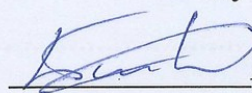


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК
Кафедра фундаментальной математики и механики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ
Заведующий кафедрой


к.ф.-м.н.
Басинский К.Ю.
2019 г.

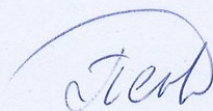
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДАВЛЕНИЯ
КОНДЕНСАЦИОННОГО РОСТА ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ
«КАПЕЛЬНЫЙ КЛАСТЕР» ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МОЩНОСТИ
ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА

01.04.01 Математика

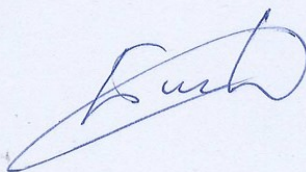
Магистерская программа «Вычислительная механика»

Выполнила работу
Студентка 2 курса
очной формы обучения



Пенкина
Татьяна
Андреевна

Научный руководитель
к.ф.-м.н.



Актаев
Нуркен
Ерболатович

Рецензент
зав. каф. МФПиС
ТюмГУ ФТИ,
к.ф.-м.н.



Ганопольский
Родион
Михайлович

г. Тюмень, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	4
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	8
2.1 Постановка задачи и описание математической модели	8
2.2 Обоснование выбора среды программирования.....	13
2.3 Численная реализация	14
ГЛАВА III. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	27
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	28
Приложение	32

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особый интерес в науке представляют микрогидродинамические исследования, такие как, например, работы по массивам микрокапель [1,2]. Физическим объектом является капельный кластер, который был обнаружен в 2003 году в Тюменском государственном университете А.А.Федорцом и представляет собой гексагональную структуру из микрокапель конденсата, левитирующих на расстоянии сопоставимом с диаметром капель над свободной поверхностью горизонтального слоя активно испаряющейся жидкости. Ансамбли микрокапель привлекли внимание ученых последнего десятилетия из-за их биологического [3] и химического [4,5] применения. Lab-on-a-chip, использующие 3D-принтеры, микро- и нано-флюидику, микроэлектромеханические системы (MEMs), био-микроэлектромеханические системы (bioMEMs), используют полезные свойства ансамблей микрокапель [6,7].

Эксперименты с капельными кластерами показали, что существование кластера, как правило, не будет долгим из-за роста капель, конденсации и окончательного слияния крупных капель с водой. Однако дальнейшие лабораторные исследования биохимических процессов в одиночных каплях будут возможны только в том случае, если продолжительность существования капель будет долгой. Именно поэтому задача стабилизации капельного кластера является актуальной. Одна из идей возможной стабилизации кластера была рассмотрена в работе [8], но не была подтверждена в предварительных экспериментах, потому что было недостаточно информации о динамике реакции капельного кластера для периодических изменений мощности греющего лазерного луча. Ожидается, что изменение мощности лазерного луча можно использовать для замедления или даже для подавления роста капель. Также, изменяя температуру нагрева, можно управлять скоростью роста капель, манипулировать отдельными капельками, заставляя кластер вращаться, наблюдать тандемы из капелек и малые группы с любым

их количеством, от одной до нескольких десятков. Именно поэтому интерес вызывает влияние мощности лазерного источника на изменение температуры капельного кластера, потому что, используя излучение, можно подавить рост капель и стабилизировать их на длительный период времени [10-13].

В рамках представленной работы проведен численный расчёт температуры методом Кранка-Николсона в капельном кластере при воздействии на него различными импульсами мощности лазера.

Таким образом, резюмируя вышесказанное, сформулируем цель работы.

Цель: выяснить, влияет ли форма импульса мощности лазерного источника на изменение ключевых параметров, влияющих на скорость роста капель.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие

Задачи:

1. Построить математическую модель распространения тепла,
2. Сформулировать граничные условия,
3. Реализовать модель в виде компьютерной программы,
4. Проанализировать полученные результаты.

Магистерская диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. В первой главе представлен обзор изученной литературы о данной теме, вторая глава включает в себя описание математической модели, численной схемы, обоснование выбора среды программирования, третья - представленные результаты.

ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Новое явление обнаружено в ходе исследования фотоиндуцированных термокапиллярных течений [9,10], проводимого с применением микроскопа МБС-10, оборудованного приставкой для фото- и видеосъемки. Одной из изучаемых систем был открыт тонкий слой воды на эбонитовой подложке. Стремясь улучшить условия видеозаписи, пучок осветителя ОИ-9М (мощность лампы накаливания 20 Вт) сфокусировали на подложке, что вызвало локальный нагрев и испарение жидкости. В итоге над освещенным участком (прямоугольная область 8x10 мм) возник паровоздушный конвективный факел, который выглядел как подвижный шлейф тумана. Неожиданным оказалось поведение капель конденсата, выпадавших из шлейфа на слой. Эти капли в виде миниатюрных шариков перемещались по свободной поверхности, не коалесцируя со слоем и между собой. Выпадая на разных участках слоя, капли устремлялись к единому центру, образуя упорядоченную структуру из десятков и сотен капель, которую будем называть капельным кластером. Время стабильности капель в кластере легко отслеживалось, так как разрушение одной капли приводило к “исчезновению” целого сектора из десятков капель. Оказалось, что при постоянных внешних условиях зарегистрированный период стабильности кластера лимитировался временем непрерывного наблюдения и превышал 10 мин [10]. На сегодняшний день осуществлены поисковые эксперименты с водопроводной некипяченой, кипяченой и дистиллированной водой и рядом органических жидкостей (бутанолом, бензиловым спиртом и глицерином) с применением подложек из эбонита, карболита и цветного стекла, при варьируемых интенсивности светового пучка, толщине жидкого слоя и режиме испарения (открытая или закрытая кювета). Несмотря на качественный характер этих опытов, они позволили выявить ряд важных особенностей капельных кластеров и, в частности, условия, необходимые для их воспроизведения.

Далее обобщены основные наблюдения, проясняющие природу явления.

1. Независимо от вещества подложки явление воспроизводилось со всеми пробами воды, бензиловым спиртом и глицерином и не обнаружено для слоев бутанола. Все образцы жидкостей, в которых наблюдалась стабилизация капель, были загрязнены поверхностно-активными веществами (ПАВ).

2. Явление связано с тепловым действием света: а) возникает лишь тогда, когда имеет место сильное поглощение света подложкой либо жидкостью, нагрев и испарение слоя; б) темновая пауза не приводит к потере стабильности капель до тех пор, пока ее продолжительность меньше времени (в наших экспериментах 10 с), за которое температура слоя успевает заметно понизиться.

3. Существует критическая температура жидкости в области нагрева, ниже которой капли нестабильны (по-видимому, здесь важна не сама температура, а комплекс связанных с ней термодинамических характеристик процесса испарения). В частности, можно привести данные для системы вода/эбонитовая подложка, полученные с помощью погруженной в слой медь-константановой термопары: а) 43 °C — появление тумана в конвективном факеле (температура воздуха 25 °C); б) 46 °C — кратковременное, в течение нескольких секунд, существование капель, выпадающих на свободную поверхность слоя; в) 52 °C — стабилизация капель и образование кластера.

4. Необходимым условием является открытость слоя в области нагрева, так как стабилизация капель происходит лишь в струях конвективного факела. При перекрытии кюветы прозрачной пленкой, хотя над слоем оставалась прослойка воздуха толщиной около 5 мм, стабильные до этого момента капли исчезали одновременно с затуханием факела.

5. Движителем отдельных капель, устремляющим их к единому центру, а также кластера как целого, являются паровоздушные струи конвективного факела, скорость которых в приповерхностном слое имеет выраженную центростремительную компоненту. Отслеживая застойную область в центре основания конвективного факела, кластер может перемещаться по

поверхности слоя на расстояния порядка нескольких собственных диаметров, сохраняя свою структуру [11-13].

Процессы самоорганизации в физических, химических и биологических системах всегда представляли особый интерес как для экспериментальных, так и для теоретических групп [14-19]. Интерес к подобным исследованиям объясняется не только стремлением понять на качественном и количественном уровнях ключевые процессы, происходящие в природе, но и желанием управлять этими процессами. Такие процессы на микро и нано уровнях, как получение молекул, синтез сверхтяжелых элементов, формирование наноструктур управляются посредством макроскопических параметров, таких как температура, ускоряющее напряжение, интенсивность излучения, давление в химическом реакторе. Большой интерес в области синтеза наноструктур связан с возможностью получать материалы, свойства которых существенно отличаются от свойств макрокристаллических структур. В этом смысле, капельный кластер, открытый в 2003 году [20] является интересным объектом синтеза капельного нанокластера. В недавней работе [21] экспериментально было продемонстрировано, что при малом количестве капель, кластер имеет уникальную структуру, и добавление последующей капли существенно изменяет его форму. Следует отметить, что воспроизведение этих экспериментов носит регулярный характер. Очевидно, что существование «нанокластера» позволит изучать химические процессы в воде на новом уровне и представляет существенный интерес для работ в области экологии и сельского хозяйства и не только.

Большое разнообразие процессов в атмосфере, а также в разнообразных применениях инженерии связано с поведением жидкостных аэрозолей, которые могут сформировать брызги, туманы и облака. Во многих случаях важно изучать физические, химические или биохимические процессы в небольших единичных каплях размером около нескольких микрометров. Специфические условия внутри малых капель, в том числе процессы, индуцированные возможным внешним облучением, а также относительная

независимость этих внутренних процессов от термохимических условий и поля течения в окружающей газовой среде, позволяют рассматривать эти капли как уникальные микрореакторы [23-27,28]. Даже хорошо изученные химические и биохимические процессы имеют необычные особенности этих реакторов. [14] Впервые в ранних работах наблюдались и описывались левитирующие скопления капель [15,16]. Экспериментально исследовано поведение левитирующих одиночных капель и капельных кластеров в предстоящем потоке паров различных жидкостей и увлекаемого воздуха [4-12]. Эксперименты с кластерами капель воды показали, что жизнь кластера обычно оказывается недолгой из-за роста капель за счет конденсации пара и окончательного срастания крупных капель с подложечным слоем воды [8,13].

Экспериментально исследовано поведение левитирующих одиночных капель и капельных кластеров в предстоящем потоке водяного пара и увлеченного воздуха, и лабораторные наблюдения оказались полезными для понимания этого специфического явления [15-18].

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

2.1 Постановка задачи и описание математической модели

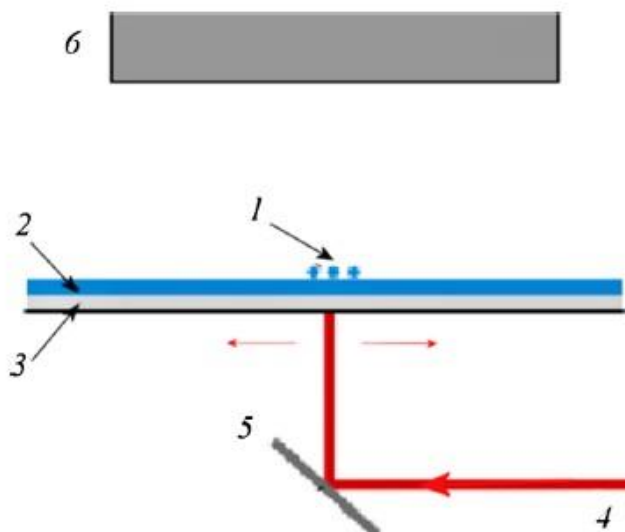


Рис. 1. Схема лабораторной установки, вид сбоку (1-капельный кластер, 2-слой воды, 3-ситалловая подложка с черной нижней поверхностью, 4-лазерный луч, 5- MEMS – зеркало, 6- объектив микроскопа).

Рассматривается слой жидкости 2, находящийся на ситалловой подложке 3. Снизу на ситалловую подложку направляется лазерный пучок мощностью W . Необходимо рассчитать временные зависимости температуры в капельном кластере в зависимости от изменения воздействия на лазер различными импульсами мощности: треугольным, прямоугольным, синусоидальным.

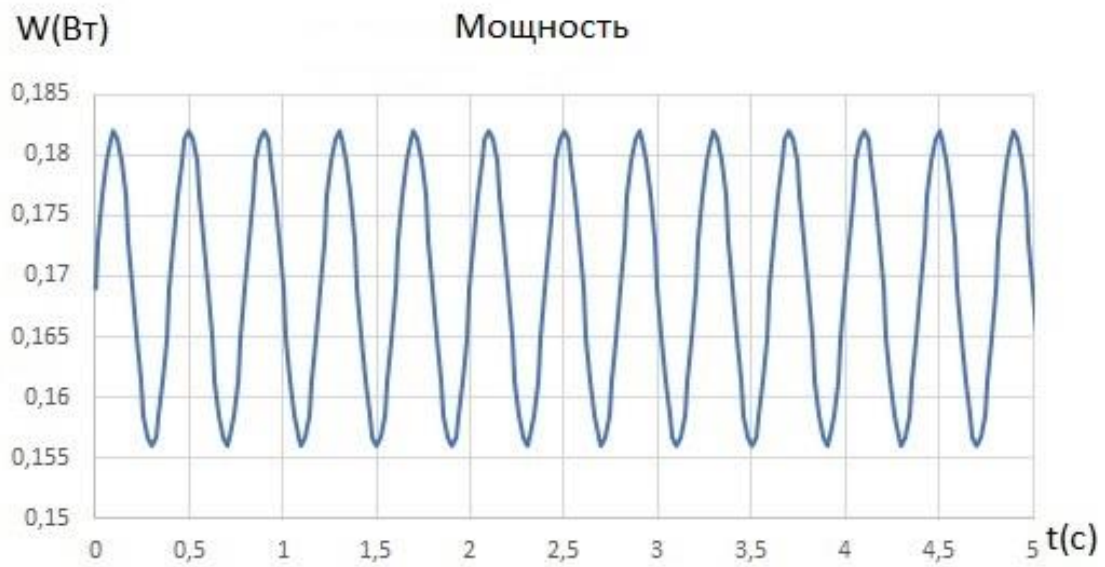


Рис. 2. Синусоидальный импульс

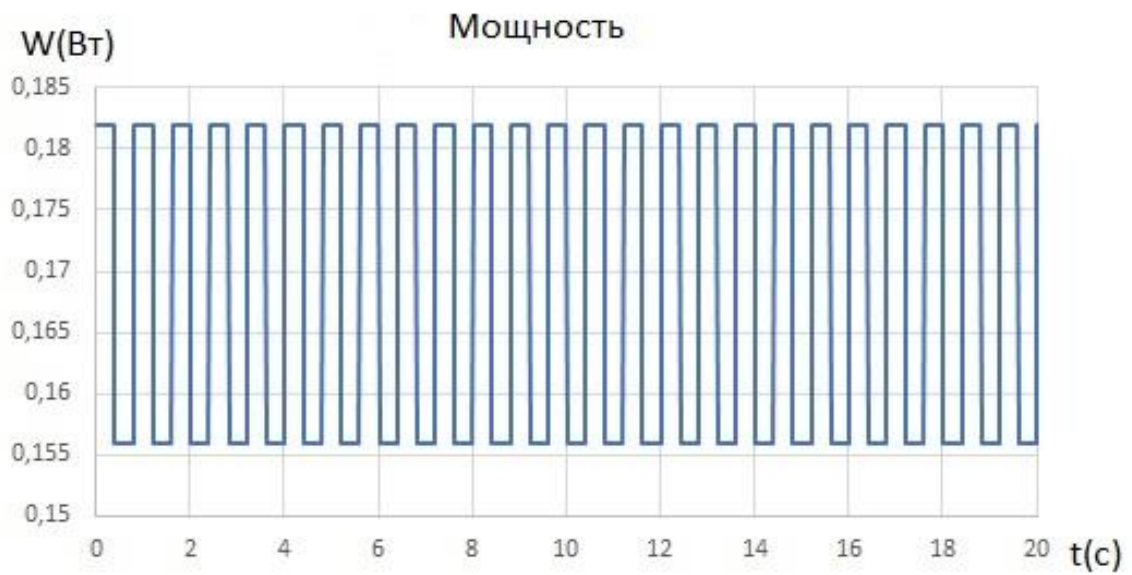


Рис. 3. Прямоугольный импульс

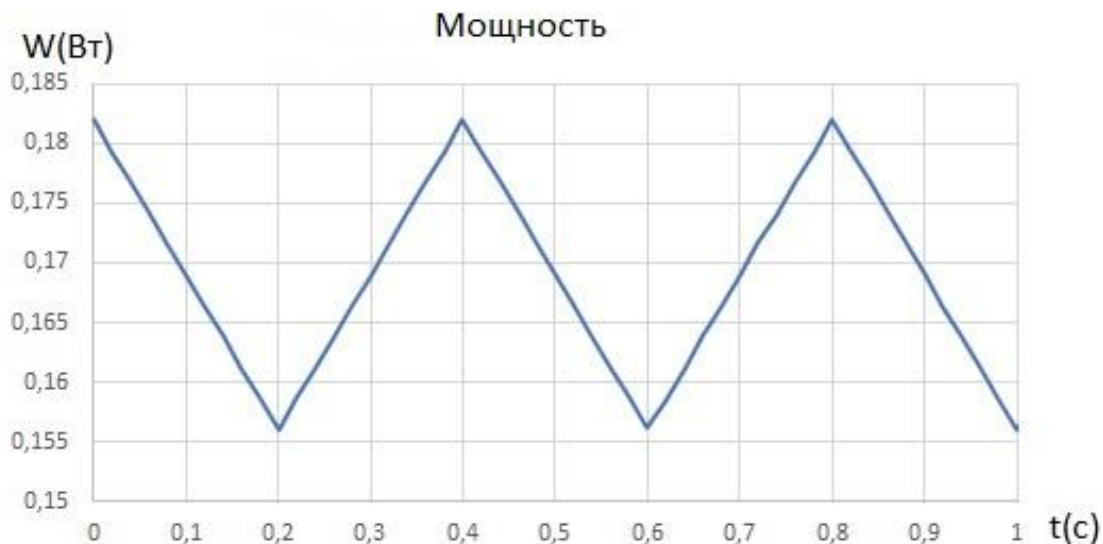


Рис. 4. Треугольный импульс

Согласно паспортной документации поток излучения по сечению лазерного луча описывается распределением Гаусса:

$$\tilde{W}(x, y) = \frac{A}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (2.1.1)$$

Параметр A определяется из условия нормировки

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{W}(x, y) dx dy \quad (2.1.2)$$

Где, при подстановке (2.1.1) в (2.1.2) получаем

$$W = \frac{A}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \iint \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} dx dy \quad (2.1.3)$$

После интегрирования имеем:

$$W = \frac{A}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \sqrt{2\pi}\sigma_x \sqrt{2\pi}\sigma_y = A \quad (2.1.4)$$

При переходе к цилиндрическим координатам перепишем выражение (2.1.1) в виде:

$$\tilde{W}(r) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{\sigma^2}\right\} \quad (2.1.5)$$

Из паспорта известно, что

$$\tilde{W}(r_b) = \frac{A}{2\pi\sigma^2 e^2}, \quad (2.1.6)$$

где $r_b = 0.395 \text{ mm}$, число $e \approx 2.7$. С учётом (2.2.5) и (2.2.6) имеем

$$\exp\left(-\frac{r_b^2}{\sigma^2}\right) = e^{-2}. \quad (2.1.7)$$

Получаем $\sigma = r_b / \sqrt{2}$. Перепишем формулу (2.2.5) в следующем виде

$$\tilde{W}(r) = \frac{W}{\pi r_b^2} \exp\left\{-\frac{2r^2}{r_b^2}\right\}. \quad (2.1.8)$$

где w – мощность лазера.

Согласно паспорту лазера расходимость луча равна $\alpha = 1.38 \text{ mRad}$. Расстояние от лазерного источника до ситалловой подложки в эксперименте $l = 0.53 \text{ m}$. Тогда размывание лазерного луча можно рассчитать как

$$r_1 = l \cdot \text{tg}(\alpha / 2) = 0.366 \text{ mm}. \quad (2.1.9)$$

Таким образом, распределение потока излучения на поверхности ситалловой подложки описывается следующей зависимостью:

$$q_{\text{rad}} = \frac{W}{\pi (r_b + 3.66 \cdot 10^{-4})^2} \exp\left\{-\frac{2r^2}{(r_b + 3.66 \cdot 10^{-4})^2}\right\}. \quad (2.1.10)$$

В начальный момент времени температура ситалловой подложки слоя воды равны $T_0 = 294 \text{ K}$. Лазерное излучение поглощается на зачерненной поверхности ситалловой подложки. Распространение тепла в подложке и слое воды происходит исключительно в результате теплопроводности. Строго говоря, распределение потока излучения по сечению лазерного луча не

является симметричным оси луча. Вместе с тем, благодаря относительно малой площади поперечного сечения луча, поле температуры в подложке и слое воды с высокой точностью можно считать осесимметричным.

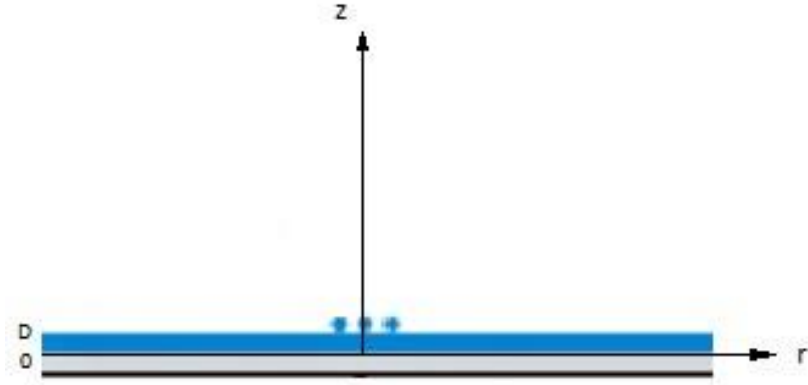


Рис.5. Рассматриваемый горизонтальный тонкий слой жидкости при локальном нагреве у основания

При этом уравнение теплопроводности и граничные условия имеют следующий вид [29,30,31]:

$$\rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} = r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_w r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.1.11 \text{ a})$$

$$0 < r < R \quad 0 < z < D = d_s + d_w, \quad (2.1.11 \text{ b})$$

$$z = 0 \quad -k_s \frac{\partial T}{\partial z} = h_1(T_0 - T) + q_{rad}, \quad (2.1.11 \text{ c})$$

$$z = D \quad k_w \frac{\partial T}{\partial z} = h_2(T_0 - T), \quad (2.1.11 \text{ d})$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad r = R, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (2.1.11 \text{ e})$$

$$h_1 = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad h_2 = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \quad (2.1.11 \text{ f})$$

где $k_s = 1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – теплопроводность ситалла, $\rho_s = 2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ – плотность ситалла, $c_s = 745 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – удельная теплоёмкость ситалла, $d_s = 400 \text{ }\mu\text{m}$ – толщина ситалловой подложки, $d_w = 400 \text{ }\mu\text{m}$ – толщина слоя воды, h_1, h_2 – коэффициент теплоотдачи, $R = 6 \text{ mm}$ – размер расчётной области r [8].

Зависимости коэффициента теплопроводности, плотности и удельной теплоёмкости ситалла от температуры не учитываются, а для воды используются следующие аналитические аппроксимации

$$k_W(T) = 0.49429 + 0.00593T - 7.45281 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (2.2.12)$$

$$\rho_W(T) = 757 + 1.86T - 3.54 \cdot 10^{-3}T^2 \quad (2.2.13)$$

$$c_W(T) = 10536.10546 - 55.26131T + 0.15818T^2 - 1.48681 \cdot 10^{-4}T^3 \quad (2.2.14)$$

Зависимости параметров воды от температуры в выражениях (2.2.12) - (2.2.14) получены путём аппроксимации экспериментальных данных [12].

2.2 Обоснование выбора среды программирования

Для написания программы был выбран язык программирования C, потому что, во-первых, он поддерживает практически все современные концепции программирования, одновременно он лишен многих недостатков, на которые указывают эксперты, анализируя процесс программирования на других языках. К таким недостаткам относят и сложность синтаксиса, и недостаточную гибкость. Во-вторых, программируя на C не нужно постоянно думать о проблемах, связанных с выделением и освобождением памяти для переменных программы. В-третьих, программный код на языке программирования C легко можно перевести на любой другой язык программирования. Программное окружение C – это программная платформа Microsoft.NET Framework, “оборудованная” сборщиком мусора, который в фоновом режиме следит за тем, какие данные используются программой, а какие уже нет, и вовремя освобождает ненужные участки.

Исследование данных предметных областей используют посредством таких широко известных прикладных пакетов: MATLAB, Comsole, OpenFoam. Их достоинствами являются устойчивость методов, готовые пакеты. Однако, когда необходимо проводить принципиально новые исследования, данные пакеты могут оказаться несостоятельными. Например, если изучать

химические процессы в капельном кластере, необходимо построение моделей с использованием физической кинетики, химии, что в этих пакетах не реализуемо. Именно поэтому в данной работе был выбран язык программирования С.

2.3 Численная реализация

Для расчета температуры был выбран метод Кранка-Николсона, потому что благодаря ему можно выполнять в разы меньше вычислительной работы для расчетов на одном и том же временном слое. Порядок аппроксимации разностной схемы Кранка–Николсона выше, чем порядок аппроксимации неявной разностной схемы, которая была использована для расчетов в статье [8], и результаты, получаемые при использовании разностной схемы Кранка–Николсона, более точные.

Будем аппроксимировать уравнение (2.1.11 а) следующими разностными операторами:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{1}{2} [F_{i,j}^{n+1} - F_{i,j}^n] \quad (2.3.1)$$

Дискретный аналог получим путем интегрирования уравнения (2.1.11 а) по контрольному объему и по времени, получаем:

$$\begin{aligned} \iiint_{i-1, j-\frac{1}{2}, n}^{i+1, j+\frac{1}{2}, n+1} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} r dt dz dr = \iiint_{i-1, j-\frac{1}{2}, n}^{i+1, j+\frac{1}{2}, n+1} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) dt dz dr + \\ \iiint_{i-1, j-\frac{1}{2}, n}^{i+1, j+\frac{1}{2}, n+1} r \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dt dz dr \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Получаем:

$$\begin{aligned} (\rho^{n+1} c^{n+1} T_{i,j}^{n+1} - \rho^n c^n T_{i,j}^n) \Delta V = \Delta t [\Delta z \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} + 0.5 \Delta r (r_{i+\frac{1}{2}} + \\ r_{i-\frac{1}{2}}) \left(\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \right)] \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Преобразовывая, получаем:

$$\frac{\rho^{n+1}c^{n+1}T_{i,j}^{n+1}-\rho^n c^n T_{i,j}^n}{\Delta t} \Delta V = \Delta z \left[k_{i+\frac{1}{2}} r_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1,j}-T_{i,j}}{\Delta t} \right] + \left(r_{i+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}} \right) 0.5 \Delta r \left[k_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{T_{i,j}-T_{i,j-1}}{\Delta t} \right], \quad (2.3.4)$$

где $\Delta V = \left(r_{i+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}} \right) 0.5 \Delta r \Delta z$, $\Delta V = r_{i,j} 0.5 \Delta r \Delta z$, если точка i,j лежит по середине между границами контрольного объема, $\Delta r = \left(r_{i+\frac{1}{2},j} + r_{i-\frac{1}{2},j} \right)$.

Далее подставляя, получаем:

$$\frac{\rho^{n+1}c^{n+1}T_{i,j}^{n+1}-\rho^n c^n T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{k_{i+\frac{1}{2},j} r_{i+\frac{1}{2},j}}{0.5 \left(r_{i+\frac{1}{2},j} + r_{i-\frac{1}{2},j} \right)} \frac{T_{i+1,j}-T_{i,j}}{\Delta r^2} - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j} r_{i-\frac{1}{2},j}}{0.5 \left(r_{i+\frac{1}{2},j} + r_{i-\frac{1}{2},j} \right)} \frac{T_{i,j}-T_{i-1,j}}{\Delta r^2} + k_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1,j}-T_{i,j}}{\Delta z^2} - k_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{T_{i,j}-T_{i,j-1}}{\Delta z^2}, \quad (2.3.5)$$

где $r_{i+\frac{1}{2},j} = 0.5(r_{i,j} + r_{i+1,j})$, $r_{i-\frac{1}{2},j} = 0.5(r_{i-1,j} + r_{i,j})$, $k_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{2k_{i,j}k_{i+1,j}}{k_{i,j}+k_{i+1,j}}$, $k_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{2k_{i-1,j}k_{i,j}}{k_{i-1,j}+k_{i,j}}$

Распишем функции для удобства и подстановки в (2.3.1):

$$F_{i,j}^n = a_{i+1,j} T_{i+1,j}^n + a_{i-1,j} T_{i-1,j}^n + a_{i,j-1} T_{i,j-1}^n + a_{i,j+1} T_{i,j+1}^n - a_{i,j} T_{i,j}^n, \quad (2.3.6)$$

$$F_{i,j}^{n+1} = a_{i+1,j} T_{i+1,j}^{n+1} + a_{i-1,j} T_{i-1,j}^{n+1} + a_{i,j-1} T_{i,j-1}^{n+1} + a_{i,j+1} T_{i,j+1}^{n+1} - a_{i,j} T_{i,j}^{n+1}, \quad (2.3.7)$$

$$\text{где } a_{i+1,j} = \frac{k_{i+\frac{1}{2},j} r_{i+\frac{1}{2},j}}{r_{i,j} \Delta r^2}, a_{i-1,j} = \frac{k_{i-\frac{1}{2},j} r_{i-\frac{1}{2},j}}{r_{i,j} \Delta r^2}, a_{i,j+1} = \frac{k_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2}, a_{i,j-1} = \frac{k_{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta z^2},$$

$$a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1}.$$

Тогда, уравнение (2.1.11a), используя (2.3.1) в разностной форме можно расписать:

$$\frac{\rho^{n+1}c^{n+1}T_{i,j}^{n+1}-\rho^n c^n T_{i,j}^n}{\Delta t} = 0.5[F_{i,j}^{n+1} + F_{i,j}^n] \quad (2.3.8)$$

$$a_{i,j}^* T_{i,j}^{n+1} = a_{i+1,j}^* T_{i+1,j}^{n+1} + a_{i-1,j}^* T_{i-1,j}^{n+1} + a_{i,j+1}^* T_{i,j+1}^{n+1} + a_{i,j-1}^* T_{i,j-1}^{n+1} + b, \quad (2.3.9)$$

$$\text{где } a_{i,j}^* = \frac{\rho^{n+1} c^{n+1}}{\Delta t} + \frac{a_{i,j}}{2}, \quad b = \frac{\rho^n c^n T_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} F_{i,j}^n, \quad a_{i+1,j}^* = \frac{a_{i+1,j}}{2}, \quad a_{i-1,j}^* = \frac{a_{i-1,j}}{2}, \quad a_{i,j+1}^* = \frac{a_{i,j+1}}{2}, \quad a_{i,j-1}^* = \frac{a_{i,j-1}}{2}.$$

2) Разностные схемы для начальных условий:

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial z} = h_1 (T_0 - T + q_{rad}) \quad z = 0 \quad (2.3.10)$$

$$-k_s \frac{T_{i,1}^n - T_{i,0}^n}{\Delta z} = h_1 (T_{i,0}^0 - T_{i,0}^n + q_{rad}) \quad (2.3.11)$$

$$\frac{k_s}{\Delta z} T_{i,0}^n + h_1 T_{i,0}^n = h_1 T_{i,0}^0 + \frac{k_s}{\Delta z} T_{i,1}^n + q_{rad} \quad (2.3.12)$$

Выражая $T_{r,0}^0$, получаем

$$T_{i,0}^n = \frac{h_1 T_{i,0}^0 + \frac{k_s}{\Delta z} T_{i,1}^n + q_{rad}}{\frac{k_s}{\Delta z} + h_1} \quad (2.3.13)$$

3) Разностные схемы для граничных условий:

$$-k_w \frac{\partial T}{\partial z} = h_2 (T - T_0) \quad z = D \quad (2.3.14)$$

$$-k_w \frac{T_{i,D}^n - T_{i,D-1}^n}{\Delta z} = h_2 (T_{i,D}^0 - T_{i,D}^n) \quad (2.3.15)$$

$$\frac{k_w}{\Delta z} T_{r,D}^n - h_2 T_{i,D}^n = \frac{k_w}{\Delta z} T_{i,D-1}^n - h_2 T_{i,D}^0 \quad (2.3.16)$$

$$T_{r,D}^n = \frac{\frac{k_s}{\Delta z} T_{r,D-1}^n - h_2 T_{r,D}^0}{\frac{k_s}{\Delta z} - h_2} \quad (2.3.17)$$

$$4) r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.3.18)$$

$$\frac{T_{1,j}^n - T_{0,j}^n}{\Delta r} = 0 \quad (2.3.19)$$

$$T_{0,j}^n = T_{1,j}^n \quad (2.3.20)$$

$$5) r = R, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.3.21)$$

$$\frac{T_{R,j}^n - T_{R-1,j}^n}{\Delta r} = 0 \quad (2.3.22)$$

$$T_{R,j}^n = T_{R-1,j}^n \quad (2.3.23)$$

ГЛАВА III. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В написанной программе предусмотрена возможность задания прямоугольных импульсов лазерного источника, синусоидальных и треугольных с варьируемыми значениями длительности верхнего и нижнего значения мощности. Все полученные расчеты выгружались в Excel и по данным строились графики зависимости температуры капельного кластера от времени.

На рисунке 6, 7, 8 приведены временные зависимости температуры поверхности воды при воздействии треугольным импульсом с различным периодом мощности (τ_w): 1.8 с., 0.9 с., 0.4 с. соответственно.

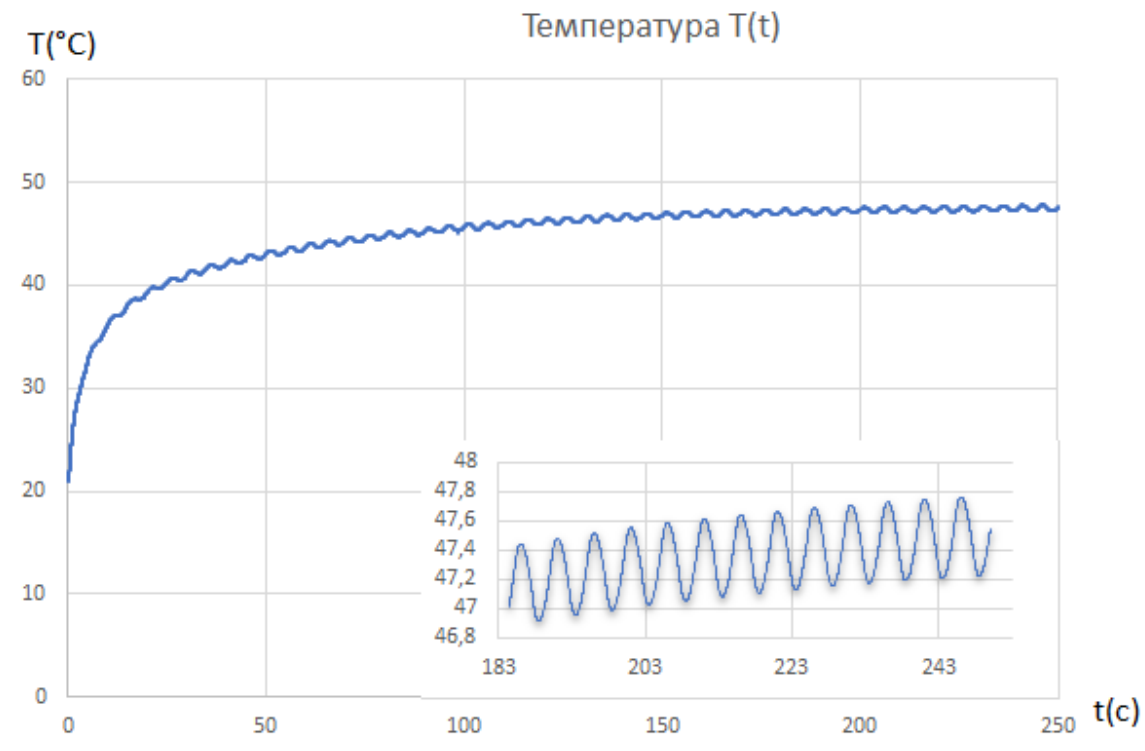


Рис. 6. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии треугольным импульсом при $\tau_w=1.8$ с

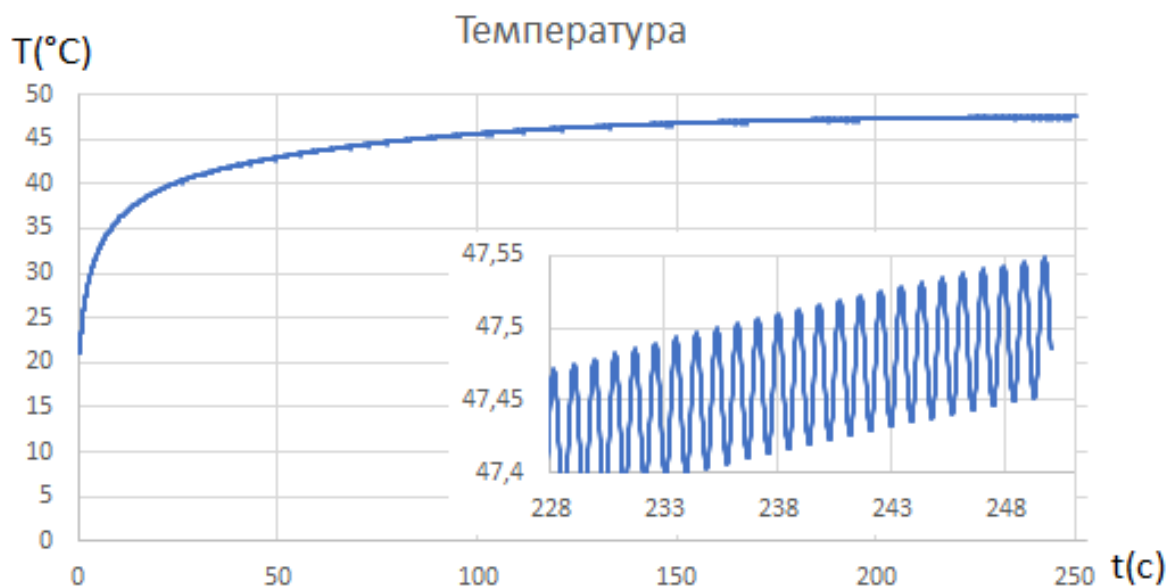


Рис. 7. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии треугольным импульсом при $\tau_w=0.9$ с

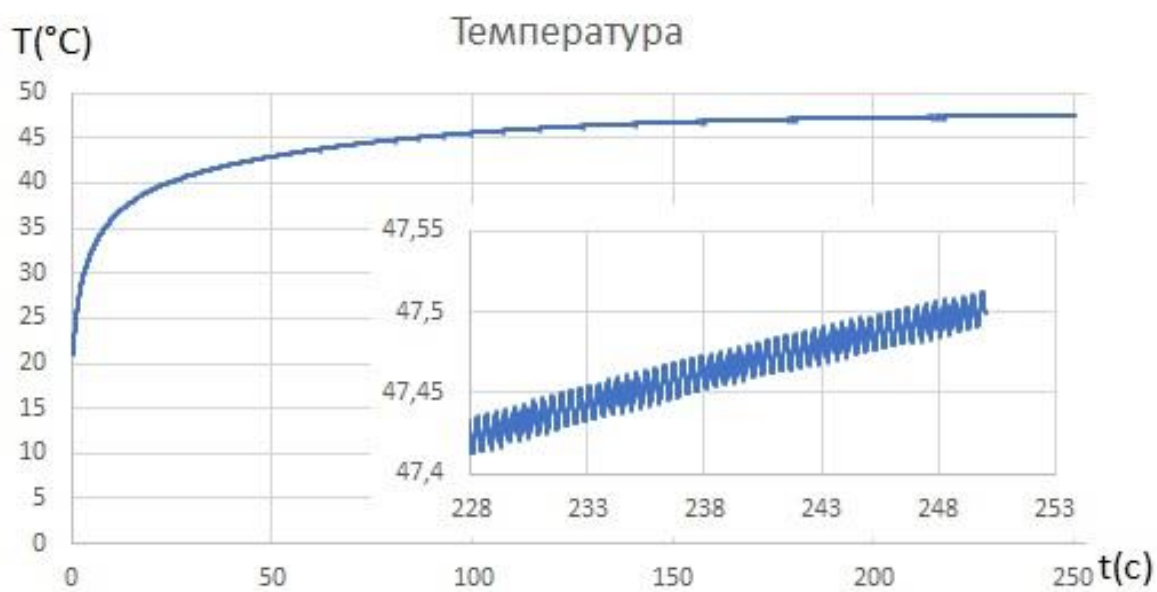


Рис. 8. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии треугольным импульсом при $\tau_w=0.4$ с

Анализируя кривую температуры, можно сделать вывод, что спустя 150 секунд наступает стационарный режим.

Можно сказать, что время релаксации при изменении длительности входного импульса практически не изменяется. Внутренняя область каждого

рисунка соответствует уровню наблюдаемых незначительных колебаний измеряемой температуры (с амплитудой около $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$) при нагреве с воздействием треугольного импульса.

На рисунке 9, 10, 11 приведены временные зависимости температуры поверхности воды при воздействии синусоидальным импульсом с различным периодом 1.8 с., 0.9 с., 0.4 с. соответственно.

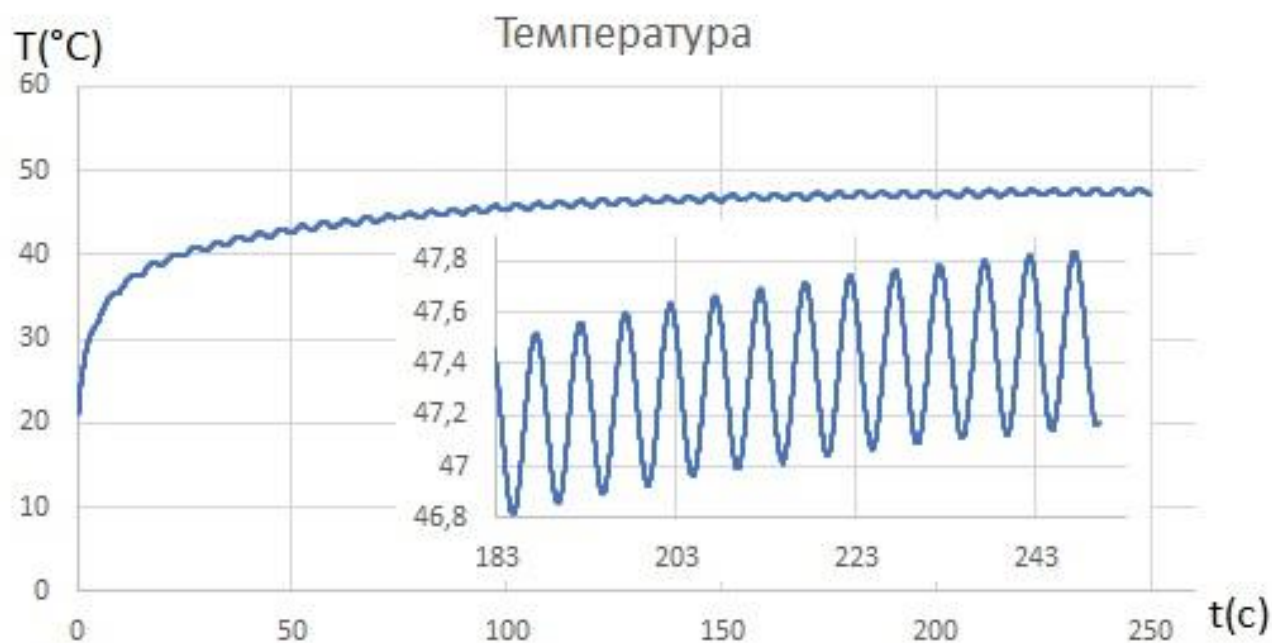


Рис.9. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии синусоидальным импульсом $\tau_w=1.8\text{ с}$

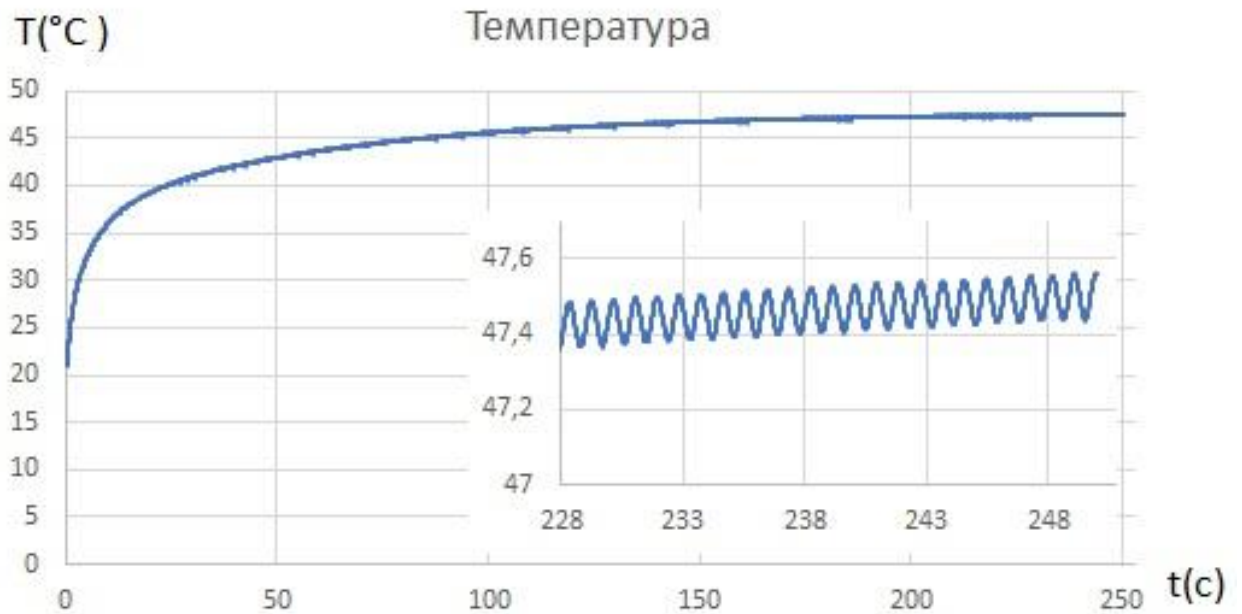


Рис.10. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии синусоидальным импульсом при $\tau_w=0.9$ с

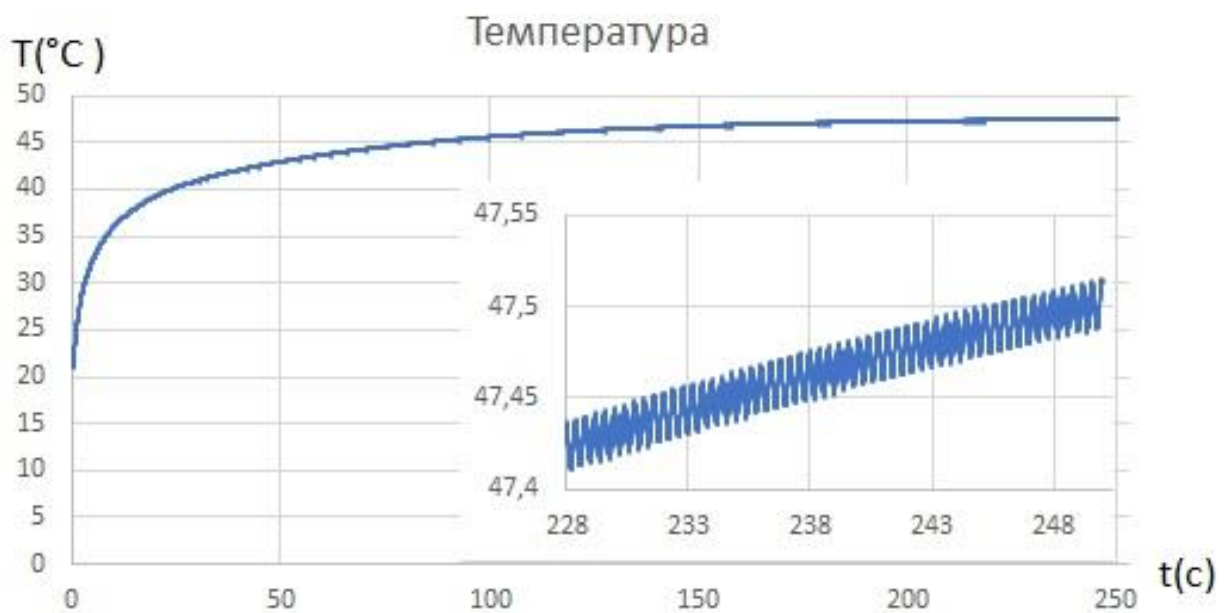


Рис.11. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии синусоидальным импульсом при $\tau_w=0.4$ с

Из рисунка видно, что стационарный режим колебания температуры наступает спустя определенное время релаксации, приблизительно – 150 секунд. Причем время релаксации практически не меняется при изменении

времени длительности входного импульса. Значительная теплоемкость подложки и слоя воды приводит к тому, что ΔT и колебания температуры поверхности воды сглаживаются. Можно наблюдать незначительные колебания измеряемой температуры (с амплитудой около $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$) при нагреве воздействием лазера с синусоидальным импульсом мощности.

На рисунке 12, 13, 14 приведены временные зависимости температуры поверхности воды при воздействии прямоугольным импульсом с различным периодом 1.8 с., 0.9 с., 0.4 с. соответственно.

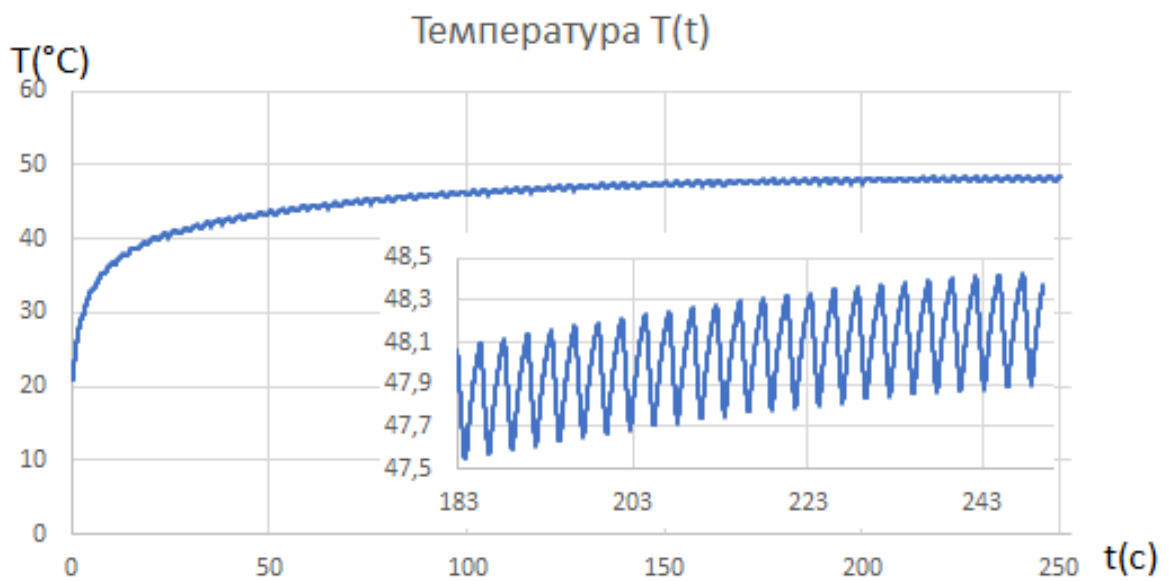


Рис.12. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии прямоугольным импульсом $\tau_w=1.8\text{ с}$

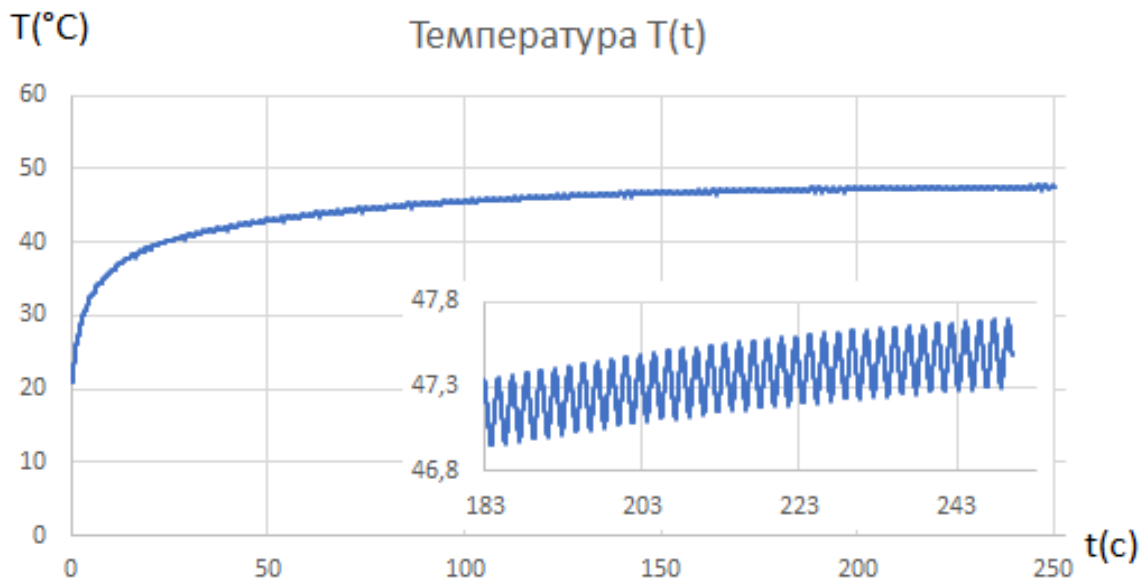


Рис.13. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии прямоугольным импульсом при $\tau_w=0.9$ с

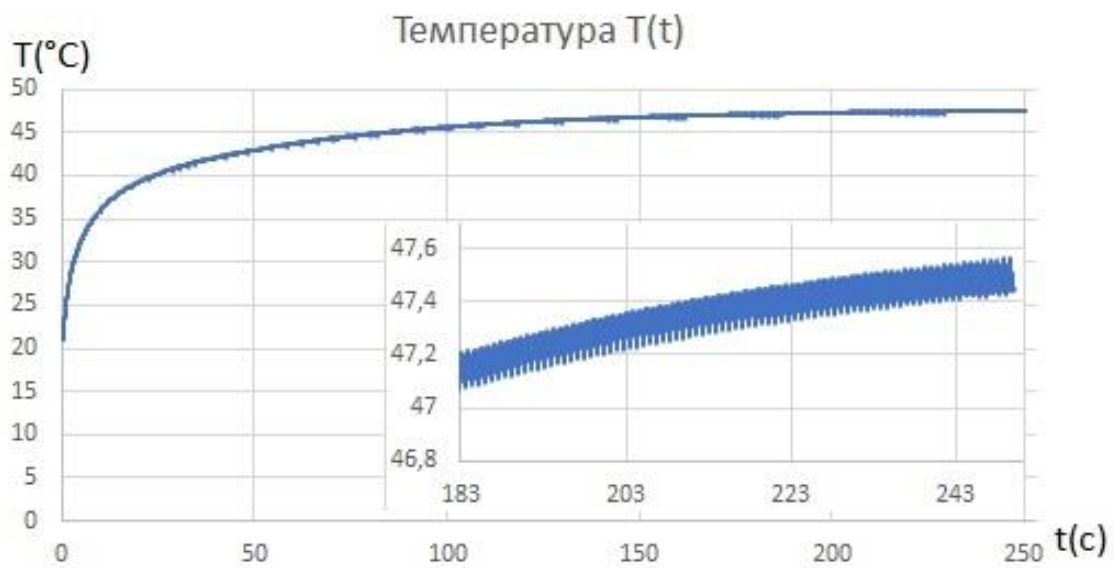


Рис.14. Расчетные пульсации температуры воды при воздействии прямоугольным импульсом при $\tau_w=0.4$ с

Рисунок показывает, после 150 секунд наступает стационарный режим колебания температуры, при изменении времени длительности входного импульса, причем время релаксации практически не меняется при изменении времени длительности входного импульса. Колебания температуры поверхности воды сглаживаются и ΔT уменьшается с уменьшением периода

мощности лазера. Внутренние рисунки соответствует уровню незначительных колебаний измеряемой температуры (с амплитудой около $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$) при нагреве с прямоугольной мощностью лазера.

Следует отметить, что регистрируемые основные колебания температуры при воздействии каждым импульсом находятся на уровне десятых долей градуса, что составляет около 1 % от средней по времени температуры поверхности воды, тогда как глубина модуляции мощности лазерного нагрева ΔW существенно больше: 25 % от W_{max} .

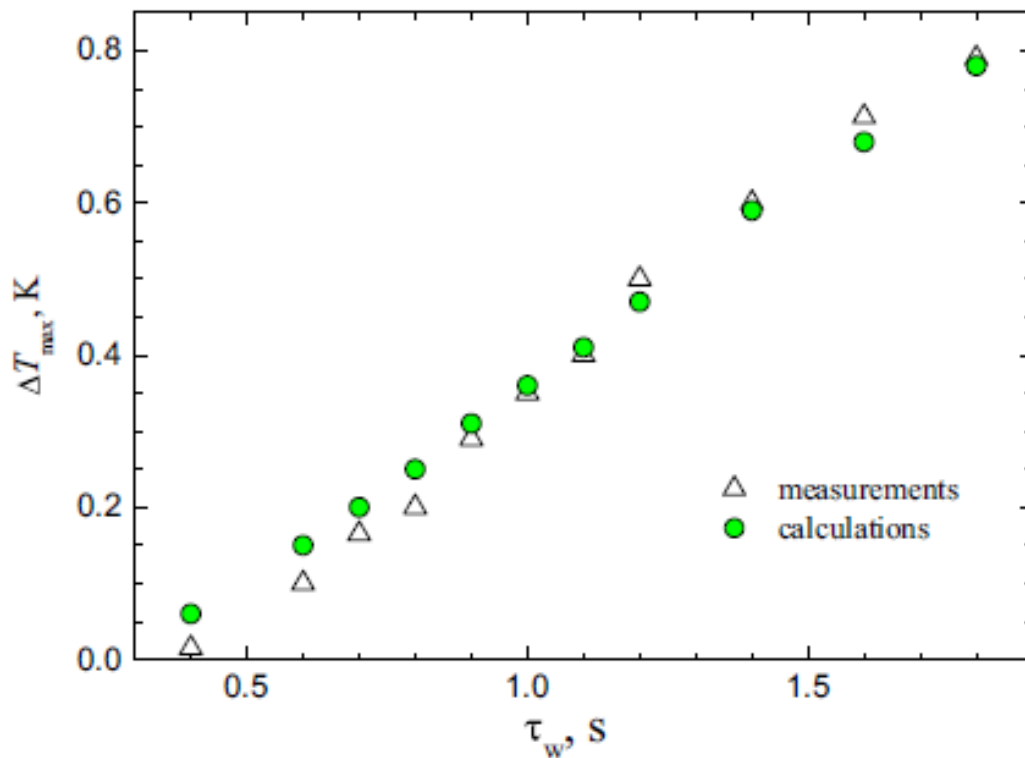


Рис.15. Влияние изменения периода мощности на температуру [8] (треугольные символы-экспериментальные данные, закрашенные-вычислительные)

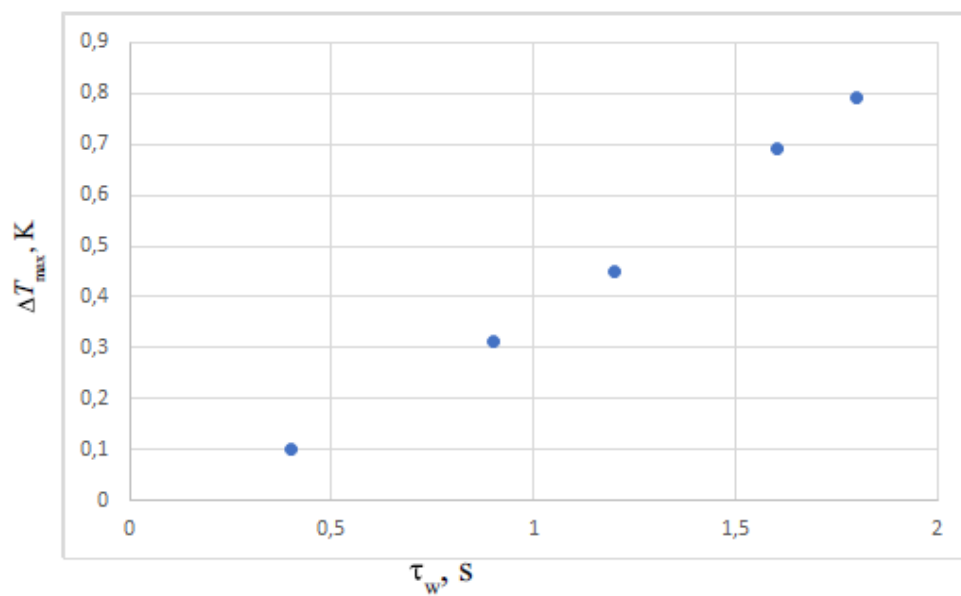


Рис.16. Влияние изменения периода мощности на разность температуры при воздействии прямоугольного импульса

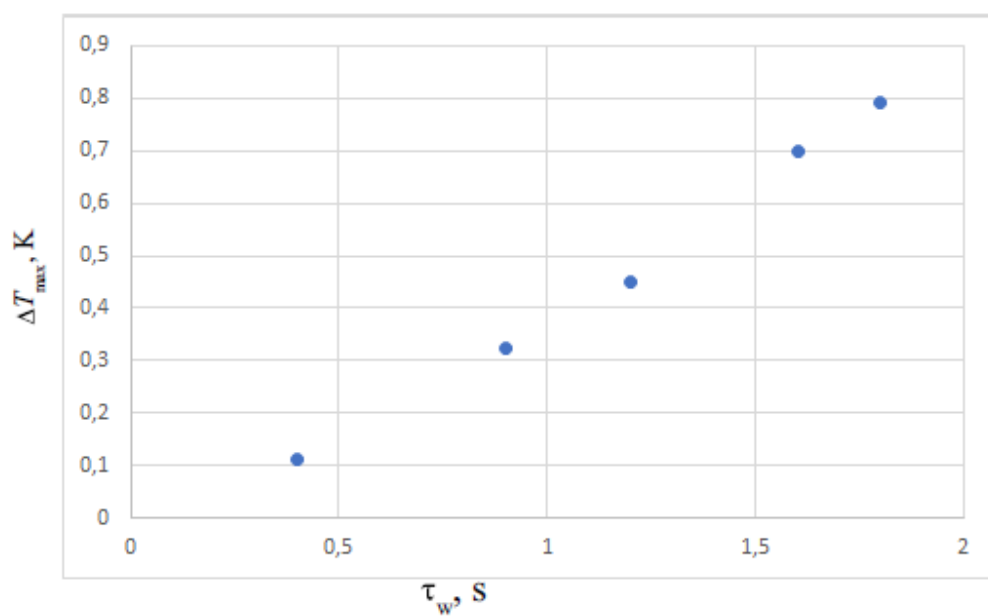


Рис.17. Влияние изменения периода мощности на температуру при воздействии синусоидального импульса

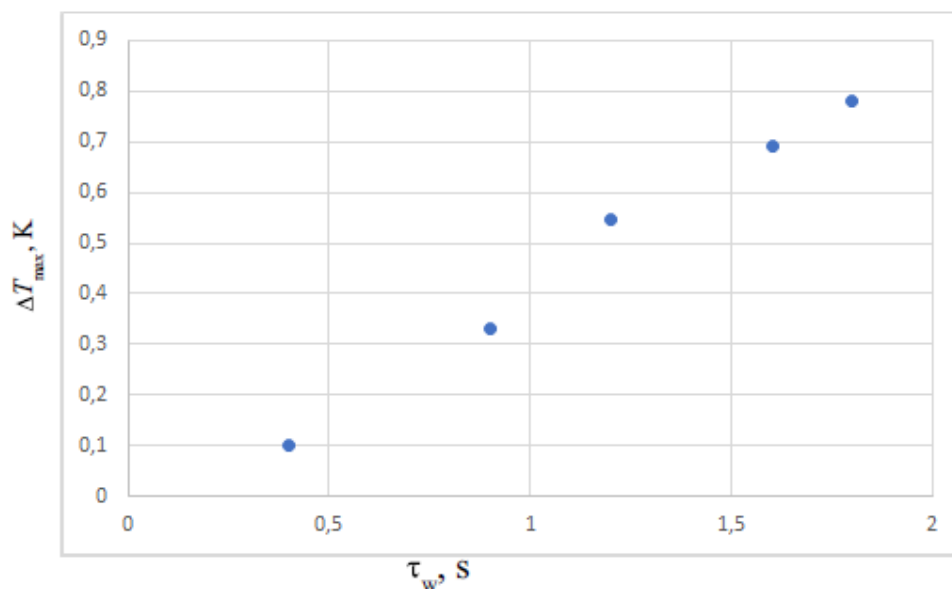


Рис.18. Влияние изменения периода мощности на температуру при воздействии треугольного импульса

Сравнивая полученные результаты в работе и результаты, описанные в статье, можно сказать, что существует хорошее согласие между численными и экспериментальными данными. Из рисунка видно, что ΔT уменьшается пропорционально τ_w , из-за значительной теплоемкости подложки и полученные данные в работе практически совпадают с данными статьи, но являются более точными, в виду того, что вычисления производились по численной схеме, которая дает более точные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы была построена математическая модель распределения температуры жидкости в тонком слое, находящемся на ситалловойложке, также был выполнен численный расчет температур методом Кранка-Николсона в тонком слое жидкости при изменении мощности лазерного источника, позволяющий сравнить результаты с экспериментальными данными из статьи [8]. Было установлено, что форма входного сигнала импульса мощности практически не влияет на изменение температуры капельного кластера, а, следовательно, не влияет на рост капель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beatus T., Bar-Ziv R. H., Tlusty. T. The Physics of 2D Microfluidic Droplet Ensembles//Phys. Rep. —2012. 516.—P.103–145.
2. Stone H. A., Stroock A. D., Ajdari A. Engineering Flows in Small Devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-chip//Annu. Rev. Fluid Mech.—2004. 36.—P.381–411.
3. Agresti J., Antipov E., Abate E., Ahn K., Rowat A., Baret J., Marquez M., Klibanov A., Griffiths A., Weitz D. Ultrahighthroughput Screening in Drop-based Microfluidics for Directed Evolution//Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. —2010. 107. —P.4004–4009.
4. Song H., Tice J., Ismagilov R. A Microfluidic System for Controlling Reaction Networks in Time//Angew. Chem.—2003.115.—P. 792–796.
5. Taniguchi T., Torii T., Higuchi T. Chemical Reactions in Microdroplets by Electrostatic Manipulation of Droplets in Liquid Media//Lab Chip. — 2002.2. — P.19–23.
6. Joensson H. N., Samuels M. L., Brouzes E. R., Medkova M., Uhlén, M., Link, D. R., Andersson-Svahn H. Detection and Analysis of Low-Abundance Cell-Surface Biomarkers Using Enzymatic Amplification in Microfluidic Droplets. Angew//Chem., Int. Ed.—2009. 48.—P.2518–2521.
7. Juul S., Harmsen C., Nielsen M. J., Stougaard M., Leong R. W., Knudsen B. R., Ho, Y.-P. Single Cell Enzyme Diagnosis on the Chip. //In Proc. 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS-2013) IEEE: Taipei. — 2013. —P.911–914.
8. Fedorets A.A., Aktaev N.E., Dombrovsky L.A. Suppression of the condensational growth of droplets of a levitating cluster using the modulation of the laser heating power//International Journal of Heat and Mass Transfer. —2018. 127. —P.660-664.

9. Fedorets A.A., Frenkel M., Bormashenko E., Nosonovsky M. Small Levitating Ordered Droplet Clusters: Stability, Symmetry, and Voronoi Entropy // *Journal of Physical Chemistry Letters*. — 2017. V. 8. — P. 5599–5602.

10. Федорец А. А. Эффекты тепломассопереноса при локальном нагреве межфазной поверхности жидкость-газ: дисс. канд. физ.-матем. наук. — Тюмень, 2011.

11. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A., Ryumin P.I. Expanding the temperature range for generation of droplet clusters over the locally heated water surface//*Int. J.Heat Mass Transfer*. — 2017.113. — P.1054–1058.

12. Fedorets A.A., Frenkel M., Shulzinger E., Dombrovsky L.A., Bormashenko E., Nosonovsky M. Self-assembled levitating clusters of water droplets: Patternformation and stability// *Sci. Rep.*—2017.7.—P.113-116.

13. Федорец А.А. Механизм рассеяния энергии капельным кластером//*Письма в ЖЭТФ*. —2011.79. — С.457-459.

14. Jean-Marie Lehn. Toward Self-Organization and Complex Matter// *Science* 29 —.2002, Vol. 295, Issue 5564. —P.2400-2403.

15. Surrey T., Nédélec F., Leibler S., Karsenti E. Physical Properties Determining Self-Organization of Motors and Microtubules // *Science*. — 2001, Vol. 292, Issue 5519. —P.1167-1171.

16. Phillips C. B., Jerolmack D. J. Self-organization of river channels as a critical filter on climate signals // *Science*. — 2016, Vol. 352, Issue 6286. —P. 694-697.

17. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A. Self-assembled stable clusters of droplets over the locally heated water surface: milestones of the laboratory study and potential biochemical applications// *Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-16)*. —2018, Beijing, China, keynote lecture IHTC16-KN17.

18. Fedorets A.A. Droplet cluster// *JETP Lett.* – 2004. 79. – P.372–374.

19. Fedorets A.A. On the mechanism of non-coalescence in a drop cluster// *JETP Lett.* – 2005. 81.–P.437–441.

20. Arinstein E.A., Fedorets A.A. Mechanism of energy dissipation in a droplet cluster// JETP Lett. –2010.92. –P.658–661.
21. Fedorets A.A., Marchuk I.V., Kabov O.A. Role of vapor flow in the mechanism of levitation of a droplet cluster dissipative structure// Tech. Phys. Lett. –2011.37 (3). – P.116–118.
22. Fedorets A.A. Mechanism of stabilization of location of a droplet cluster above the liquid–gas interface// Tech. Phys. Lett. –2012.38 (11). –P.988–990.
23. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A., Smirnov A.M. The use of infrared self-emission measurements to retrieve surface temperature of levitating water droplets// Infrared Phys. Technol. –2015.69. – P. 238–243.
24. Dombrovsky L.A., Fedorets A.A., Medvedev D.N. The use of infrared irradiation to stabilize levitating clusters of water droplets// Infrared Phys. Technol. –2016.75. – P.124–132.
25. Fedorets A.A., Frenkel M., Bormashenko E., Nosonovsky M. Small levitating ordered droplet clusters: stability, symmetry, and Voronoi entropy// J. Phys. Chem. Lett. – 2017.8 (22). – P.5599–5602.
26. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A. Generation of levitating droplet clusters above the locally heated water surface: a thermal analysis of modified installation// Int. J. Heat Mass Transfer. – 2017.104. – P.1268–1274.
27. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A., Shcherbakov D.V. New experimental results on dynamics of droplet clusters levitating over the locally heated water surface// Int. Heat Transfer Conf. – 2018. – Paper IHTC16-22228.
28. Dombrovsky L.A., Sazhin S.S. A simplified non-isothermal model for droplet heating and evaporation//Int. Comm. Heat Mass Transfer. – 2003.30 (6). – P.787–796.
29. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах.-М.: ИД МЭИ. 2003. –С. 312
30. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. –М.: Наука.1989. – С.429.

31. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.
– М.: "Наука 1977. – С.735.

Приложение

1) MAIN_CONSTANT

```
#include <time.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define pi                3.1415926535

#define T0                294.                //
Начальная температура, К
#define r_max            6.e-3                // m
#define t_max            250.//
#define z_max_SITALL    400.e-6              // m
#define z_max_H2O       800.e-6              // m
#define Beam_diam        0.79e-3
Beam diameter [m]
#define key_LASER        1        1-GAUSS
#define key_MODUL        1

#define t_step            2.e-4
// sec
#define t_print_pulse    0.02                // sec
просто вывод на экран.
#define r_step            0.1e-3              // m
#define z_step            20.e-6              // m

////////////////////////////////////
#define alpha_SITALL     5.                //
параметр теплообмена W/m2/K
#define alpha_Water      30.                //
параметр теплообмена W/m2/K
#define tau_pulse_up     1.8                //
длительность импульса
#define tau_pulse_low    0.9
#define periode_sin     5.
#define periode_tri     5.//
#define LPower_UP        182.e-3            //
Laser power [W]
#define LPower_LOW       156.e-3            //
нижнее значение при модуляции
// молчание импульса
```

```

long i2, z_int_max, r_int_max, t_int_max, keySIT_H2O;

double t_curr, r_curr, z_curr, XX20[10], WW20[10],
TEMPERATURE[60100][70][50];
double irand,iRR, Nirand;
/***** TERMOPHYS_PAR_CURR *****/
double RHO_H2O (float T) ;
    // [T]=K [rho]=kg/m3
double RHO_SITALL (float T); //
[T]=K [rho]=kg/m3
double RHO (float T);
double SPECIFIC_HEAT_H2O (float T);
    // J/kg/K
double SPECIFIC_HEAT_SITALL (float T);
    //J/kg/K
double SPECIFIC_HEAT (float T);
double THERMAL_COND_H2O (float T);
double THERMAL_COND_SITALL (float T);
    // W/m/K
double THERMAL_COND (float T);
double THERMAL_DIFFUSIVITY (float T);
    // m2/sec                температуропроводность
/*****/

/*****/
void INI_COND ();
/*****/

/*****/
double LASER_POWER (double r, int key_Amp);
double LASER_POWER_GAUSS (double r, int key_Amp);
double LASER_POWER_UNIFORM (double r, int key_Amp);
    // [W/m]
double ENERGY_REL (double r, int key_Amp);
/*****/

/*****/
void TEMPER_FIELD ();
/*****/

/*****/
void TEMPER_FIELD_1 ();
/*****/

/*****/
void TEMPER_FIELD_2 ();

```

```

/*****/

/***** PRINTS_CURR *****/
void PRINT_TEMPER_CART ();
void PRINT_TEMPER_z_SIT_H2O ();
void PRINT_TEMPER_z_SIT_H2O ();
void PRINT_POWER_DISTR ();
/*****/

/***** STOHNUM_CURR *****/
double URAND1();
double GAUSS();
/*****/

#define output1      "TEMPER_CART.dat"
#define output2      "POWER_DISTR.dat"
#define output3      "TEMPER_SIT_WATER.dat"
#define output4      "TEMPER_PULSE_WATER.dat"
#define output5      "1.dat"
#define output6      "1.dat"

FILE *f1_ex, *f2_ex, *f3_ex, *f4_ex, *f5_ex, *f6_ex;

LASER_HEAT_POWER
double LASER_POWER_GAUSS (double r, int key_Amp)
    // [W/m2]
{
    double lp, sigma, A, r_beam;

    r_beam=Beam_diam/2.;

    sigma=(r_beam+0.35e-3)/sqrt(2.);

    if (key_Amp==1) A=LPower_UP;
    if (key_Amp==2) A=LPower_LOW;

    lp=A/(pow(sigma,2)*2.*pi)*exp(-pow(r,2)/pow(sigma,2));

    return (lp);
}
double LASER_POWER_UNIFORM (double r, int key_Amp)
    // [W/m2]
{

```

```

double lp, A, r_beam;
r_beam=Beam_diam/2.;

if (key_Amp==1) A=LPower_UP;
if (key_Amp==2) A=LPower_LOW;
lp=A/(pi*pow(r_beam,2));
if (r>r_beam) lp=0;
return (lp);
}
double LASER_POWER (double r, int key_Amp)
// [W/m2] q_rad
{
double lp;
if (key_LASER==1) lp=LASER_POWER_GAUSS (r,key_Amp);
if (key_LASER==2) lp=LASER_POWER_UNIFORM (r,key_Amp);
return (lp);
}
double ENERGY_REL (double r, int key_Amp)
// W/m2
{
double er;
er=LASER_POWER(r,key_Amp);
return(er);
}

```

1) DIFF_RECTANGLE

```

void TEMPER_FIELD ()
{
int i,j,k, key_Amp=1, count_up_low=0, int_up, int_low,
curr_mode;
double val, braket, T_curr, T_curr_rp1, T_curr_zp1,
N_t_print, add1=0, add2, add3, add4=0, add5;

int_up=ceil(tau_pulse_up/t_step);
int_low=ceil(tau_pulse_low/t_step);
curr_mode=int_up;
// начинается с верхнего значения импульса
N_t_print=t_print_pulse/t_step;

f4_ex=fopen(output4,"w");
fprintf(f4_ex,"time(sec),Temper(oC),alpSIT,alpWATER,tau
,LPower");

for (i=0;i<=t_int_max;i++)
{
t_curr=i*t_step;

```

```

for (j=1;j<r_int_max;j++)
// правая разностная форма
{
    for (k=1;k<z_int_max;k++)
    {
        r_curr=j*r_step;
        z_curr=k*z_step;

        T_curr=TEMPERATURE[i2][j][k];
        T_curr_rp1=TEMPERATURE[i2][j+1][k];
        T_curr_zp1=TEMPERATURE[i2][j][k+1];

        if (z_curr<=z_max_SITALL)
keySIT_H2O=1; // ситалл
        else
keySIT_H2O=2; // вода

        add1=(THERMAL_COND(T_curr_rp1)-
THERMAL_COND(T_curr))/r_step*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-
TEMPERATURE[i2][j][k])/r_step;

        add2=THERMAL_COND(T_curr)/r_curr*(TEMPERATURE[i2][j+1][
k]-TEMPERATURE[i2][j][k])/r_step;

        add3=THERMAL_COND(T_curr)*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-
2.*TEMPERATURE[i2][j][k]+TEMPERATURE[i2][j-
1][k])/pow(r_step,2);
        add4=(THERMAL_COND(T_curr_zp1)-
THERMAL_COND(T_curr))/z_step*(TEMPERATURE[i2][j][k+1]-
TEMPERATURE[i2][j][k])/z_step;

        add5=THERMAL_COND(T_curr)*(TEMPERATURE[i2][j][k+1]-
2.*TEMPERATURE[i2][j][k]+TEMPERATURE[i2][j][k-
1])/pow(z_step,2);

        braket=add1+add2+add3+add4+add5;

        TEMPERATURE[i2+1][j][k]=TEMPERATURE[i2][j][k]+t_step/RH
O(T_curr)/SPECIFIC_HEAT(T_curr)*braket;

        // Граничные условия
        if (j==1)
TEMPERATURE[i2+1][0][k]=TEMPERATURE[i2+1][j][k];
// левая граница

```

```

        if (j==(r_int_max-1))

            TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][k]=TEMPERATURE[i2+1][j][k]
; // правая граница
            if (k==(z_int_max-1))

                // верхняя граница
                {

                    TEMPERATURE[i2+1][j][z_int_max]=(TEMPERATURE[i2+1][j][k]
]+T0*alpha_Water*z_step/THERMAL_COND_H2O(T_curr))/(1.+alp
ha_Water*z_step/THERMAL_COND_H2O(T_curr));
                    // через теплообмен

                    TEMPERATURE[i2+1][0][z_int_max]=TEMPERATURE[i2+1][0][z_
int_max-1]; // левый угол

                    TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][z_int_max]=TEMPERATURE[i2+
1][r_int_max][z_int_max-1]; // правый угол
                }
                //////////////////////////////////////
            }
        }
        count_up_low++;
        // переключение импульсов

        if (count_up_low>curr_mode)
        {
            if (key_Amp==1)
            {
                curr_mode=int_low;
                key_Amp=2;
            }
            else
            {
                curr_mode=int_up;
                key_Amp=1;
            }
            count_up_low=0;
        }
        //printf("\ni=%d count=%d
key=%d",i,count_up_low,key_Amp);getch();

        if(abs(i/N_t_print)==i/N_t_print)
        {

```

```

        if(key_Amp==1)
        {
            fprintf(f4_ex, "\n%f,%f,%f,%f,%f,%f",
t_curr, (TEMPERATURE[i2][0][z_int_max-1]-273.),
alpha_SITALL, alpha_Water, tau_pulse_up, LPower_UP);
        }
        else
        {
            fprintf(f4_ex, "\n%f,%f,%f,%f,%f,%f",
t_curr, (TEMPERATURE[i2][0][z_int_max-1]-273.),
alpha_SITALL, alpha_Water, tau_pulse_up, LPower_LOW);
        }
    }
    i2++;
    // нагревается текущий временной слой
    for (j=0;j<=r_int_max;j++)
    {
        r_curr=j*r_step;

        TEMPERATURE[i2][j][0]=(TEMPERATURE[i2][j][1]*THERMAL_CO
ND_SITALL(T0)+alpha_SITALL*z_step*T0+ENERGY_REL(r_curr,ke
y_Amp)*z_step)/(THERMAL_COND_SITALL(T0)+z_step*alpha_SITA
LL); // в начале нагрев от верхнего значения
импульса
        //printf("\nT=%e
i2=%d",TEMPERATURE[i2][j][0],i2);getch();
    }

    if (i2>60000) // обновление массива
    {
        for (j=0;j<=r_int_max;j++)
        {
            for (k=0;k<=z_int_max;k++)
            {
                TEMPERATURE[0][j][k]=TEMPERATURE[i2][j][k];
            }
        }
        i2=0;

        printf("\nNEW\ttime=%f\ttau_up=%f\ttau_low=%f\tkey_LASE
R=%d", (i*t_step),tau_pulse_up,tau_pulse_low,key_LASER);
    }
    //printf("\n\ttime=%f", (i*t_step));
}
fclose (f4_ex);

```

```
}
```

2) DIFF_TRIANGLE

```
void TEMPER_FIELD_1 ()
{
    int i,j,k, key_Amp=1, count_up_low=0, int_up, int_low,
    curr_mode;
    double val, braket, T_curr, T_curr_rp1, T_curr_zp1,
    N_t_print, add1=0, add2, add3, add4=0,
    add5,coefficient_tri, lp;

    int_up=ceil(tau_pulse_up/t_step);
    int_low=ceil(tau_pulse_low/t_step);
    curr_mode=int_up;
        // начинается с верхнего значения импульса
    N_t_print=t_print_pulse/t_step;

    f4_ex=fopen(output4,"w");
    fprintf(f4_ex,"time(sec),Temper(oC),alpSIT,alpWATER,tau
,coefficient_tri, lp");

    for (i=0;i<=t_int_max;i++)
    {
        t_curr=i*t_step;

        for (j=1;j<r_int_max;j++)
        // правая разностная форма
        {
            for (k=1;k<z_int_max;k++)
            {
                r_curr=j*r_step;
                z_curr=k*z_step;

                T_curr=TEMPERATURE[i2][j][k];
                T_curr_rp1=TEMPERATURE[i2][j+1][k];
                T_curr_zp1=TEMPERATURE[i2][j][k+1];

                if (z_curr<=z_max_SITALL)
                    keySIT_H2O=1; // ситалл
                else
                    keySIT_H2O=2; // вода

                add1=(THERMAL_COND(T_curr_rp1)-
THERMAL_COND(T_curr))/r_step*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-
TEMPERATURE[i2][j][k])/r_step;
```



```
add2=THERMAL_COND(T_curr)/r_curr*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-TEMPERATURE[i2][j][k])/r_step;
```

```
add3=THERMAL_COND(T_curr)*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-2.*TEMPERATURE[i2][j][k]+TEMPERATURE[i2][j-1][k])/pow(r_step,2);
```

```
add4=(THERMAL_COND(T_curr_zp1)-THERMAL_COND(T_curr))/z_step*(TEMPERATURE[i2][j][k+1]-TEMPERATURE[i2][j][k])/z_step;
```

```
add5=THERMAL_COND(T_curr)*(TEMPERATURE[i2][j][k+1]-2.*TEMPERATURE[i2][j][k]+TEMPERATURE[i2][j][k-1])/pow(z_step,2);
```

```
braket=add1+add2+add3+add4+add5;
```

```
TEMPERATURE[i2+1][j][k]=TEMPERATURE[i2][j][k]+t_step/RHO(T_curr)/SPECIFIC_HEAT(T_curr)*braket;
```

```
// Граничные условия
```

```
if (j==1)
```

```
TEMPERATURE[i2+1][0][k]=TEMPERATURE[i2+1][j][k];
```

```
// левая граница
```

```
if (j==(r_int_max-1))
```

```
TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][k]=TEMPERATURE[i2+1][j][k];  
// правая граница
```

```
if (k==(z_int_max-1))
```

```
// верхняя граница
```

```
{
```

```
TEMPERATURE[i2+1][j][z_int_max]=(TEMPERATURE[i2+1][j][k]+T0*alpha_Water*z_step/THERMAL_COND_H2O(T_curr))/(1.+alpha_Water*z_step/THERMAL_COND_H2O(T_curr));
```

```
// через теплообмен
```

```
TEMPERATURE[i2+1][0][z_int_max]=TEMPERATURE[i2+1][0][z_int_max-1];  
// левый угол
```

```
TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][z_int_max]=TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][z_int_max-1];  
// правый угол
```

```
}
```

```

////////////////////////////////////
    }
}
count_up_low++;
// переключение импульсов

//printf("\ni=%d count=%d
key=%d",i,count_up_low,key_Amp);getch();

coefficient_tri=((fabs((double(int(t_curr*1000)%int(perio
de_tri*1000))/1000)-2.5))*(2/periode_tri)*(1-
(LPower_LOW/LPower_UP)))+(LPower_LOW/LPower_UP);
lp=coefficient_tri*LPower_UP;
if(abs(i/N_t_print)==i/N_t_print)
fprintf(f4_ex,"\n%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f", t_curr,
(TEMPERATURE[i2][0][z_int_max-1]-273.), alpha_SITALL,
alpha_Water, tau_pulse_up,coefficient_tri, lp);

i2++;
// нагревается текущий временной слой
for (j=0;j<=r_int_max;j++)
{
    r_curr=j*r_step;

    TEMPERATURE[i2][j][0]=(TEMPERATURE[i2][j][1]*THERMAL_CO
ND_SITALL(T0)+alpha_SITALL*z_step*T0+coefficient_tri*ENER
GY_REL(r_curr,key_Amp)*z_step)/(THERMAL_COND_SITALL(T0)+z
_step*alpha_SITALL); // в начале нагрев от верхнего
значения импульса
    //printf("\nT=%e
i2=%d",TEMPERATURE[i2][j][0],i2);getch();
}

if (i2>60000) // обновление массива
{
    for (j=0;j<=r_int_max;j++)
    {
        for (k=0;k<=z_int_max;k++)
        {

TEMPERATURE[0][j][k]=TEMPERATURE[i2][j][k];
        }
    }
i2=0;
}

```

```

    printf("\nNEW\ttime=%f\ttau_up=%f\ttau_low=%f\tkey_LASER=%d", (i*t_step), tau_pulse_up, tau_pulse_low, key_LASER);
    }
    //printf("\n\ttime=%f", (i*t_step));
}
fclose (f4_ex);
}

```

3) DIFF_SIN

```

void TEMPER_FIELD_2()
{
    int i,j,k, key_Amp=1, count_up_low=0, int_up, int_low,
    curr_mode;
    double val, braket, T_curr, T_curr_rp1, T_curr_zp1,
    N_t_print, add1=0, add2, add3, add4=0, add5,
    coefficient_sin, lp, test, test1, test2;

    int_up=ceil(tau_pulse_up/t_step);
    int_low=ceil(tau_pulse_low/t_step);
    curr_mode=int_up;
    // начинается с верхнего значения импульса
    N_t_print=t_print_pulse/t_step;

    f4_ex=fopen(output4, "w");
    fprintf(f4_ex, "time(sec), Temper(oC), alpSIT, alpWATER, tau
, coefficient_sin, lp");

    for (i=0; i<=t_int_max; i++)
    {
        t_curr=i*t_step;

        for (j=1; j<r_int_max; j++)
        // правая разностная форма
        {
            for (k=1; k<z_int_max; k++)
            {
                r_curr=j*r_step;
                z_curr=k*z_step;

                T_curr=TEMPERATURE[i2][j][k];
                T_curr_rp1=TEMPERATURE[i2][j+1][k];
                T_curr_zp1=TEMPERATURE[i2][j][k+1];
            }
        }
    }
}

```

```

        if (z_curr<=z_max_SITALL)
keySIT_H2O=1;                                // ситалл
        else
keySIT_H2O=2;                                // вода

        add1=(THERMAL_COND(T_curr_rp1)-
THERMAL_COND(T_curr))/r_step*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-
TEMPERATURE[i2][j][k])/r_step;

        add2=THERMAL_COND(T_curr)/r_curr*(TEMPERATURE[i2][j+1][
k]-TEMPERATURE[i2][j][k])/r_step;

        add3=THERMAL_COND(T_curr)*(TEMPERATURE[i2][j+1][k]-
2.*TEMPERATURE[i2][j][k]+TEMPERATURE[i2][j-
1][k])/pow(r_step,2);
        add4=(THERMAL_COND(T_curr_zp1)-
THERMAL_COND(T_curr))/z_step*(TEMPERATURE[i2][j][k+1]-
TEMPERATURE[i2][j][k])/z_step;

        add5=THERMAL_COND(T_curr)*(TEMPERATURE[i2][j][k+1]-
2.*TEMPERATURE[i2][j][k]+TEMPERATURE[i2][j][k-
1])/pow(z_step,2);

        braket=add1+add2+add3+add4+add5;

        TEMPERATURE[i2+1][j][k]=TEMPERATURE[i2][j][k]+t_step/RH
O(T_curr)/SPECIFIC_HEAT(T_curr)*braket;

        // Граничные условия
        if (j==1)
            TEMPERATURE[i2+1][0][k]=TEMPERATURE[i2+1][j][k];
        // левая граница
        if (j==(r_int_max-1))

            TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][k]=TEMPERATURE[i2+1][j][k]
; // правая граница
        if (k==(z_int_max-1))

            // верхняя граница
            {

                TEMPERATURE[i2+1][j][z_int_max]=(TEMPERATURE[i2+1][j][k
]+T0*alpha_Water*z_step/THERMAL_COND_H2O(T_curr))/(1.+alp
ha_Water*z_step/THERMAL_COND_H2O(T_curr));
                // через теплообмен

```

```

    TEMPERATURE[i2+1][0][z_int_max]=TEMPERATURE[i2+1][0][z_
int_max-1];          // левый угол

    TEMPERATURE[i2+1][r_int_max][z_int_max]=TEMPERATURE[i2+
1][r_int_max][z_int_max-1];    // правый угол
    }
    //////////////////////////////////////
    }
}
count_up_low++;
// переключение импульсов

    if (count_up_low>curr_mode)
    {
        if (key_Amp==1)
        {
            curr_mode=int_low;
            key_Amp=2;
        }
        else
        {
            curr_mode=int_up;
            key_Amp=1;
        }
        count_up_low=0;
    }
    //printf("\ni=%d count=%d
key=%d",i,count_up_low,key_Amp);getch();

coefficient_sin=(sin((2*pi*t_curr)/periode_sin)*((1/2.)-
(LPpower_LOW/(2*LPpower_UP)))+(1/2.)+(LPpower_LOW/(2*LPowe
r_UP)));
    lp= coefficient_sin*LPpower_UP;
    if(abs(i/N_t_print)==i/N_t_print)
        fprintf(f4_ex, "\n%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f", t_curr,
(TEMPERATURE[i2][0][z_int_max-1]-273.), alpha_SITALL,
alpha_Water, tau_pulse_up, coefficient_sin,lp);

    i2++;
    // нагревается текущий временной слой
    for (j=0;j<=r_int_max;j++)
    {
        r_curr=j*r_step;

```

```

    TEMPERATURE[i2][j][0]=(TEMPERATURE[i2][j][1]*THERMAL_CO
ND_SITALL(T0)+alpha_SITALL*z_step*T0+coefficient_sin*ENER
GY_REL(r_curr,key_Amp)*z_step)/(THERMAL_COND_SITALL(T0)+z
_step*alpha_SITALL);          // в начале нагрев от верхнего
значения импульса
        //printf("\nT=%e
i2=%d",TEMPERATURE[i2][j][0],i2);getch();
    }

    if (i2>60000) // обновление массива
    {
        for (j=0;j<=r_int_max;j++)
        {
            for (k=0;k<=z_int_max;k++)
            {

                TEMPERATURE[0][j][k]=TEMPERATURE[i2][j][k];
            }
        }
        i2=0;

        printf("\nNEW\ttime=%f\ttau_up=%f\ttau_low=%f\tkey_LASER
R=%d", (i*t_step),tau_pulse_up,tau_pulse_low,key_LASER);
    }
    //printf("\n\ttime=%f", (i*t_step));
}
fclose (f4_ex);
}

```

4) Laser_Heat

```

double LASER_POWER_GAUSS (double r, int key_Amp)
    // [W/m2]
{
    double lp, sigma, A, r_beam;

    r_beam=Beam_diam/2.;

    sigma=(r_beam+0.35e-3)/sqrt(2.);

    if (key_Amp==1) A=LPower_UP;
    if (key_Amp==2) A=LPower_LOW;

    lp=A/(pow(sigma,2)*2.*pi)*exp(-pow(r,2)/pow(sigma,2));
}

```

```

        return (lp);
    }
double LASER_POWER (double r, int key_Amp)
    // [W/m2] q_rad
{
    double lp;
    if (key_LASER==1) lp=LASER_POWER_GAUSS (r,key_Amp);
    if (key_LASER==2) lp=LASER_POWER_UNIFORM (r,key_Amp);
    return (lp);
}
double ENERGY_REL (double r, int key_Amp)
    // W/m2
{
    double er;
    er=LASER_POWER(r,key_Amp);
    return(er);
}

```