глубине  $z$ ,  $q_0$  – плотность падающего светового потока на поверхность материала,  $A$  – поглощательная способность ( $A = 1 - R$ , где  $R$  – это коэффициент отражения поверхности материала, облучаемого лазером),  $\alpha$  – коэффициент поглощения.

Для определения распределения температуры необходимо решить уравнение теплопроводности (1.1).

Для его решения необходимо задать условия однозначности. В них входят: геометрические условия (форма и размеры тела); физические и теплофизические свойства тела (теплопроводность, плотность, теплоемкость), закон распределения объемных источников тепла; граничные и начальные условия.

Плотность мощности объемного источника тепла  $q_v(\vec{r}, t)$  можно найти из закона Бугера-Ламберта (1.6):

$$q_v(\vec{r}, t) = -\frac{\partial q(\vec{r}, t)}{\partial z} = \alpha(z)q(x, y, t) \exp\left(-\int_0^z \alpha(z) dz\right). \quad (1.7)$$

Для постановки граничных условий вводят ряд допущений. На границе тела ( $z = 0$ ) при воздействии одиночного лазерного импульса теплообменом поверхности и окружающей среды можно пренебречь, тогда

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0, t) = 0. \quad (1.8)$$

Образец считается полубесконечной средой, температура которого в начальный момент времени равна  $T_n$ , тогда

$$T(x, y, \infty, t) = T(x, y, z, 0) = T_n. \quad (1.9)$$

В зависимости от соотношения между глубиной прогретого тела ( $\sqrt{a\tau}$ , где  $\tau$  – длительность лазерного воздействия) и толщиной проникновения лазерного излучения ( $\delta$ ), есть два решения уравнения (1.1).

Если глубина проникновения лазерного излучения в материал меньше толщины прогретого слоя ( $\delta \ll \sqrt{a\tau}$ ), то это сильное поглощение излучения. Тогда температуру поверхности в момент после окончания лазерного импульса можно определить по формуле:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - i \operatorname{erfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_{\text{н}}, \quad (1.10)$$

где  $\operatorname{erfc}$  – дополнительная функция ошибок ( $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$ ),  $r_0$  – радиус лазерного пятна,

Если же глубина проникновения больше толщины нагретого слоя ( $\delta > \sqrt{a\tau}$ ), то это слабое поглощение излучения. Тогда распределение температуры на поверхности в момент после окончания лазерного импульса можно определить:

$$T = \frac{q_0(1-R)\tau}{\rho c_p \delta} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) - \frac{r_0^2}{4a\tau} Ei\left(-\frac{r_0^2}{4a\tau}\right) \right\} + T_{\text{н}}, \quad (1.11)$$

где  $Ei$  – интегральная показательная функция ( $Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{\exp(t)}{t} dt$ ).

В зависимости от соотношения между радиусом лазерного излучения и толщиной нагрева выделяют два частных решения:

1) импульсное нагревание (при  $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ ):

$$T = \frac{q_0 A \tau}{\rho c_p \delta} + T_{\text{н}}, \quad (1.12)$$

2) непрерывный нагрев ( $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ ):

$$T = \frac{q_0 A r_0}{4\lambda \delta} \ln \left( 19,4 \frac{a\tau}{r_0^2} \right) + T_{\text{н}}. \quad (1.13)$$



### *Модель 3*

В статье [22] рассматривалась проблема распространения тепла при удалении материала лазерным излучением. Основными факторами, влияющими на разогрев окружающего вещества, являются теплопроводность и время тепловой релаксации (время, необходимое для диффузии тепла).

Для того, чтобы провести удаление поверхностного материала, его необходимо нагреть до температуры, при которой вещество становится газообразным (то есть до температуры испарения) и уносится с поверхности. Авторами был проведен анализ, в ходе которого установлено, что лазерное воздействие, продолжительность которого короче времени тепловой релаксации, вызывает нагрев поверхностного слоя материала до температуры фазового перехода без заметного нагрева окружающего вещества.

Выводом является, что теплота испарения, то есть количество энергии, поглощаемое жидкой фазой при переходе в пар, забирает с собой большое количество тепла, тем самым предотвращая нагревание прилегающих областей.

### **1.6 Выводы**

Из вышенаписанного следует, что необходимо удостовериться в безопасности термического воздействия лазерного излучения для красок, используемых в масляной живописи. Рассмотренные модели позволяют определить температуру облучаемой поверхности, но не позволяют получить распределение по координате.

Поэтому необходимо создать теплофизическую модель, с помощью которой можно оценить температуру, до которой может нагреться красочный слой.

## 2 Создание модели термических процессов при удалении микро- и нанообъектов с поверхности масляной живописи

### 2.1 Предпосылки для создания модели

Предварительно проводился ряд экспериментов по облучению фторводородным лазером с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж/см}^2$  модельного объекта (рис. 2.1), который представляет собой стеклянную пластину со слоем копоти толщиной  $\sim 40 \text{ мкм}$ .



Рисунок 2.1 – Фотографии воздействия лазерного луча на поверхность модельного объекта

Видно, что после воздействия сфокусированного лазерного луча, частички углерода вылетают с загрязнённой стеклянной пластины.

При дальнейших экспериментах, а также при сопоставлении данных из различных литературных источников, было установлено, что прямое воздействие на термочувствительные пигменты (например, киноварь) вызывает их разрушение (они изменяют свой цвет).

Целью разработки модели является получить значение температуры красочного слоя и удостовериться в том, что полученное значение не приведёт к изменению цвета красочного слоя.

### 2.2 Исходные данные

Произведение масляной живописи – это многослойная структура, включающая слои краски, покровного лака, а также всевозможных поверхностных загрязнений.

В данной работе будет исследована лазерная очистка масляной картины, загрязнённой копотью. Под копотью подразумеваются продукты сгорания парафиновой свечи – смесь парафина с углеродом. Для упрощения модели рассматривается случай, когда слой парафина находится под тонким слоем углерода (рис. 2.2).

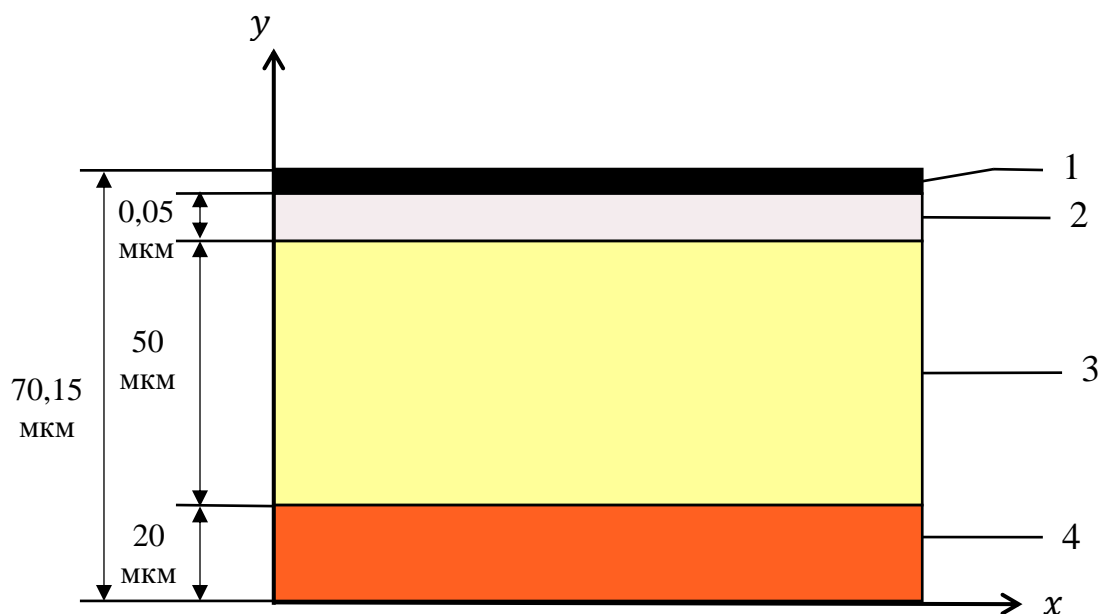


Рисунок 2.2 – Модель масляного произведения живописи в разрезе: 1 – углерод; 2 – парафин; 3 – покровный лак; 4 – красочный слой (свинцовый сурик)

Для того, чтобы было возможно решить модельную задачу, необходимо определить теплофизические свойства слоёв, а именно плотность, теплоёмкость и теплопроводность.

В ходе изучения литературы были найдены значения плотности, удельной теплоёмкости и теплопроводности для углерода, парафина, покровного лака и некоторых видов краски (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Теплофизические свойства

Наименование	Плотность $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Удельная теплоёмкость $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$		Теплопроводность $k, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
		$T, \text{К} [24]$	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} [24]$	
Углерод	2250 [23]	500	1230	100 [24]
		600	1390	
		700	1510	
		800	1630	
		900	1710	
		1000	1790	
		1100	1860	
		1200	1900	
		1300	1940	
		1400	1980	
		1500	2020	
		1600	2040	
		1700	2060	
		1800	2080	
		1900	2090	
2000	2100			
Парафин	900 [25]	2600 [25]		0,23 [25]
Покровный лак	1600	2000		0,33
Свинцовый сурик $Pb_3O_4$	8300 [3]	2200 [3]		1,28 [26]
Желтая охра	2700–3400[27]	1100–1800 [28]		0,23–0,59 [29, 30]
Красная охра	2550 [31]	1390 [31]		0,2961 [31]
Малахит	3900–4100 [27]	1100–1800 [28]		0,23–0,59 [29, 30]

### 2.3 Основные уравнения

Саму задачу можно разбить на две подзадачи: лазерный нагрев, а затем охлаждение свободной конвекцией и лучистым теплообменом.

Распределение температуры по координатам и по времени описывается уравнением теплопроводности (2.1):

$$\rho(x, y, z, T)c(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(k(x, y, z, T)\operatorname{grad}(T)) = q_v(x, y, z, t), \quad (2.1)$$

Фактически решается одномерная задача распространения тепла вдоль оси  $y$  (рис. 2.2), при этом объемные тепловые источники полагаются равными нулю, поэтому для расчета используется одномерное уравнение теплопроводности (2.2):

$$\rho(y)c(y) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} \left( k(y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (2.2)$$

Для решения уравнения (2.2) необходимо задать начальные и граничные условия.

Начальным условием (2.3) является комнатная температура:

$$T_0(y, t) = 300 \text{ К}. \quad (2.3)$$

При воздействии лазерного излучения на верхней грани (рис. 2.2) задается граничное условие второго рода (2.4), то есть значение теплового потока:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = q_{heat}, \quad (2.4)$$

где  $q_{heat} = -F_{laser}$ .

Известно, что плотность энергии лазерного излучения составляет  $I = 100 \text{ мДж/см}^2$ , время воздействия  $t = 100 \text{ нс}$ , тогда тепловой поток равен:

$$F_{laser} = q_{heat} = \frac{I}{t} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{10^{-4} \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 10^{10} \text{ Вт/м}^2. \quad (2.5)$$

Охлаждение осуществляется свободной конвекцией и лучистым теплообменом, граничные условия также накладываются на верхнюю грань.

Радиационный (лучистый) теплообмен задается уравнением Стефана-Больцмана [15]:

$$F_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T|_{y=H} - T_0)^4, \quad (2.6)$$

где  $\varepsilon$  – это степень черноты охлаждающейся поверхности,  $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  – константа Стефана-Больцмана,  $T$  – температура, до

которой нагрелась верхняя грань после воздействия лазерного излучения,  $T_0$  – температура окружающей среды.

Конвективный теплообмен описывается уравнением Ньютона-Рихмана [15]:

$$F_{conv} = \alpha \cdot (T|_{y=H} - T_0), \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Тогда граничное условие для охлаждения будет иметь вид:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = q_{cool}, \quad (2.8)$$

где  $q_{cool} = F_{rad} + F_{conv}$ ,  $F_{rad}$  и  $F_{conv}$  определяются по формулам (2.6) и (2.7) соответственно.

## 2.4 Выводы

В данном разделе приведено уравнение теплопроводности, с помощью которого можно найти распределение температуры по координате и времени. Для однозначного решения были заданы начальное и граничные условия.

Для того, чтобы численно определить граничные условия, необходимо определить температуру, до которой нагревается поверхность после воздействия лазерного излучения, а также рассчитать коэффициент теплоотдачи. Это будет сделано в следующем разделе.

### **3 Использование программы Elcut для решения теплофизической задачи**

#### **3.1 Краткие сведения об используемом программном обеспечении**

Моделирование будет проводиться в программном комплексе Elcut, который позволяет решать электромагнитные, тепловые и механические задачи методом конечных элементов.

Касательно тепловых задач данное программное обеспечение предлагает возможность решения стационарной и нестационарной теплопередачи, а также предоставляет возможность пакетного решения задач.

Решение производится с помощью уравнения теплопроводности. При этом можно задать следующие граничные условия: температура, тепловой поток, условия радиационного и конвективного теплообмена, а также можно задать постоянную заранее неизвестную температуру поверхности. Материалы, используемые в модели, могут иметь теплопроводность и теплоёмкость, зависящие от температуры либо быть постоянными.

Результатом моделирования может являться плотность теплового потока, температура и её градиент, которые отражаются с помощью графиков и таблиц.

Программа имеет простой и понятный интерфейс на русском языке (рис. 3.1), так как она создана отечественными производителями.

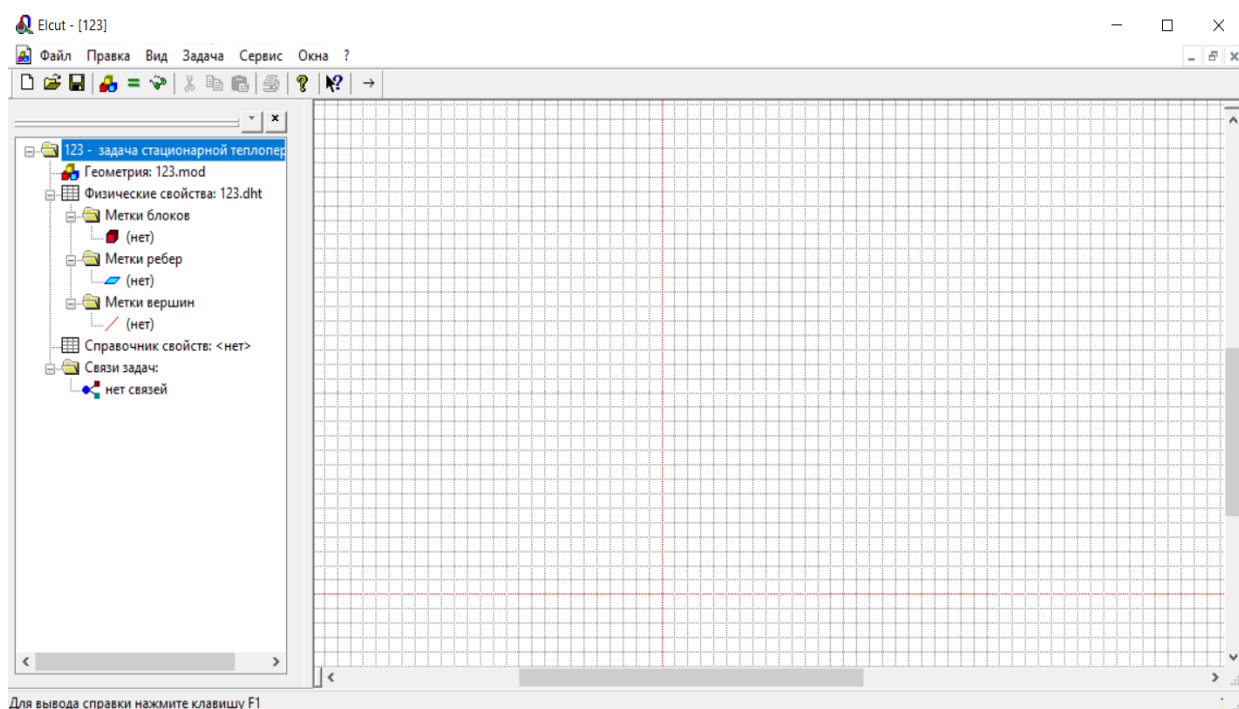


Рисунок 3.1 – Интерфейс ПО Elcut

Для того, чтобы решить поставленную задачу, необходимо создать её геометрию, которая создаётся в блоке с аналогичным названием (рис. 3.1). После этого в блоке «Метки блоков» задаются физические свойства модели, в блоке «Метки рёбер» задаются граничные условия.

Чтобы каждый раз не вводить свойства часто используемых материалов, можно подключить базу данных и использовать её из блока «Справочник свойств» (рис. 3.1).

### 3.2 Создание геометрии

На данном этапе модель масляного произведения живописи (рис. 2.2) переносится в программу. Длина прямоугольника – 100 мкм, а высота зависит от толщин исследуемых слоёв. Толщина красочного слоя – 20 мкм, слоя лакового – 50 мкм, слоя парафина – 50 нм, слоя углерода – 100 нм. Геометрическая модель показана без сетки привязки для лучшего визуального восприятия (рис. 3.2), все размеры в микрометрах.



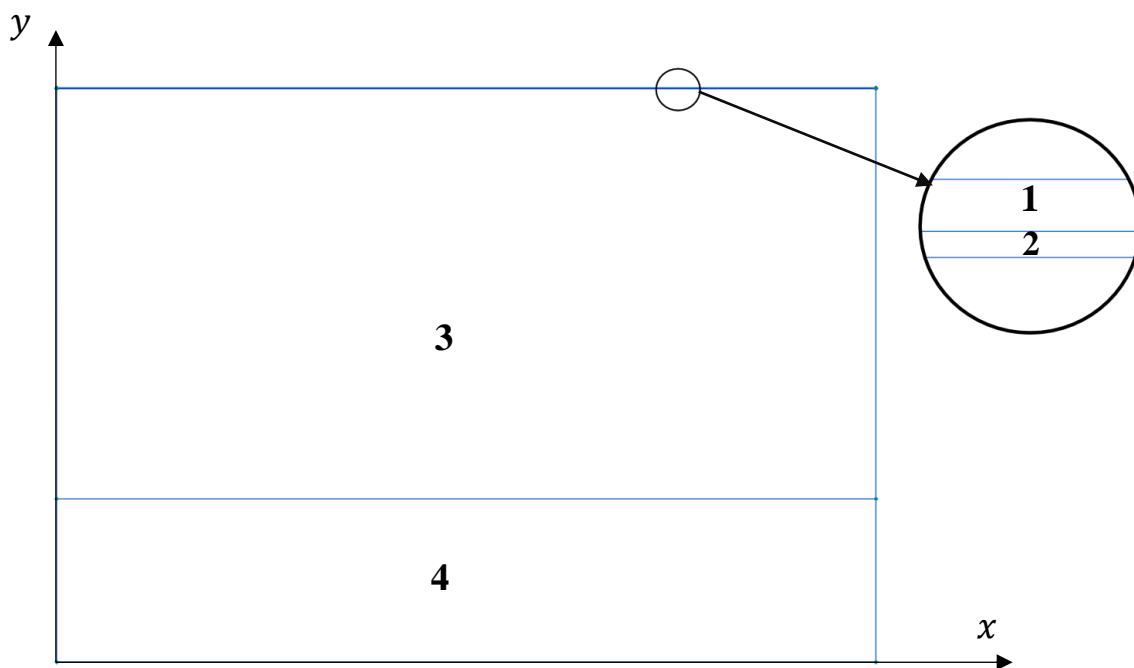


Рисунок 3.2 – Геометрическая модель с увеличенным изображением слоёв углерода и парафина: 1 – углерод; 2 – парафин; 3 – покровный лак; 4 – красочный слой

Программа автоматически создаёт достаточно густую гладкую триангулярную сетку конечных элементов (рис. 3.3) в каждом блоке с переходом от мелких элементов к более крупным. Наибольшая густота сетки наблюдается в месте наибольшей неоднородности теплового поля – на верхней грани, на которую воздействует лазерное излучение и накладываются граничные условия конвективного и радиационного теплообмена.

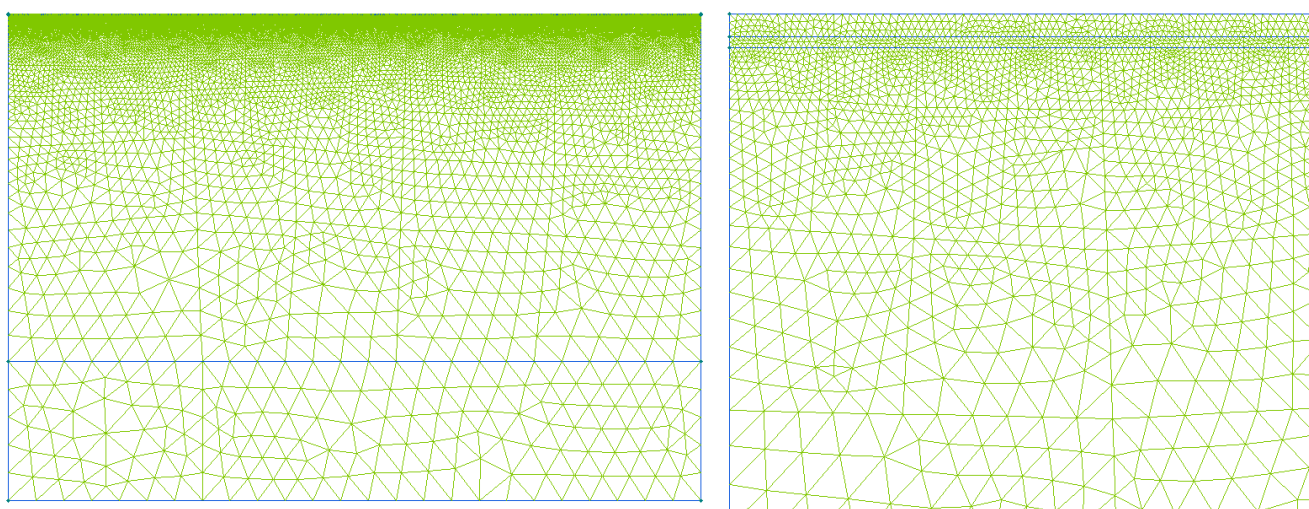


Рисунок 3.3 – Сетка

### 3.3 Определение физических свойств и граничных условий

После того, как создана геометрия и сетка конечных элементов, необходимо описать свойства слоёв.

Физические свойства связываются с геометрическими объектами присвоением меток блокам, рёбрам и вершинам (рис. 3.4). Метки блоков описывают свойства материалов, метки рёбер описывают граничные условия, а метки вершин задают точечные источники поля и граничные условия, которые прикладываются к определённым точкам.

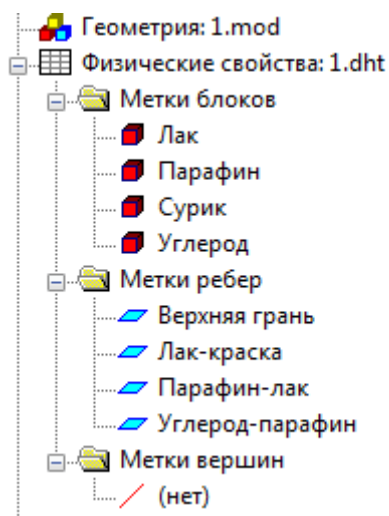
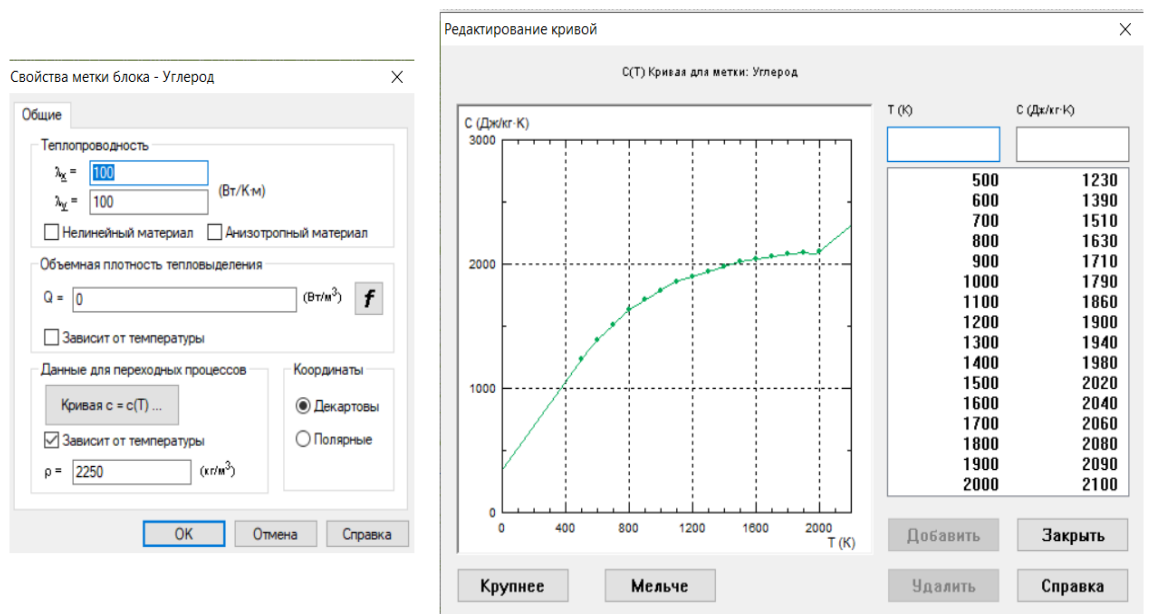


Рисунок 3.4 – Меню описания физических свойств

В метке блоков можно задать теплопроводность (для анизотропного материала, а также зависящую от температуры), теплоёмкость (можно задать зависящую от температуры) и плотность (рис. 3.5).



А)

Б)

Рисунок 3.5 – Свойства метки блоков: А) – общий вид; Б) – зависимость теплоёмкости от температуры

Для описания граничных условий вызывается похожее меню (рис. 3.6), в котором можно задать температуру грани, тепловой поток на границе, условия конвективного или радиационного теплообмена, а также определить периодичность температуры и её равенство.



Рисунок 3.6 – Свойства метки ребра

Граничные условия для каждого этапа решения задачи задаются согласно разделу 2.3, а свойства материалов согласно таблице 2.1.

### 3.4 Создание базы данных

Для того, чтобы каждый раз при создании новой геометрической модели не вводить вручную свойства различных слоёв, удобно создать базу данных. Это можно сделать с помощью встроенной утилиты «Конвертер данных» в программе Elcut (рис. 3.7) и программы Excel.

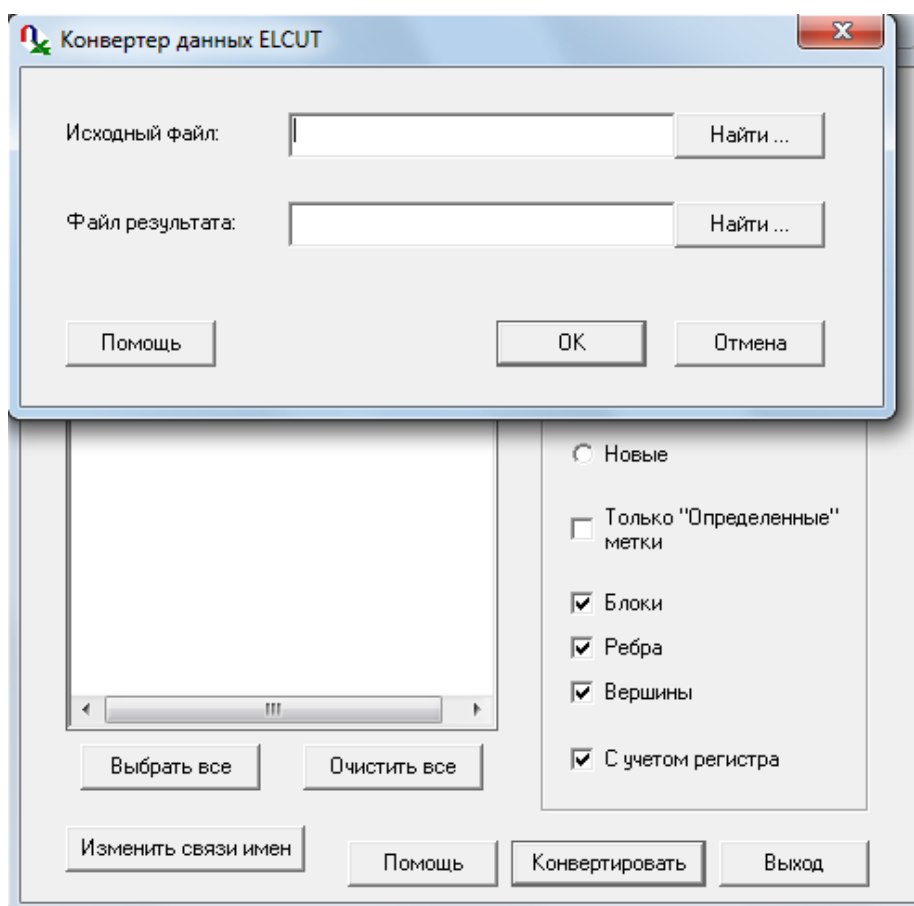


Рисунок 3.7 – Вид диалогового окна конвертера данных

В начале необходимо определить, какой вид имеет файл с теплофизическими свойствами в формате .dht (heat transfer data) при переводе его в Excel. В качестве исходного файла выбирается файл, содержащий свойства меток, а файл результата – таблица в формате .xls (рис. 3.8).

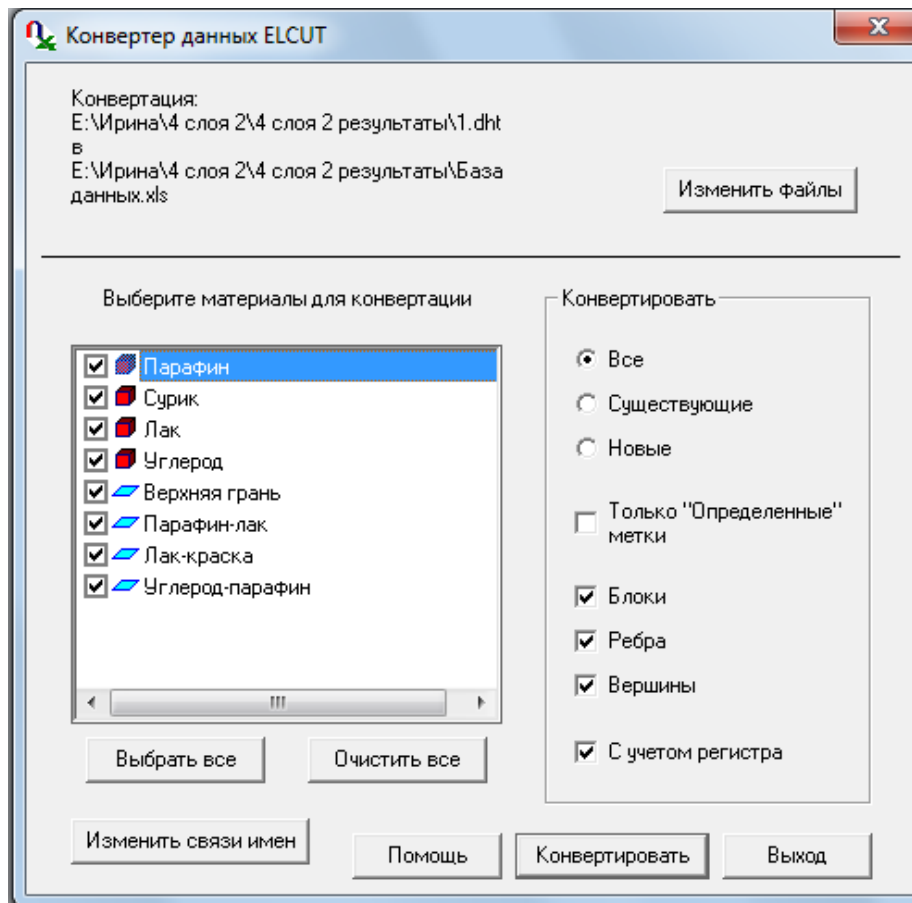


Рисунок 3.8 – Выбор материалов

Результатом конвертации данных будет являться таблица в Excel со значениями коэффициентов (рис. 3.9), в которую необходимо добавить значения плотности, теплопроводности и теплоёмкости для других красок из таблицы 2.1.

	A	B	C	D	E	F	G
1		Теплопроводность, x	Теплопроводность, y	Теплопроводность, координаты	Источник тепла	Теплоемкость	Плотность
2	Парафин	0,23	0,23	Декартовы	0	2600	900
3	Сурик	1,28	1,28	Декартовы	0	2200	8300
4	Лак	0,33	0,33	Декартовы	0	2000	1600
5	Углерод	100	100	Декартовы	0	Теплоемкость spline	2250

Рисунок 3.9 – Результат конвертации данных

Необходимо отметить, что теплоёмкость углерода зависит от температуры и задаётся с помощью сплайна (рис. 3.10).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Теплоемкость spline															
2	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
3	1230	1390	1510	1630	1710	1790	1860	1900	1940	1980	2020	2040	2060	2080	2090	2100
4																

Рисунок 3.10 – Зависимость теплоёмкости углерода от температуры

В результате аналогичной операции по конвертации данных (только теперь исходным файлом будет являться таблица Excel, а файлом – результата теплофизические свойства в формате .dht) получается база данных, состоящая из свойств покровного лака, некоторых красок, углерода и парафина (рис. 3.11).

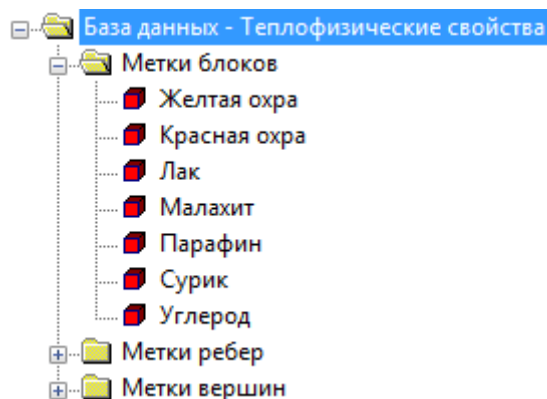


Рисунок 3.11 – База данных

Теперь при создании новой задачи можно просто подключить её в «Справочник свойств» (рис. 3.1) и использовать при определении физических свойств модели.

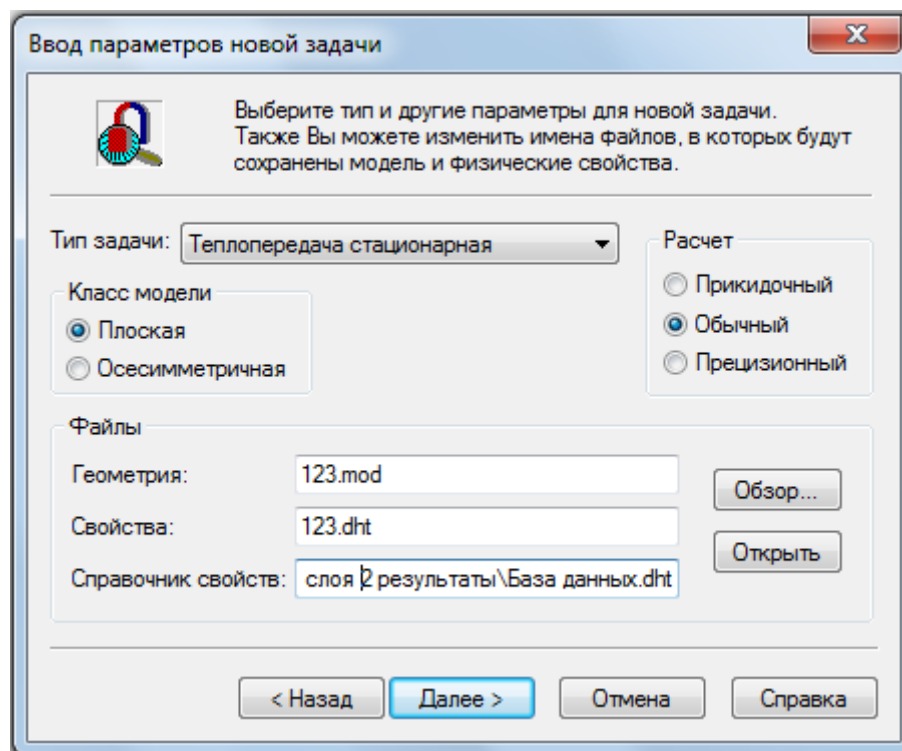


Рисунок 3.12 – Пример использования базы данных

Данную базу всегда можно дополнить новыми материалами по мере увеличения информации.

### 3.5 Результат лазерного нагрева и уточнение модели

Предварительные оценки показывают, что температура, до которой нагревается углерод  $T = 1951$  К (рис. 3.13) не превышает температуры испарения углерода  $T = 5100$  К [23]. Поэтому предполагается, что вылет частиц углерода связан с испарением парафина с облучаемой поверхности (рис. 2.1).

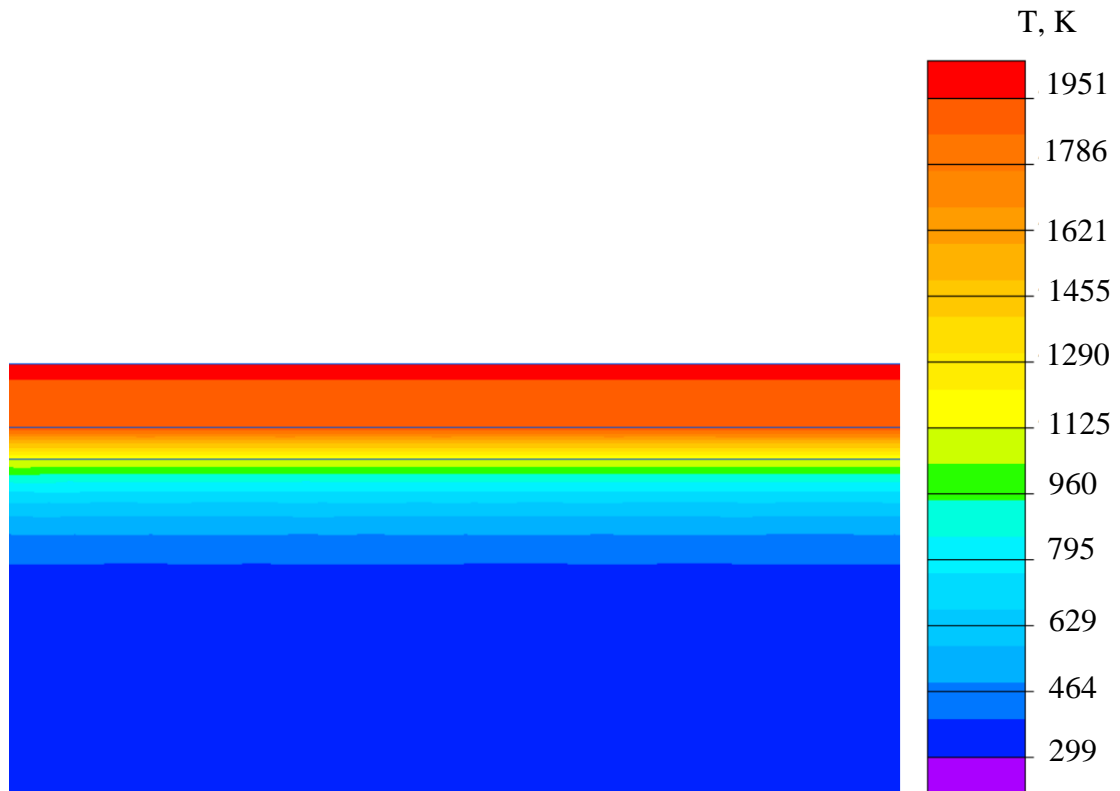


Рисунок 3.13 – Распределение температуры в момент после воздействия лазерного луча

На данном этапе можно сравнить полученный результат со значениями температур, которые можно рассчитать, используя модели из 1-го раздела.

1. Модель 1:

По формуле (1.5) определяется средняя температура поверхности мишени в момент времени после окончания лазерного излучения:

$$\langle T \rangle = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{F_{laser} (at_p)^{\frac{1}{2}}}{k},$$

где  $F_{laser} = 10^{10} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ,  $a = \frac{k}{\rho c} = \frac{100}{2250 \cdot 2000} = 2,222 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $t_p = 100 \text{ нс}$ .

$$\langle T \rangle = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{10^{10} (2,222 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \cdot 10^{-9})^{\frac{1}{2}}}{100} = 119 \text{ К.}$$

Правильность полученного значения вызывает сомнения.

2. Модель 2:

Нагревание импульсное, поэтому температура определяется по формуле (1.12):



$$T = \frac{F_{laser} A t_p}{\rho c \delta} + T_H,$$

где  $A = 1 - R$ ,  $\delta = 100$  нм.

$$T = \frac{10^{10} \cdot (1 - 0,2) \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{2250 \cdot 2000 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} + 300 = 2078 \text{ К.}$$

Значение, рассчитанное с использованием второй модели близко к полученному результату, но модель не учитывает фазовый переход, а также позволяет узнать значение температуры только на поверхности в момент после воздействия лазерного излучения. Необходимым же является установить значение температуры красочного слоя после некоторого времени охлаждения поверхности.

В связи с новым предположением процесс очистки можно разделить на 3 подзадачи:

1. Лазерный луч с плотностью энергии  $I = 100$  мДж/см<sup>2</sup> действует на слой сажи, нагревая при этом частицы углерода. Они, в свою очередь, нагревают окружающий их парафин до температуры кипения  $T = 670 \text{ К} + 20\%$  [25] за некоторое время, которое необходимо определить.

2. В оставшееся время вся энергия от лазера расходуется на фазовый переход твердый парафин  $\rightarrow$  пар. При этом температура на границе между слоем парообразного парафина (теплопроводность для которого  $k = 0,01 \frac{\text{Вт}}{\text{К}\cdot\text{м}}$ ) остается постоянной и равной  $T = 670 \text{ К}$ .

3. Охлаждение нагретой поверхности. При этом учитывается, что парафин, испаряясь, уносит вместе с собой частички углерода, поэтому в модели заменяются значения теплопроводности для углерода и парафина на высокие ( $k = 100000 \frac{\text{Вт}}{\text{К}\cdot\text{м}}$ ), а значения теплоемкости на низкие ( $c = 0,01 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ ).

### 3.6 Граничные условия охлаждения

Теперь, зная температуру нагретой поверхности, можно уточнить граничные условия охлаждения.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  можно определить из критериального уравнения Михеева [32] для свободной конвекции:

$$Nu = \varepsilon_t \cdot C \cdot Ra^n, \quad (3.1)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта,  $\varepsilon_t$  – поправка, которая учитывает зависимость свойств флюида от температуры,  $Ra$  – критерий Рэлея,  $C$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от режима течения флюида (жидкости или газа) представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  для различных режимов течения флюидов [32]

$Ra$	Режим течения	$C$	$n$
$< 10^{-3}$	Плёночный	0,5	0
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	Переходный от плёночного к ламинарному	1,18	$\frac{1}{8}$
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	Ламинарный и переходный к турбулентному	0,54	$\frac{1}{4}$
$> 2 \cdot 10^7$	Турбулентный	0,135	$\frac{1}{3}$

Перед проведением дальнейших расчетов, необходимо найти определяющие параметры: размер  $R_0$  и температуру  $T_0$ . За  $R_0$  принимается размер лазерного луча (2 x 2 мм), то есть  $R_0 = 2 \cdot 10^{-3}$  мм, а  $T_0$  определяется как средняя температура пограничного слоя.

Режим течения определяется значением критерия Рэлея:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (3.2)$$

где  $Gr$  – критерий Грасгофа,  $Pr$  – критерий Прандтля.

Критерий Прандтля для воздуха определяется из справочных таблиц [32] при определяющей температуре:

$$T_0 = \frac{T_B + T_{II}}{2}, \quad (3.3)$$

$$T_0 = \frac{300 + 670}{2} = 485 \text{ К} = 212 \text{ }^\circ\text{C},$$

а критерий Грасгофа рассчитывается по формуле [32]:

$$Gr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T_0, \quad (3.4)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения,  $R_0$  – определяющий размер,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения,  $\Delta T_0$  – определяющая разность температур.

Для газов коэффициент объемного расширения рассчитывается по формуле:  $\beta = \frac{1}{T_0}$ . А кинематический коэффициент вязкости берется из справочной таблицы [32] при  $T_0 = 212 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\nu = 34,85 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

$$Gr = \frac{9,81 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^3}{(34,85 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{485} \cdot (670 - 300) = 49,296,$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = 49,296 \cdot 0,68 = 33.$$

Из таблицы 2 видно, что режим течения – переходный от пленочного к ламинарному, поэтому  $C = 1,18$  и  $n = \frac{1}{8}$ .

Поправка на температуру рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_B}{Pr_{II}} \right)^{0,25}, \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_t = \left( \frac{0,701}{0,678} \right)^{0,25} = 1,008.$$

Если подставить в формулу (3.1) все полученные значения, то получится:

$$Nu = 1,18 \cdot 1,008 \cdot 33^{\frac{1}{8}} = 1,846.$$

Критерий Нуссельта можно рассчитать и по другой формуле, в которую входит коэффициент теплоотдачи:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot R_0}{k}. \quad (3.6)$$

Откуда:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot k}{R_0}, \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{1,84 \cdot 3,93 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 36 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Степень черноты покровного лака полагается равной 0,5 ( $\varepsilon = 0,5$ ).

### 3.7 Результаты моделирования

В результате решения первой подзадачи определяется время, за которое слой парафина нагревается до температуры кипения (рис. 3.14).

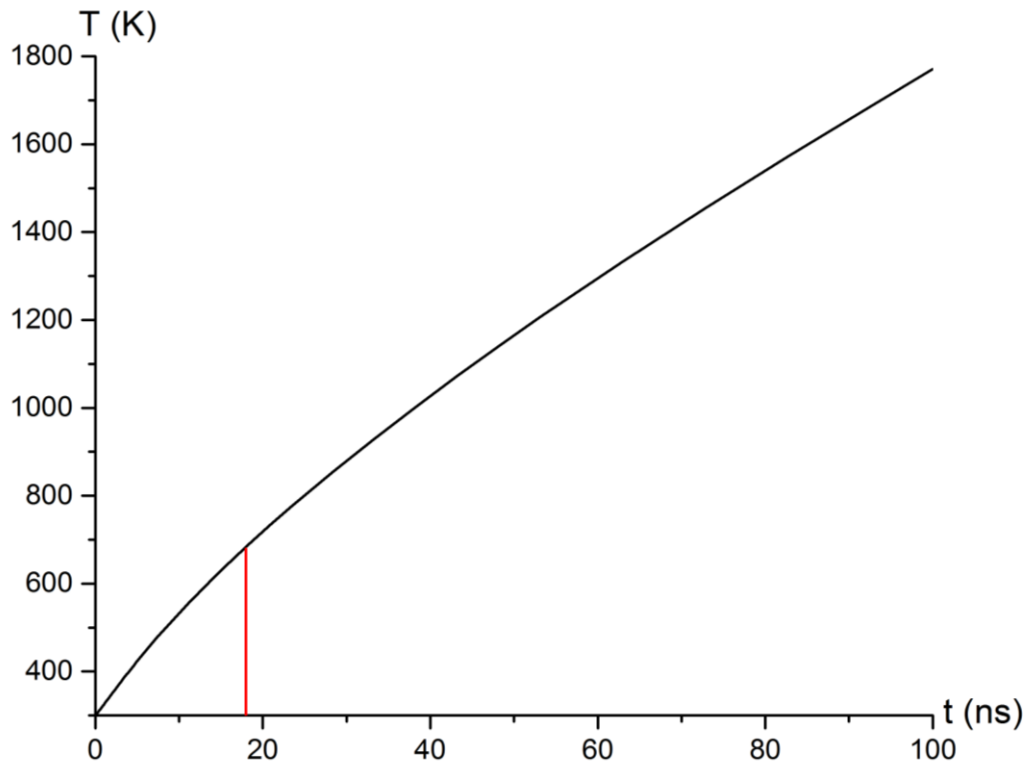


Рисунок 3.14 – Зависимость температуры от времени лазерного воздействия

Парафин нагревается до температуры кипения примерно за  $0,18 \cdot 10^{-7}$  с. Оставшееся время от 100 нс, то есть 82 нс, энергия лазерного воздействия расходуется на фазовый переход парафина из твёрдого состояния в пар.

В результате решения второй подзадачи установлено, что термическое воздействие от лазерного излучения не достигло слоя краски. Об этом свидетельствует зависимость температуры от координаты в слое лака (рис. 3.15). Лаковый слой толщиной 50 мкм нагревается лишь на 0,4 мкм.

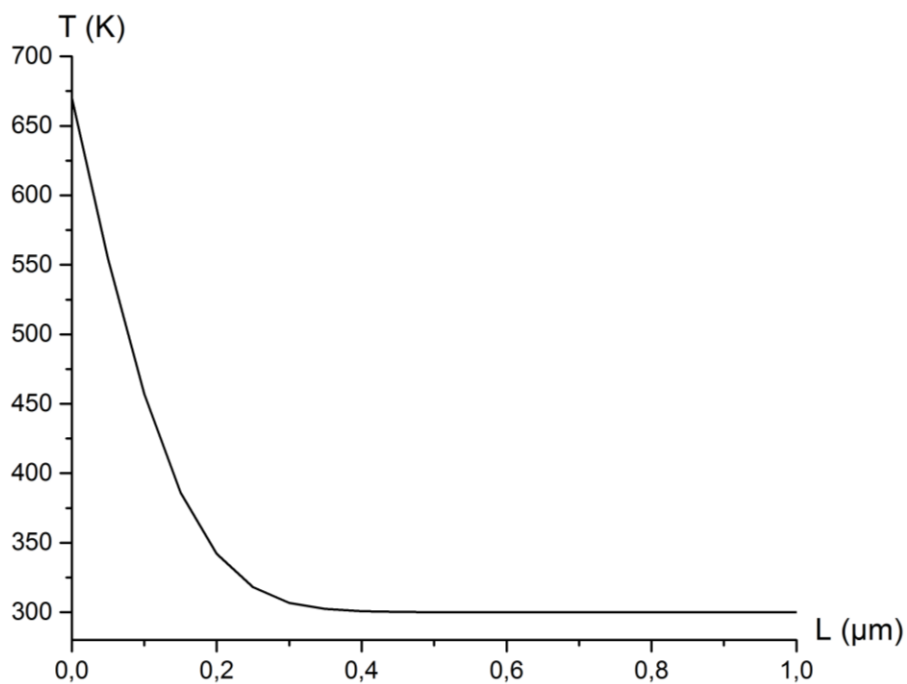


Рисунок 3.15 – Зависимость температуры по координате в слое лака после лазерного воздействия

Результатом моделирования является распределение температуры во времени на границе между лаком и красочным слоем (рис. 3.16).

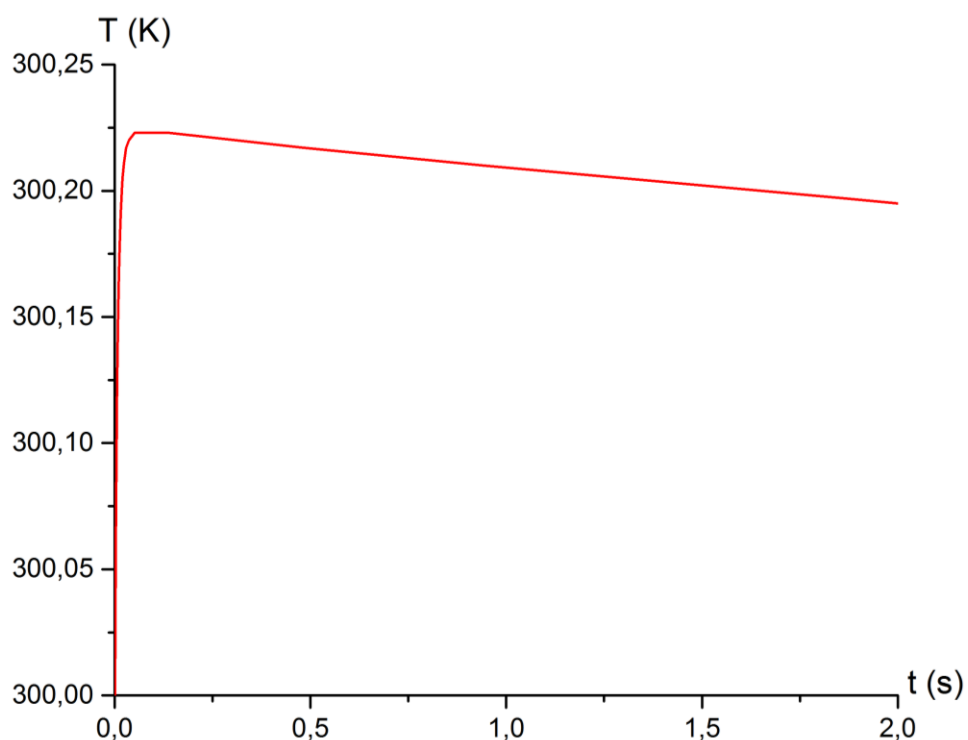


Рисунок 3.16 – Зависимость температуры от времени на границе между лаком и красочным слоем

Видно, что красочный слой не нагревается выше 300,25 К.

### 3.8 Выводы

Можно сделать вывод, что только термическое влияние от лазерного излучения не нагревает красочный слой. Но для утверждения о безопасности использования лазера для очистки от сажи необходимо учесть, что лазерное излучение проникает внутрь лакового слоя и является объемным источником тепла. Модель, описывающая этот процесс, будет разработана на следующем этапе работы.

Помимо доработки модели необходимо уточнить теплофизические свойства красок. Масляные краски состоят из пигмента и масляного связующего, которые находятся в определенном соотношении. Например, в цинковых белилах соотношение связующего к пигменту 100 к 83, а в киновари – 100 к 177 [33].

В зависимости от объемного соотношения между маслом и сухим пигментом изменяются плотность, коэффициент теплопроводности и теплоёмкость.

## **4 Безопасность жизнедеятельности**

### **4.1 Мотивация разработки раздела**

Модель термических процессов при удалении микро- и наночастиц с поверхности масляной живописи с помощью фторводородного лазера была разработана в программном комплексе Elcut с использованием персонального компьютера. Решение модельной задачи необходимо для того, чтобы удостовериться в безопасном воздействии лазерного излучения на поверхность произведений искусства.

С момента зарождения идеи моделирования термических процессов до момента анализа результатов человек подвергается различным опасным или вредным факторам. Например, для создания модели необходимо проанализировать большое количество электронных источников, что оказывает высокую информационную нагрузку. Сам процесс моделирования и анализ полученных результатов может привести к умственному перенапряжению. При этом стоит учитывать, что весь рабочий процесс подразумевает длительное нахождение за ЭВМ, которая является источником электромагнитного и электростатического полей, а также акустического шума.

Более подробный анализ всех возможных вредных факторов будет проведён далее. Также будут предложены варианты ликвидации данных факторов или уменьшения их воздействия на человека.

### **4.2 Основные опасные и вредные факторы, связанные с разработкой модели и анализом результатов**

Работа, связанная с разработкой и созданием модели, предполагает длительное использование персонального компьютера для изучения источников информации, а затем для реализации модели в программном обеспечении Elcut.

Основными опасными и вредными факторами, согласно ГОСТ 12.0.003-2015 [34], при данном виде работ являются психофизиологические. Они подразделяются на физические и нервно-психические перегрузки.

Физические перегрузки могут вызываться статической нагрузкой, связанной с рабочей позой. Причиной нервно-психических перегрузок могут быть: умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность, эмоциональное напряжение.

### **4.3 Методы снижения выявленных опасных и вредных факторов**

Основное влияние на человека, который длительно работает за ЭВМ, оказывает статическая поза. Поэтому, рекомендуется в перерывах выполнять физические упражнения, которые увеличат активность организма, а также помогут устранить перенапряжение мышц. При этом рекомендуется периодическое изменение положения сидя на положение стоя.

Для того, чтобы уменьшить влияние нервно-психических перегрузок, вызываемых длительной работой за ЭВМ, необходимо использовать программное обеспечение, которое минимизирует умственное, эмоциональное и нервное перенапряжение, а также не вызывает перегрузку анализаторов и монотонию. Является ли Elcut таковым программным средством, будет оценено ниже.

Elcut разработана российской компанией «Тор», поэтому полностью русифицирована. Аналоги, позволяющие рассчитывать теплопередачу (например, ANSYS или Comsol), являются англоязычными и более сложными для понимания программами, поэтому работа с ними может вызвать умственное перенапряжение. Elcut же, напротив, обладает простым и понятным интерфейсом, что позволяет начать работу практически сразу, не отвлекаясь на изучение принципа работы программы.

Возможность пакетного решения задач позволяет сократить количество сигналов, поступающих за 1 час работы с ЭВМ, что позволяет существенно снизить сенсорные нагрузки на человека.

Также данное ПО не является высоко требовательным к ресурсам компьютера (табл. 4.1), так как для решения задач используется алгоритм, не требующий размещения всех данных в оперативной памяти ПК. Если размер



данных превосходит ёмкость ОЗУ, то часть из них запоминается на жёстком диске, а при необходимости эффективно извлекаются оттуда. Благодаря тщательно оптимизированному алгоритму задачи решаются быстрее, чем в аналогичных иностранных программах. При этом не стоит беспокоиться о размере операционной памяти, предустановленной на компьютере, это позволяет уменьшить нервные перегрузки.

Таблица 4.1 – Минимальные системные требования [35]

Операционная система	Windows Vista
Оперативная память	256 Мб
Жесткий диск	100 Мб
Видео	Разрешение 800 x 600, 256 цветов
Устройства ввода	Клавиатура и мышь
Периферия	Порт USB для устройства аппаратной защиты

Также в программе предусмотрен запуск решения задачи в определённое время, что может сократить время пассивного ожидания практически до 0.

#### 4.4 Оценка условий труда

Согласно методике приказа Министерства труда и социальной защите № 33н от 24.01.2014 и федерального закона «О специальной оценке труда» [36] будет произведена оценка напряжённости трудовой деятельности человека, который занимается разработкой модели и анализом полученных результатов в ПО Elcut на персональном компьютере с учётом рекомендаций по снижению влияния вредных и опасных факторов.

При определении класса условий труда по напряжённости трудового процесса рассматриваются сенсорные нагрузки и монотонность нагрузок.

1. Сенсорные нагрузки классифицируются по:

1.1. Плотности сигналов в среднем за 1 час работы.

Плотность сигналов не превышает 75 за час работы (1).

1.2. Числу производственных объектов одновременного наблюдения.  
Одновременно наблюдение проводится лишь за открытым окном программы (1).

1.3. Работе с оптическими приборами.

Работа с оптическими приборами (микроскопом, лупой и прочим) не производится.

1.4. Нагрузке на голосовой аппарат.

До 16 часов в неделю (1).

2. Монотонность нагрузок классифицируется по:

2.1. Числу приёмов для выполнения простого задания.

Количество операций для выполнения простого задания: создать геометрию, задать физические свойства, задать граничные условия, определить связанные задачи, выбрать способ отображения результата, сохранить результат (2).

2.2. Времени наблюдения за ходом технического процесса.

Время наблюдения составляет менее 75% от времени работы (1).

Для удобства восприятия вся вышеперечисленная информация представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка класса трудовых условий по напряжённости трудового процесса

Показатели напряжённости труда	Класс трудовых условий			
	1	2	3.1	3.2
Сенсорные нагрузки				
Плотность сигналов в среднем за 1 час работы	+			
Число объектов одновременного наблюдения	+			
Работа с оптическими приборами	+			
Нагрузка на голосовой аппарат	+			
Монотонность нагрузок				
Число приёмов для реализации простого задания		+		
Время наблюдения за ходом процесса	+			

С учётом рекомендаций по уменьшению воздействия физических перегрузок класс условий труда можно отнести к допустимому: неудобное статическое положение до 25% от времени смены.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод – класс условий труда является допустимым.

#### **4.5 Выводы**

В данном разделе были рассмотрены возможные вредные факторы, которым подвергается человек при моделировании и оценке результатов в программном обеспечении Elcut.

Установлено, что основное влияние оказывают психофизиологические факторы, к которым относятся интеллектуальное, эмоциональное и нервное напряжения. Помимо этого, физическое напряжение, вызываемое статической позой, также оказывает неблагоприятное воздействие.

Были предложены методы, которые позволяют снизить влияние данных вредных факторов, что позволит увеличить производительность труда и улучшить самочувствие человека. Также был определён класс условий труда с учётом рекомендаций по уменьшению опасных и вредных факторов – допустимый.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные методы реставрации иногда не могут решить проблему очистки поверхности произведений искусства. Механическое или химическое воздействие, оказываемое на поверхность, может необратимо повредить ценные экспонаты. Лазерная реставрация является бесконтактным методом очистки, которая позволяет удалять различные загрязнения с поверхности произведений искусств.

В данной работе исследовалось термическое влияние фторводородного лазера на поверхность масляной картины, загрязнённой копотью. Фторводородный лазер был выбран из-за длины волны в инфракрасной области излучения (2,6–2,95 мкм), благодаря чему отсутствует фотохимическое воздействие на облучаемую поверхность.

Опираясь на различные источники литературы, была создана база данных теплофизических свойств используемых материалов. Она содержит значения плотности, коэффициента теплопроводности и теплоёмкости для таких материалов: углерод, парафин, покровный лак, свинцовый сурик, красная и жёлтая охры. В дальнейшем, при расширении исследований, необходимо учесть состав красок. Масляные краски состоят из цветных пигментов-порошков и масляного связующего, от соотношения которых зависят свойства красок.

Была разработана теплофизическая модель термических процессов при удалении микро- и наночастиц с поверхности произведения масляной живописи с помощью фторводородного лазера. Предполагается, что очистка состоит из трёх этапов: лазерный нагрев слоя сажи (частиц углерода), которые нагревают окружающий парафин до температуры кипения  $T_{\text{кип}} = 670 \text{ К}$ ; фазовый переход твердый парафин  $\rightarrow$  пар; охлаждение нагретой поверхности конвекцией и лучистым теплообменом.

Реализованная в программе Elcut, модель позволяет определить распределение температуры по времени и по координате. Установлено, что при

использовании HF-лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж/см}^2$  в течение  $100 \text{ нс}$ , нагревания красочного слоя практически не происходит.

Данная математическая модель – это первый шаг в описании процессов лазерной очистки, она выполнена с некоторыми упрощениями. Следующим этапом будет расширение модели для учёта оптических эффектов. В частности, необходимо учесть проникновение лазерного излучения в поверхностные слои образца.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Mechanistic Aspects of Excimer Laser Restoration of Painted Artworks / S. Georgiou, V. Zafiropulos, V. Tomari [et al.] // *Laser Physics*. – 1998. – Vol. 8. – №1. – P. 307-312.

2. Климук Е. А., Трощиненко Г. А., Фомин В. М. Удаление свечной копоти и покровного лака с поверхности масляной живописи с помощью фтороводородных лазеров // *Успехи прикладной физики*. – 2019 – Т. 7. – №3. – С. 309-318.

3. Ciofini D. Removal of varnish and overpaint layers from easel paintings using pulsed Nd:YAG lasers. – Florence: University of Florence, 2014. – 228 P.

4. Theodorakopoulos C., Zafiropulos V. Laser cleaning applications for religious objects // *European Journal of Science and Theology*. – 2005. – Vol. 1. – №1. – P. 63-76.

5. Как правильно обращаться с иконами. О грехе небрежения и об истинном благочестивом отношении к иконам [Электронный ресурс]. Систем. требования: Epub reader. – URL: <https://lib.pravmir.ru/library/book/1361> (дата обращения: 28.02.2021).

6. Беляевская О. Н., Фомин И. В. Как защитить храм от сажи и копоти // *Храмоводатель*. – С. 50-53.

7. Фомин В. М. Перспективы использования фтороводородных лазеров при решении задач реставрации // *Материалы II Междунар. конф. «Сохранение культурного наследия. Исследования и реставрация» в рамках V Международного культурного форума (Санкт-Петербург, декабрь 2016 г.)* – СПб.: Институт имени И. Е. Репина, 2018. – С. 224-235.

8. Федотов О. Г.; Фомин В. М. Перспективы использования фтороводородных лазеров при реставрации произведений живописи // *Оптический журнал*. – 2017. – Т. 84. – №4. – С. 3-11.

9. Characterization of Laser Cleaning of Artworks / J. Marczak, A. Koss, P. Targowski [et al.] // *Sensors*. – 2008. – №8. – P. 6507-6548.

10. Исследование и реставрация картины фламандского мастера первой трети XVII в. «Хозяйка на кухне» / О.К. Карасева, А.В. Юровецкая, И.Ф. Кадикова [и др.] // Материалы II Междунар. научно-практического семинара «Сохранение культурного наследия. Научное исследование и реставрация произведений голландской и фламандской живописи XVII-XIX вв.» (Омск, июнь 2014 г.) – Омск: Омский областной музей изобразительных искусств им. М.А. Врубеля, 2015. – С. 187-193.

11. Feller R. L., Stolow N., Jones E. H. On picture varnishes and their solvent. – Cleveland.: Press of Case Western Reserve University, 1971. – 251 P.

12. Science for Heritage // Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/> (дата обращения 15.03.2021).

13. Scholten J. H., Schipper D. A. Advanced workstation for controlled laser cleaning of paintings // Proceedings of SPIE. – 2001. Vol. 4402. – P. 121-129.

14. Progress in the Use of Excimer Lasers to Clean Easel Paintings / A. E. Hill, A. Athanassiou, T. Fourrier [et all.] // Optics and Lasers in Biomedicine and Culture, 2000. – V. 5. – P. 203-207.

15. Либенсон М. Н., Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов: учеб. пособие. / под ред. В. П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 181 с.

16. Михеенко А. В. Генерация звука в жидкости под действием лазерного излучения: монография / Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. – 80 с.

17. Бункин Ф. В., Комиссаров В. М. Оптическое возбуждение звуковых волн // Акустический журнал. – 1973. – Т. 19. – №3. – С. 305-320.

18. Controlled laser cleaning of painted artworks using accurate beam manipulation and on-line LIBS-detection / J.H. Scholten, J. M. Teule, V. Zafiropulos [et all.] // Cultural Heritage. – 2000. – №1. – P. 215-220.

19. Laser Cleaning of Easel Paintings: An Overview / R. Bordalo, P.J. Morais, H. Goiveia [et all.] // Laser Chemistry. – 2007. – V. 2006. – P. 1-9.
20. Альтудов Ю. К., Гарицын А. Г. Лазерные микротехнологии и их применения в электронике. – М.: Радио и связь, 2001. – 632 с.
21. Парфенов В. А. Лазерные методы и системы для реставрации и документирования произведений искусства: дисс. ... докт. техн. наук. – СПб, 2018, – 402 с.
22. Wolbarsht M. L. Laser surgery: CO<sub>2</sub> or HF // Quantum electronics. – 1984. – V. QE-20. – №12. – P.1427-1432.
23. Britannica // Carbon [Электронный ресурс]. URL: <https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element> (дата обращения 09.04.2021).
24. Thermalinfo // Физические свойства углерода С (графита). Теплопроводность графита [Электронный ресурс]. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/elementy/fizicheskie-svojstva-ugleroda-c-grafita-teploprovodnost-grafita> (дата обращения 09.04.2021).
25. Hamins A., Bundy M., Dillon S.E. Characterization of Candle Flames // Fire Protection Engineering. – 2005. – V. 15. – P. 265-285.
26. Thermal Characterization of PZT Ceramics Obtained by Mechanically Activated Mixed Oxides Using Different Pb Sources / G. Rivera-Ruedas, L.M. Ramírez-López, F. Sánchez de Jesús [et all.] // International Journal of Thermophysics. – 2012. – V. 33. – №12. – P. 2366-2376.
27. Никитин А.М. Художественные краски и материалы: справочник. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 412 с.
28. Laser cleaning in conservation of stone, metal and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd:YAG lasers / S. Siano, J. Agresti, I. Cacciari [et all.] // Appl. Phys. A. – 2012. – V. 106. – P. 419-446.
29. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1967. – 474 с.



30. Информационный портал температура / Теплопроводность некоторых материалов [Электронный ресурс]. URL: [http://temperatures.ru/pages/teploprovodnost\\_tverdyh\\_materialov](http://temperatures.ru/pages/teploprovodnost_tverdyh_materialov) (дата обращения 02.02.2021).
31. Khan W. N, Chhibber R. Experimental investigations on red ochre for application in welding consumable development // Materials: Design and Applications. – 2020. – V. 234. – №8. – P. 1063-1070.
32. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения): метод. указания к вып. практических и лабораторных занятий // Ивановский гос. энерг. университет. – Иваново, 2007. – 39 с.
33. Петрушевский Ф.Ф. Краски и живопись: пособие для художников и техников. – СПб.: тип. М.М. Стасюлевича, 1891. – 336 с.
34. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Введ. с 2017-03-01. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071> (дата обращения 06.05.2021).
35. Elcut // Базовый курс по работе с ELCUT [Электронный ресурс]. Систем. требования Adobe Acrobat Reader. – URL: [https://elcut.ru/seminar/elcut\\_basic\\_training.pdf](https://elcut.ru/seminar/elcut_basic_training.pdf) (дата обращения 04.05.2021).
36. Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению [Текст]: Министерство труда и социальной защиты российской федерации приказ от 24 января 2014 года N 33н. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499072756> (дата обращения 10.05.2021).