# Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Институт прикладной математики и механики Кафедра "Теоретическая механика"

Диссертация допущена к защите Зав. кафедрой А.М. Кривцовым "" 2015г.

# ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

#### МАГИСТРА

Тема: Распределение тепла в одномерном кристалле

Направление: 010800 — Механика и математическое моделирование

Выполнил студент гр. 63604/1:

Д.В. Цветков

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф. А. М. Кривцов

Консультант по вопросам охраны труда:

к.т.н., доц. В. В. Монашков

Санкт-Петербург 2015

# Содержание

1	Вве	дение	·	4			
2	2 Сравнительный анализ решений задач теплопроводности для бес- конечного слоя, находящегося под воздействием ультракороткого						
	лаз	ерного	о импульса	6			
	2.1	Мето	д исследования	6			
	2.2	Поста	новка стохастической задачи	6			
	2.3	Начальные условия					
		2.3.1	Задание начальных скоростей	7			
		2.3.2	Задание начальных перемещений	8			
	2.4	Грани	ıчные условия	9			
	2.5	Числе	енное решение дифференциального уравнения	9			
	2.6	Иссле	едование различных способов осреднения	10			
		2.6.1	Метод исследования	12			
		2.6.2	Результаты	12			
		2.6.3	Поведение неустоявшейся системы	15			
	2.7	Сходи	1MOCTЬ	15			
	2.8	Анали	итическое решение	15			
	2.9	Резул	ьтаты	17			
3	Задача о переходе энергии механических колебаний в тепло для						
	нелинейного одномерного кристалла						
	3.1 Постановка задачи						
	3.2	Детер	минированная задача	18			
		3.2.1	Начальные условия	18			
		3.2.2	Метод определения формы кристалла в различные момен-				
			ты времени	18			
		3.2.3	Анализ решения задачи на большом отрезке времени	20			
		3.2.4	Зависимость времени возвращения кристалла к начально-				
			му состоянию от количества частиц и амплитуды синуса	20			
		3.2.5	Высота второго пика	22			
		3.2.6	Время до снижения скорости затухания энергии	23			
	3.3	Стоха	стическая задача	23			
		3.3.1	Начальные условия	23			
		3.3.2	Время перехода механической энергии в тепловую	24			
4	Зак	лючен	ние	26			

5	Охрана труда				
	5.1	Пожарная безопасность при работе с вычислительной техникой	27		
	5.2	Требования электробезопасности	28		
	5.3	Требования к вентиляции, отоплению и кондиционированию воз-			
		духа	28		
	5.4	Требования к уровням шума	29		
	5.5	Требования к естественному и искусственному освещению для по-			
		мещений вычислительных комнат	29		
		Требования к защите от статического электричества и излучений .			
	5.7	Требования к видеотерминальному устройству	30		

# 1 Введение

На данный момент одной из наиболее активно развивающихся областей современной механики является механика наноструктур. Благодаря нанотехнологиям появляется возможность получать практически идеальные, бездефектные материалы [1, 2]. Требуется уметь предугадывать свойства и поведение таких материалов. Благодаря развитию компьютерных технологий имеется возможность моделировать достаточно крупные фрагменты материала, и исследовать их поведение на требуемом отрезке времени.

Также важной темой является исследование Парадокса возврата, следующего из теоремы Пуанкаре о возвращении [3, 4], по отношению к достаточно коротким одномерным кристаллам. Суть Парадокса возврата в противоречии между возможностью молекул вещества любой динамической системы, сохраняющей механическую энергию, вернуться в окрестность своего первоначального положения, и такими необратимыми процессами, как теплопроводность или диффузия [5, 6].

Пример: сосуд, разделенный перегородкой (рис. 1a). В левой части сосуда содержится небольшое количество молекул газа, правая часть сосуда пуста. Убираем перегородку (рис. 1б). Постепенно молекулы газа занимают все пространство сосуда (рис. 1в). Но, так как молекул очень мало, через некоторое время они снова одновременно окажутся в левой части сосуда (рис. 1г).

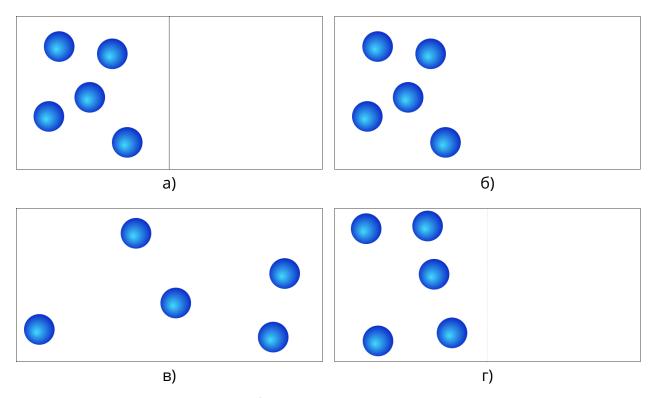


Рис. 1: Сосуд с небольшим количеством молекул газа

Если в начальный момент времени в левой части сосуда будет больше молекул (рис. 2a), то, после удаления перегородки (рис. 1б) ждать возвращения

системы в начальное состояние (когда все молекулы находятся в левой части сосуда) придется намного дольше. В этом и состоит разгадка Парадокса возврата — для достаточно большого тела вероятность обращения таких процессов, как теплопроводность, настолько мала, что время на ожидание такого возврата много больше времени существования вселенной.

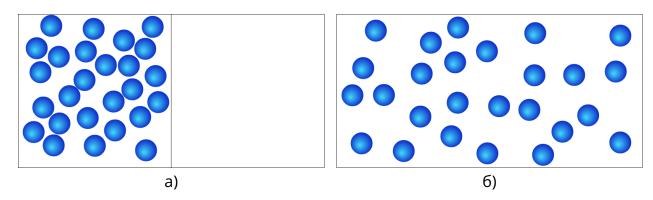


Рис. 2: Сосуд с большим количеством молекул газа

Важно исследовать граничное время, в которое возврат системы становится практически невозможен.

В этой связи в данной работе рассматривается процесс преобразования механической энергии нелинейного одномерного стержня в тепловую и обратно с течением времени. Исследуется влияние флуктуаций скоростей на скорость преобразования энергии.

# 2 Сравнительный анализ решений задач теплопроводности для бесконечного слоя, находящегося под воздействием ультракороткого лазерного импульса

#### 2.1 Метод исследования

Рассматривается задача одномерного теплоизолированного кристалла, нагретого ультракоротким лазерным импульсом. Производится сравнение следующих решений:

- стохастическое решение задача динамики кристалла, температура кристалла задается с помощью случайных скоростей;
- численное решение дифференциального уравнения, полученного в [9]:

$$\ddot{T} + \frac{1}{t}\dot{T} = c^2T''; (1)$$

• аналитическое решение, полученное в [10].

Для численного расчета и сравнения задач написано специальное программное обеспечение на языках JavaScript и MATLAB.

# 2.2 Постановка стохастической задачи

Рассмотрим одномерный кристалл: цепочку одинаковых частиц массы m, соединенных одинаковыми линейными пружинами с жесткостью C (рис. 3).

$$(m) \overset{\mathsf{C}}{\checkmark} (m) \overset{\mathsf{C}}{\checkmark} (m) \overset{\mathsf{C}}{\checkmark} (m)$$

Рис. 3: Одномерный кристалл

Уравнения динамики кристалла имеют вид [9]:

$$\ddot{u}_n = \omega_0^2 (u_{n-1} - 2u_n + u_{n+1}), \quad \omega_0 \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{C}{m}},$$

где  $u_n$  — перемещение n-й частицы; n — индекс, принимающий произвольные целые значения, C — жесткость связи между частицами, m — масса частицы.

Температура в кристалле определяется как дисперсия скоростей частиц. Скорости частиц задаются с помощью генератора случайных чисел.

#### 2.3 Начальные условия

Требуемое распределение температуры по координате в кристалле на начальный момент времени описывается формулой:

$$T_0(x) = \frac{I_0}{k} e^{-\gamma x},\tag{2}$$

где  $I_0$  — интенсивность входящего пучка света,  $\gamma$  — коэффициент поглощения света, k — постоянная Больцмана. Согласно закону Бугера [11], данные начальные условия можно интерпретировать как результат воздействия на кристалл ультракороткого лазерного импульса.

#### 2.3.1 Задание начальных скоростей

Температура в кристалле задается с помощью скоростей. Воспользуемся определением кинетической температуры для одномерного случая:

$$kT(x) = m\overline{v_x^2},$$

где k — постоянная Больцмана,  $\overline{x}=f(x)$  — оператор усреднения по координате. Выразим  $\overline{v_x^2}$ :

$$\overline{v_x^2} = \frac{kT(x)}{m}.$$

Для того, чтобы получить требуемое распределение (2), будем задавать скорости с помощью случайного числа  $\rho$  в диапазоне [-1;1].

Посчитаем, чему равно  $\overline{
ho^2}$ :

$$\overline{\rho^2} = \frac{1}{2} \int_a^b \rho^2 d\rho = \frac{1}{2} \left. \frac{\rho^3}{3} \right|_{-1}^1 = \frac{1}{3}.$$

Значит  $3\overline{\rho^2} = 1$ .

Заменим T(x) на  $T_0(x)$ , генерируемое с помощью  $\overline{
ho^2}$ :

$$\overline{v_x^2} = \frac{3k\overline{\rho^2}T_0(x)}{m}.$$

Выразим  $v_x$ :

$$v_x^2 = 3\rho^2 T_0(x),$$
  $v_x = \rho \sqrt{3T_0(x)}.$  (3)

При генерации скорости с помощью (3), получается требуемое распределение температуры по координате (2) (рис. 4).

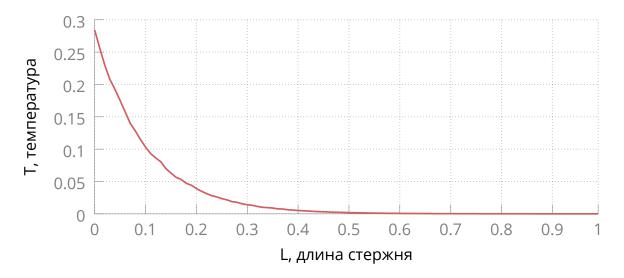


Рис. 4: Начальные условия

#### 2.3.2 Задание начальных перемещений

Если задать нулевые начальные перемещения, то потенциальная энергия кристалла будет равна нулю, и с течением времени примерно половина кинетической энергии преобразуется в потенциальную [8]. Чтобы этого избежать, начальные перемещения задаются с помощью деформаций. Деформации задаются таким образом, чтобы кинетическая и потенциальная энергии кристалла в начальный момент времени были равны.

Сначала задаются N-1 случайных чисел, сумма которых равна нулю:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \rho_i = 0,$$

где N — количество частиц в цепочке. После рассчитывается параметр  $\Pi_{\rho}$ :

$$\Pi_{\rho} = C \sum_{i=0}^{N-1} \rho_i^2;$$

и кинетическая энергия K:

$$K = m \sum_{i=0}^{N} v_i^2.$$

Далее, с помощью отношения K к  $\Pi_{\rho}$  находятся деформации:

$$\varepsilon_i = \rho_i \sqrt{\frac{K}{\Pi \, \rho}}.$$

#### 2.4 Граничные условия

Граничные условия — зеркальные (рис. 5). Это значит, что значения перемещения и скорости частицы на границе равны значениям перемещения и скорости соседней частицы:

$$u_1 = u_2, \quad u_N = u_{N-1},$$
  
 $v_1 = v_2, \quad v_N = v_{N-1},$ 

где N — число частиц в цепочке.

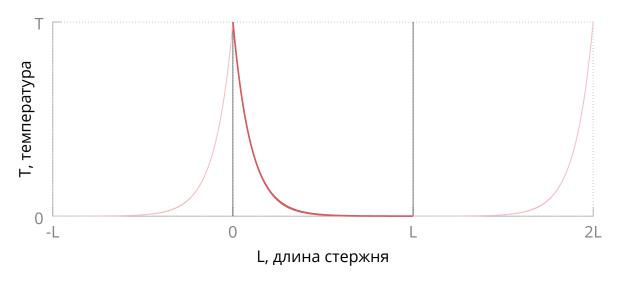


Рис. 5: Граничные условия

При данных условиях энергия не убывает и не прибывает — на границах стержня выполняется условие теплоизоляции.

# 2.5 Численное решение дифференциального уравнения

Для решения дифференциального уравнения (1) реализован метод центральных разностей [7].

Диффенциальное уравнение имеет вид:

$$\ddot{T} + \frac{1}{t}\dot{T} = c^2T''. \tag{4}$$

Вычислим T'':

$$T' = \frac{T_{n + \frac{1}{2}} - T_{n - \frac{1}{2}}}{\Delta x},$$

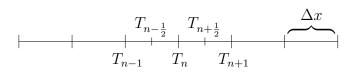


Рис. 6: Поясняющая схема

$$T'' = \frac{\left(\frac{T_{n+\frac{1}{2}} - T_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{T_{n+\frac{1}{2}} - T_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta x}\right)}{\Delta x} = \frac{T_{n+1} - T_n - T_n + T_{n-1}}{(\Delta x)^2} = \frac{T_{n+1} - 2T_n + T_{n-1}}{(\Delta x)^2}.$$
 (5)

Теперь вычислим  $T_{t+\Delta t}$ . Произведем замену:

$$\dot{T} = G$$
.

Подставим в (4):

$$\dot{G} + \frac{1}{t}G = c^2 T''.$$

Выразим  $\dot{G}$ :

$$\dot{G} = c^2 T'' - \frac{1}{t}G.$$

G каждый шаг времени  $\Delta t$  меняется на  $\Delta G$ :

$$G_{t+\Delta t} = G + \Delta G, (6)$$

где

$$\Delta G = \dot{G}\Delta t = \left(c^2T'' - \frac{1}{t}G\right)\Delta t.$$

По формуле (6) можем вычислить  $\dot{T} = G$  на следующий момент времени. Теперь посчитаем T на следующий момент времени:

$$T_{t+\Delta T} = T + \Delta T,\tag{7}$$

где

$$\Delta T = \dot{T}_{t+\Delta t} \Delta t = G_{t+\Delta t} \Delta t.$$

С помощью формул (6) и (7) можно расчитать значение Т на любой момент времени.

### 2.6 Исследование различных способов осреднения

При исследовании колебаний энергий в одномерных кристаллах возникает проблема качественного осреднения получаемых графиков. При простейшем осреднении для получения достаточно качественных рисунков некоторых систем даже на современной технике требуются многочасовые вычисления. Рациональное использование методов осреднения позволяет получать более качествен-

ные результаты за меньший промежуток времени. Рассматривается два метода осреднения случайных процессов:

- 1. По пространству (рис. 7): система рассчитывается для большого количества частиц, делится на n отрезков по m частиц, после чего находится среднее значение для каждого отрезка.
- 2. По ансамблю реализаций (рис. 8): осреднение производится по определенному количеству реализаций одной и той же системы.

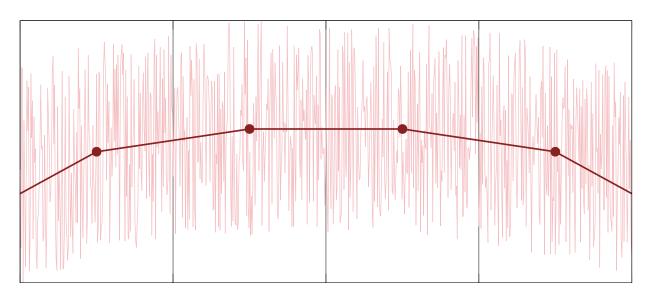


Рис. 7: Осреднение по пространству

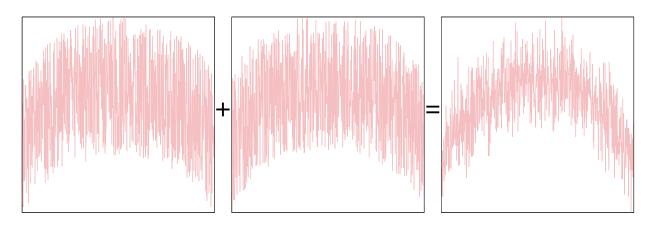


Рис. 8: Осреднение по ансамблю реализаций

По ансамблю можно осреднять потому, что мы считаем один и тот же процесс, основанный на генерации случайных чисел, множество раз, и осреднение по ансамблю, по сути, является нахождением матожидания решения.

Цель — исследовать влияние количества реализаций системы на качество получаемых графиков, найти оптимальное отношение количества частиц к количеству реализаций для получения качественных графиков температуры в одномерном кристалле.

#### 2.6.1 Метод исследования

Рассматривается одномерный кристалл, состоящий из N частиц. Исследуются два случая:

- В первом случае в начальный момент времени первая половина кристалла находится в состоянии покоя, вторая половина нагрета с помощью задания случайных скоростей частиц (конфигурация ступенька, рис. 9).
- Во втором нагрета треть кристалла, находящаяся по середине (конфигурация выступ, рис. 10).

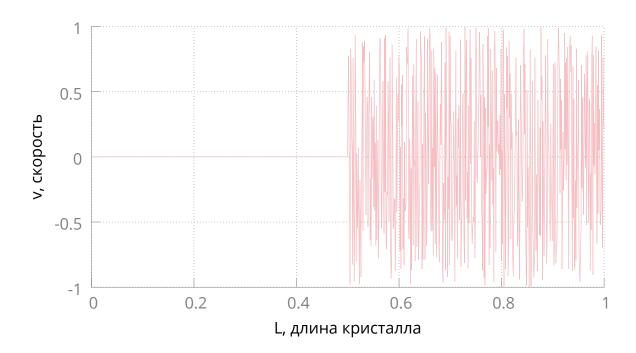


Рис. 9: Начальные условия — ступенька

Осреднение по пространству проводится следующим образом: N частиц делится на 100 отрезков по N/100 частиц в каждом отрезке. Для каждого отрезка находится среднее значение, которое и используется для построения графика. Для каждой системы рассматривается R реализаций. Температура усредняется сначала по реализациям, а только потом по пространству. Исследуются 4 системы, исходные данные для систем указаны в таблице 1:

#### 2.6.2 Результаты

Результаты приведены на рис. 11. Для сравнения, приведено решение дифференциального уравнения:

$$\ddot{U} + \frac{\dot{U}}{t} = \beta U''.$$

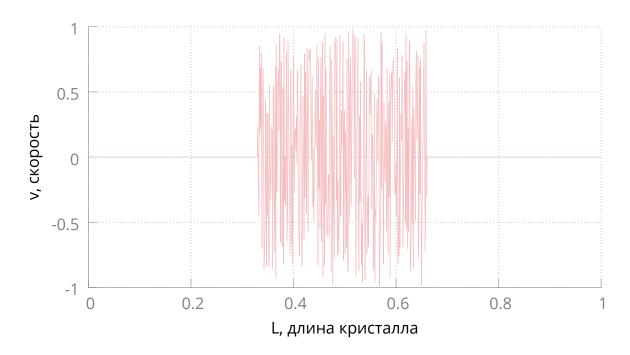


Рис. 10: Начальные условия — выступ

Таблица 1: Исходные данные исследуемых систем

N	R		
100 000	1		
10 000	10		
1000	100		
100	1000		

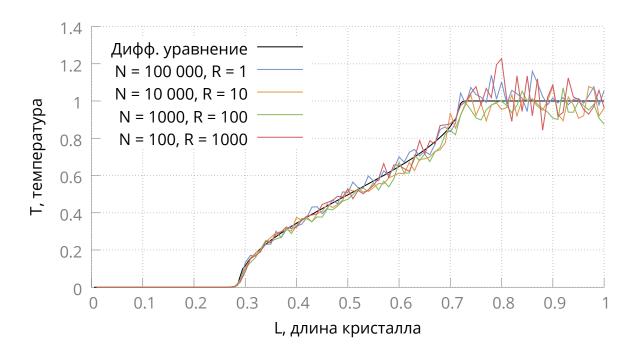


Рис. 11: Энергия в кристалле, н.у. — ступенька

Графики очень похожи, однако временя, требуемое системе, чтобы прийти к равновесному состоянию, обратно пропорционально количеству частиц. Также в случае с 1000 реализаций можно видеть немного необычное поведение системы — от стенки (периодические условия — зеркальные) идет волна. Данный эффект не проявляется, когда начальные условия — выступ (рис. 12).

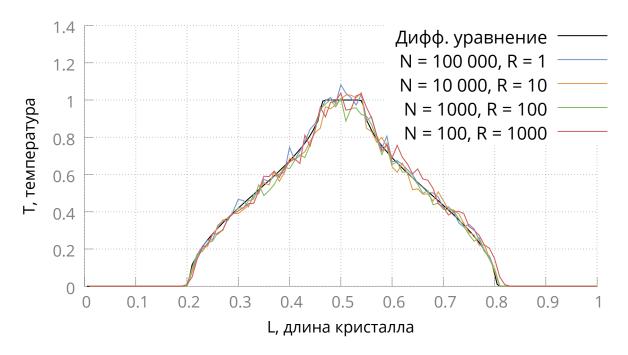


Рис. 12: Энергия в кристалле, н.у. — выступ

Примерное время процессора, потраченное на расчет каждого шага, указано в таблице 2.

Таблица 2: Время процессора, потраченное на расчет каждого шага

N	R	$\sim$ Время, мс
100 000	1	1529
10 000	10	153
1000	100	17
100	1000	3

Видно, что время, требуемое для расчета системы, значительно сокращается при уменьшении N и увеличении R, хотя количество частиц, обрабатываемых процессором, не изменяется. Это происходит потому, что скорость движения «фронта энергии» обратно пропорциональна N. Однако, чем меньше соотношение N/R, тем дольше придется ждать, пока система придет к равновесному состоянию.

Вывод: надо искать компромисс, при котором мы имеем минимальный N/R, и при этом можем комфортно исследовать систему.

#### 2.6.3 Поведение неустоявшейся системы

Пока колебания в одномерном кристалле не устоялись, при максимуме кинетической энергии можно заметить схожесть графика с волновым уравнением (рис. 13):

$$\ddot{U} = \beta U''$$
.

при минимуме кинетической энергии — с уравнением теплопроводности (рис. 14):

$$\dot{U} = \alpha U''$$
.



Рис. 13: Максимум кинетической энергии

### 2.7 Сходимость

Проведено исследование сходимости численного решения к аналитическому. Результаты приведены на рис. 15. Численное решение сходится к аналитическому с точностью до малых тепловых осцилляций.

# 2.8 Аналитическое решение

Аналитическое решение взято из статьи [10].

$$T(t,x) = \frac{1}{\pi} \int_{-t}^{t} \frac{e^{-\gamma|x-ct|}I_0}{k\sqrt{t^2 - \tau^2}} d\tau,$$

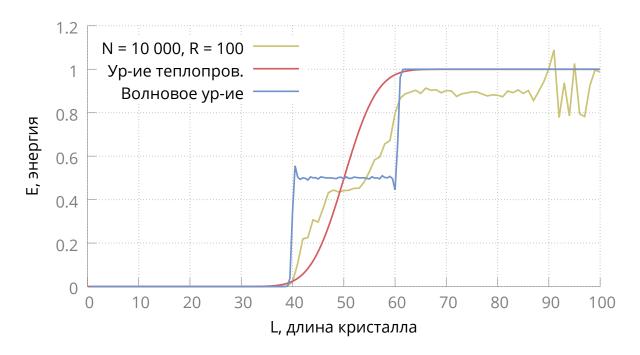


Рис. 14: Минимум кинетической энергии

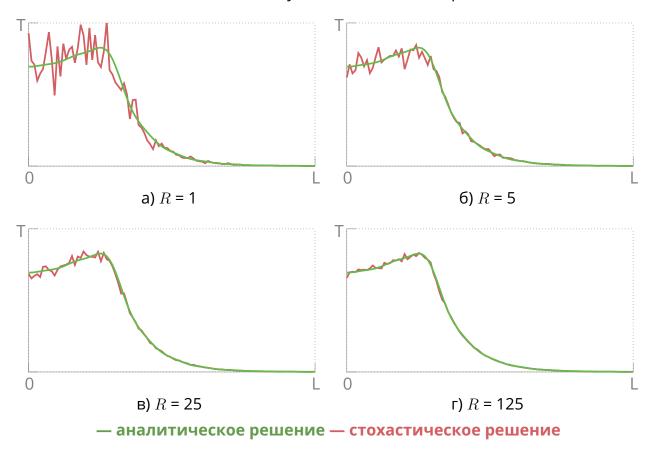


Рис. 15: Сходимость стохастического решения к аналитическому, R — число реализаций

где  $I_0$  — интенсивность входящего пучка света,  $\gamma$  — коэффициент поглощения света.

# 2.9 Результаты

На рис. 16 аналитическое решение сравнивается со стохастическим решением и численным решением дифференциального уравнения (1). Стохастическое решение получено для 125 реализаций цепочки из 10000 частиц. Легко видеть, что решения совпадают с точностью до малых тепловых осцилляций.

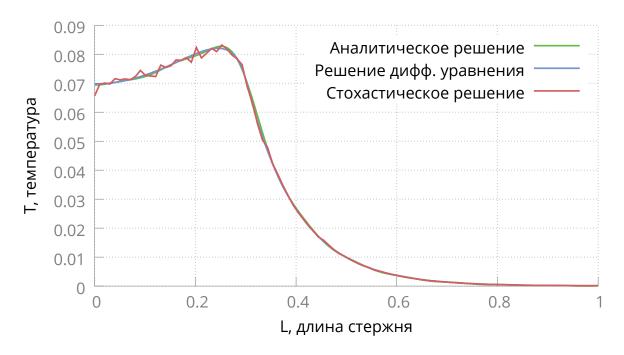


Рис. 16: Результаты

# Задача о переходе энергии механических колебаний в тепло для нелинейного одномерного кристалла

#### 3.1 Постановка задачи

Рассматривается одномерный кристалл: цепочка одинаковых частиц массы m, соединенных одинаковыми нелинейными пружинами с жесткостью C. Уравнения динамики кристалла имеют вид:

$$\ddot{u}_k = \omega_0^2 (u_{k-1} - 2u_k + u_{k+1})(1 + u_{k+1} - u_{k-1}), \quad \omega_0 \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{C}{m}},$$

где  $u_k$  — перемещение k-й частицы; k — индекс, принимающий произвольные целые значения. Будем считать, что выполнены условия периодичности:  $u_{k+N}=u_k$ , где  $N\gg 1$  — число независимых частиц.

Рассматриваются два случая:

- 1. Детерминированная задача при t=0 перемещения частиц равны нулю, а скорости распределены по синусоидальному закону.
- 2. Стохастическая задача к скоростям в детерминированной задаче добавляются случайные флуктуации.

### 3.2 Детерминированная задача

#### 3.2.1 Начальные условия

Начальные скорости в кристалле задаются следующим образом (рис. 17):

$$v(x)|_{t=0} = A \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right),$$

где A — амплитуда, L — длина кристалла,  $x \in [0, L]$ .

Начальные перемещения равны нулю по всей длине кристалла.

### 3.2.2 Метод определения формы кристалла в различные моменты времени

При малых t в распределении скоростей по длине цепочки явно прослеживается форма синуса, однако, при возрастании t цепочка теряет свою форму и движение частиц неотличимо от теплового. Это случается из за нелинейного взаимодействия между частицами. Однако, с течением времени цепочка вновь принимает форму синуса, искривленного тепловым движением (рис. 18).



Рис. 17: Начальная скорость

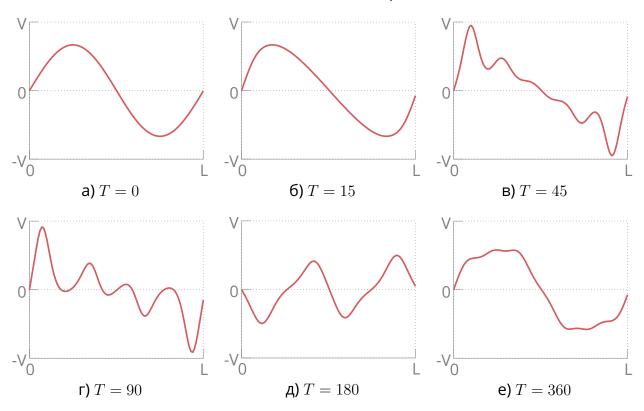


Рис. 18: Трансформации синуса

Чтобы более точно определить, насколько форма цепочки близка к форме синуса, посчитаем параметр  $E^*$  — отношение полной механической энергии E к начальной полной механической энергии  $E_0$  по следующей формуле:

$$E^* = \left(\frac{\int\limits_L v(x)\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx}{A\int\limits_L \sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx}\right)^2 + \left(\frac{\int\limits_L D(x)\cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx}{A\int\limits_L \sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx}\right)^2.$$

 $E^* \in [0,1].$  Чем больше параметр  $E^*$ , тем больше форма кристалла похожа на синус.

#### 3.2.3 Анализ решения задачи на большом отрезке времени

Время в данной главе измеряется в количестве флуктуаций синуса. Под этим подразумевается время, за которое любая движущаяся со временем точка графика скорости кристалла совершит полное колебание. На рис. 19 продемонстрирована одна флуктуация синуса.

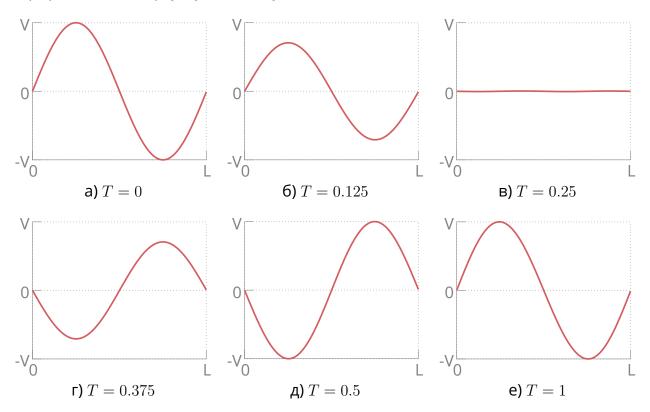


Рис. 19: T — период флуктуации синуса

Использованы следующие параметры системы: амплитуда A=0.01, количество частиц N=100;

По графику T(t) (рис. 20) видно, что через некоторое время система возвращается к состоянию, близкому к начальному. Это означает, что распределение скоростей вновь приобретает форму синуса. Также видно, что система возвращается к начальному состоянию не на 100%, а с некоторым отклонением.

На рис. 21 изображен тот же график, но на больший промежуток времени. По нему можно определить, в какой момент и насколько (относительно) распределение скоростей в цепочке было максимально похоже на начальное. Видно, что высота пика не снижается постоянно, а меняется по определенному закону.

# 3.2.4 Зависимость времени возвращения кристалла к начальному состоянию от количества частиц и амплитуды синуса

При фиксированной амплитуде имеется линейная зависимость (рис. 22) между количеством частиц в цепочке и временем, требуемым для возвращения синуса к начальному состоянию (время измеряется в периоде колебаний синуса).

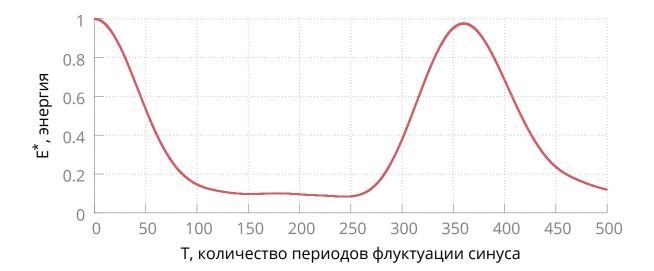


Рис. 20: Результаты

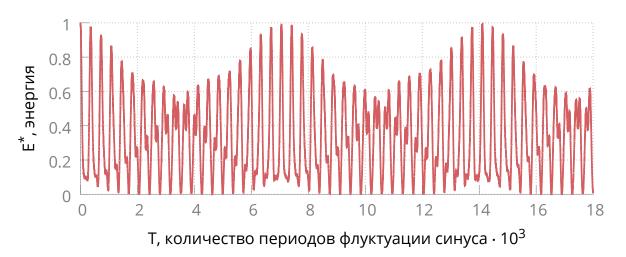


Рис. 21: Результаты, большое  ${\it T}$ 

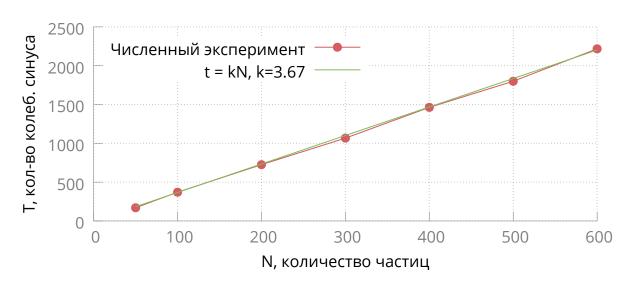


Рис. 22: Время возвращения к нач. состоянию от  ${\it N}$ 

Используемые параметры: амплитуда A=0.01, система рассчитана для N=50,100,200,300,400,500,600.

Для того, чтобы глубже понять характер зависимости между временем, требуемым для возвращения кристалла к начальному состоянию, количеством частиц и амплитудой синуса, рассчитаны значения T(N) для разных амплитуд. Значения представлены в таблице 3, графики зависимостей T(N) на рис. 23.

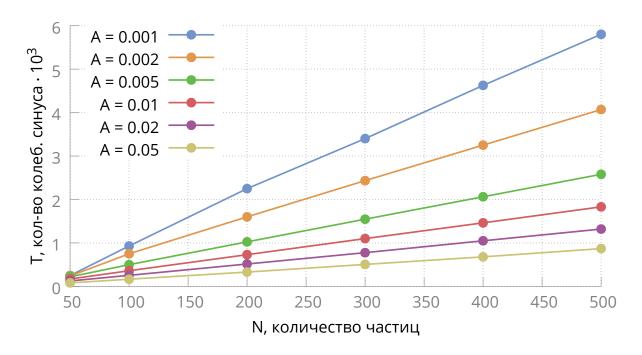


Рис. 23: T(N) для различных значений амплитуды

Таблица 3: Время возвращения к нач. состоянию от N и A

<b>AMERIAT</b> (102	Количество частиц в кристалле					
$\mid$ Амплитуда $\cdot 10^2$	50	100	200	300	400	500
0.1	250	930	2250	3400	4625	5800
0.2	240	750	1600	2433	3250	4070
0.5	220	500	1025	1547	2063	2580
1	170	360	730	1100	1463	1830
2	126	255	515	776	1050	1320
5	82	165	330	507	680	870

По рис. 23 видно, что при увеличении амплитуды синуса время, требуемое на возврат системы к начальному состоянию уменьшается.

#### 3.2.5 Высота второго пика

На рис. 24 показана зависимость высоты второго пика функции  $E^*(T)$  от количества частиц в цепочке. Амплитуда A=0.01. Под вторым пиком подразумевается второй по времени локальный максимум функции  $E^*(T)$ , который означает,

что после преобразования механической энергии кристалла в тепловую, произошло обратное преобразование, и тепловая энергия кристалла в максимальной степени преобразовалась в механическую. В этот момент распределение скоростей в кристалле вновь приобретает форму синуса. На рис. 20 можно наблюдать второй пик функции  $E^*(T)$  в момент времени  $T \approx 360$ .

По графику можно предположить, что со временем данное значение асимптотически стремится к нулю, но рассчитать его для большего N затруднительно, т.к. время, требуемое на расчет такой системы, растет нелинейно с увеличением количества частиц в цепочке.

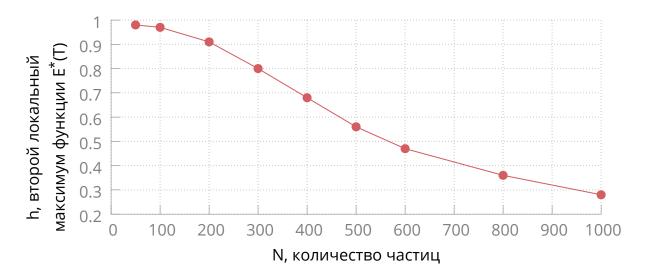


Рис. 24: Высота второго пика от N

#### 3.2.6 Время до снижения скорости затухания энергии

На рис. 25 показана зависимость времени, за которое значительно снижается скорость затухания функции  $E^*(T)$ , от количества частиц в цепочке (A=0.01). Судя по графику, это время — константа, равная  $\sim 115$  периодов колебаний синуса. Предположительно, это время зависит от A.

#### 3.3 Стохастическая задача

#### 3.3.1 Начальные условия

Начальные скорости в кристалле задаются следующим образом (рис. 26):

$$|v(x)|_{t=0} = A\left(\sqrt{2}\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) + \sqrt{3\sigma\rho}\right),$$

где A — амплитуда, L — длина кристалла,  $x\in[0,L]$ ,  $\sigma$  — дисперсия,  $\rho$  — случайная величина,  $\rho\in[-1,1]$ .



Рис. 25: Время затухания  $E^{st}$  от N

Дисперсия задается таким образом, что при  $\sigma=1$  вклад кинетической энергии от случайных флуктуаций равен вкладу кинетической энергии от синуса, при  $\sigma=2$  вклад энергии от случайных флуктуаций будет в два раза больше, при  $\sigma=3$  — в три раза и т.д.

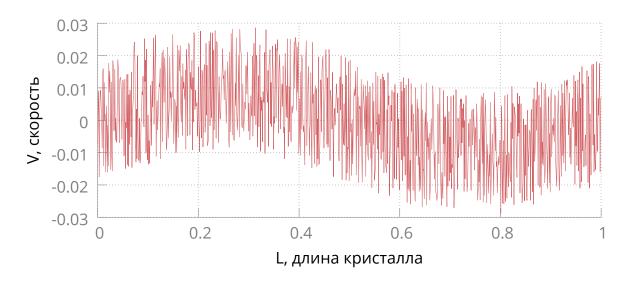


Рис. 26: Начальные условия

Для данной задачи написана специальная многопотоковая программа на языке C++ MPI для запуска на суперкомпьютере кафедры "Теоретическая механика".

#### 3.3.2 Время перехода механической энергии в тепловую

Исследовано время  $T_{\alpha}$ , за которое функция  $E^*(T)$  падает до определенного значения  $\alpha$ , в зависимости от дисперсии начальных флуктуаций  $\sigma$ .  $\alpha=0.1$ , т.е. получено время, за которое 90% механической энергии переходит в тепловую.

Амплитуда  $A = 0.01 \cdot \sqrt{2} \approx 0.0141$ .

Рассчитаны три случая — для количества частиц N=1000, N=5000 и N=25000. Для каждого случая рассчитано время  $T_{\alpha}$  для значений дисперсии  $\sigma=0;1;2;5;10;20;50;100$ .

Результаты представлены на рис. 27.

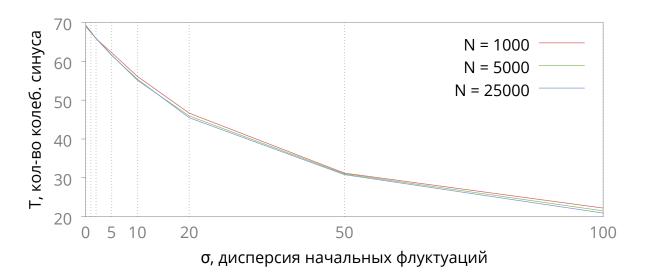


Рис. 27: Время затухания амплитуды

По графику видно, что при добавлении тепловой энергии (случайных флуктуаций) скорость затухания функции  $E^*(T)$  увеличивается, что означает, что механическая энергия кристалла быстрее переходит в тепловую. При добавлении тепловой энергии, превышающей механическую в 100 раз, скорость затухания функции  $E^*(T)$  увеличивается в ~3.5 раза. Также видно, что скорость затухания функции  $E^*(T)$  для исследованного диапазона дисперсии начальных флуктуаций практически не зависит от количества частиц.

#### 4 Заключение

Рассчитан одномерный кристалл, нагретый с помощью ультракороткого лазерного импульса. Проведено сравнение трех решений:

- решения стохастической задачи, где одномерный кристалл представлен как цепочка частиц, для которых задается масса, жесткость и температура как дисперсия скоростей частиц.
- решения дифференциального уравнения (1), взятого из [9]
- аналитического решения из [10].

Полученное решение стохастической задачи совпадает с решением дифференциального уравнения (1) и аналитическим решением с точностью до малых тепловых осцилляций.

Исследована задача о переходе механической энергии в тепловую и обратно в нелинейном одномерном кристалле. Заданная изначально механическая энергия в нелинейном одномерном кристалле постепенно переходит в тепловую. Если кристалл достаточно короткий, то через некоторое время происходит обратная трансформация энергии — некоторая часть тепловой энергии переходит обратно в механическую.

В ходе исследования получены следующая зависимость: чем длиннее кристалл, тем дольше нужно ждать обратной трансформации энергии, и тем меньше тепловой энергии перейдет обратно в механическую.

Расчеты показывают, что время  $T_r$ , требуемое на то, чтобы тепловая энергия трансформировалась обратно в механическую, зависит от начальных условий. Если распределение скоростей в кристалле задано с помощью синусоиды, то  $T_r$  обратно пропорционально амплитуде её колебаний.

Исследована зависимость скорости трансформации механической энергии в зависимости от количества тепловой энергии в начале расчета. На основе проведенных исследований можно сделать следующий вывод: добавление тепловой энергии к механической в начальный момент времени приводит к тому, что механическая энергия быстрее переходит в тепловую. При добавлении тепловой энергии, превышающей механическую в 100 раз, скорость перехода механической энергии в тепловую увеличивается примерно в 3.5 раза. Для исследованного диапазона частиц в кристалле (1000-25000) скорость перехода механической энергии в тепловую практически не зависит от количества частиц в кристалле.

# 5 Охрана труда

Основные нагрузки при выполнении данной работы: интеллектуальные, эмоциональные, зрительные, и, в меньшей степени, слуховые. Вся работа проводилась за ЭВМ. К опасным факторам условия работы относятся: потоки ионизирующего излучения, повышенная концентрация озона в воздухе, шум от вентиляции, опасный уровень напряжения в электрических сильноточных цепях.

# 5.1 Пожарная безопасность при работе с вычислительной техникой

Возникновение пожара возможно, если на объекте имеются горючие вещества, окислитель и источники зажигания. Горючий компонент при работе с вычислительной техникой — строительные материалы, оконные рамы, двери, полы, мебель, изоляция силовых и сигнальных кабелей, обмоток электродвигателей, а также радиотехнические детали и изоляция соединительных кабелей ячеек, блоков, конструктивные элементы из пластических материалов, жидкости для очистки элементов и узлов ЭВМ от загрязнения. Непрерывная циркуляция воздуха приводит к тому, что кислород имеется в любом месте помещения. Источниками зажигания могут оказаться электрические дуги, искры и перегретые участки элементов и конструкций ЭВМ. Источники зажигания возникают в электрических и электронных приборах, устройствах, применяемых для технического обслуживания ЭВМ, а также в системах электроснабжения. Таким образом, в помещениях, в которых находится вычислительная техника, присутствуют три основных фактора, необходимых для возникновения пожара. Опасность загорания в ЭВМ связана со значительным количеством плотно расположенных на монтажных платах и блоках: электронных узлов и схем, электрических и коммутационных кабелей, резисторов, конденсаторов, полупроводниковых диодов и транзисторов. Высокая плотность элементов в электронных схемах приводит к значительному повышению температуры отдельных узлов ( $80-1000^{\circ}$ C), что может служить причиной воспламенения изоляционных материалов. Слабое сопротивление изоляционных материалов воздействию температуры может вызывать нарушения схемы и привести к короткому замыканию. В связи с этим в помещениях вычислительного центра должны быть предусмотрены возможные пути эвакуации персонала. Требования к количеству, размерам и размещению эвакуационных выходов, лестниц и лестничных клеток установлены Ф3-123 от 22.07.08, а именно:

1.Эвакуационные выходы должны располагаться рассредоточено. Минимальное расстояние l между наиболее удаленными один от другого эвакуационными выходами из помещения следует определять по формуле:  $l = \sqrt{\Pi}$ , где  $\Pi$  —

периметр помещения.

- 2. Ширина путей эвакуации в свету должна быть не менее 1м, дверей- не менее 0.8м.
  - 3. Высота прохода на путях эвакуации должна быть не менее 2м.
- 4. Не допускается устройство винтовых лестниц, забежных ступеней, раздвижных и подъемных дверей и ворот, а также вращающихся дверей и турникетов.
- 5. Двери на путях эвакуации должны открываться по направлению выхода из здания.
- 6. Наружные эвакуационные двери зданий не должны иметь запоров, которые не могут быть открыты изнутри без ключа.

### 5.2 Требования электробезопасности

Для питания ЭВМ служит трехфазная электросеть с напряжением 380/220В и частотой 50Гц. Помещение, в котором располагался вычислительный центр, относится к помещениям без повышенной опасности (ГОСТ 12.1.013). Помещения, где размещаются рабочие места с ЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации (п.3.7 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03). При этом обслуживающий персонал должен допускаться до работы только после инструкции по технике безопасности. Изолирующие корпуса терминалов обеспечивают недоступность токоведущих частей, находящихся под напряжением.

# 5.3 Требования к вентиляции, отоплению и кондиционированию воздуха

В качестве нагревательных приборов в машинных залах ЭВМ следует устанавливать регистры из гладких труб или панели лучистого отопления. Не допускается использовать для отопления машинных залов электронагревательные приборы или паровое отопление. При кубатуре помещения до 20м² в помещение должно подаваться не менее 30м³/ч на человека. Параметры микроклимата на постоянных рабочих местах должны соответствовать требованиям СН 4088-86. Они должны быть следующими:

- 1. В холодные периоды года температура воздуха, скорость его движения и относительная влажность воздуха должны соответственно составлять: 22-24°C; 0.1м/c; 40-60%; температура воздуха может колебаться в пределах от 21 до 25°C
- 2. То же в теплые периоды года: 23 25°C; 0.1-0.2 м/с; 40-60%; температура воздуха может колебаться в пределах от 22 до 26°C. 3. Воздух, поступающий в помещения с ЭВМ, должен быть отчищен от загрязнений, в том числе от пыли и микроорганизмов. В помещениях, оборудованных ЭВМ, проводится еже-

дневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ (СанПиН 2.2.4.548-96).

#### 5.4 Требования к уровням шума

Допустимые уровни звукового давления, уровня звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах должны соответствовать требованиям СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Для снижения шума и вибрации оборудование необходимо устанавливать на специальные фундаменты и амортизирующие прокладки, предусмотренные нормативными документами. Стены и потолки помещений, где устанавливается оборудование, являющееся источником шумообразования, должны быть облицованы звукопоглощающим материалом, независимо от количества единиц установленного оборудования. Кроме того, необходимо использовать подвесные акустические потолки. Уровни звука и эквивалентные уровни звука в помещениях, где работают математики-программисты и операторы ВДТ, не должны превышать 50дБА. При выполнении напряженной работы, а также при длительности смены более 8ч. нормы могут быть снижены на 5дБА.

# 5.5 Требования к естественному и искусственному освещению для помещений вычислительных комнат

Освещение должно быть организованно в соответствии со СниП 23-05-95. Освещение в помещениях, где располагается вычислительная техника, должно быть смешанным: естественным и искусственным. Естественное освещение должно осуществляться в виде бокового освещения. Величина коэффициента естественной освещенности (к. е. о.) должна соответствовать нормативным уровням по СНиП П-4-79. При выполнении зрительной работы категории средней точности к. е. о. должен быть не ниже 1%. Ориентация светопроемов для помещений с ЭВМ должна быть северной. Искусственное освещение в помещениях следует осуществлять в виде комбинированной системы освещения с использованием люминесцентных источников света в светильниках общего назначения. В качестве источников должны использоваться люминесцентные лампы типа ЛБ и ДРЛ с индексом цветопередачи (R > 70). В качестве светильников должны использоваться установки с преимущественно отраженным или рассеянным светораспределением (тип УСП-5-2х40, УСП-35-2х40, ЛВ003-2х40-002). Величина освещенности при искусственном освещении люминесцентными лампами должна быть в горизонтальной плоскости не ниже 300лк- для системы общего освещения и не ниже 750лк — для системы комбинированного освещения, причем с учетом работы категории высокой зрительной точности может быть увеличена до 1000лк. При работе операторов и программистов с ВДТ, имеющими

негативное изображение, уровни искусственной освещенности от светильников общего освещения должны составлять: при систематическом использовании дисплеев и работе в режиме диалога уровни освещенности в горизонтальной плоскости должны быть не ниже 200лк и не ниже 500лк при использовании ВДТ и одновременной работе с документацией, а также при вводе данных в ЭВМ. Для исключения бликов отражения на экранах от светильников общего назначения необходимо применять антибликерные сетки, специальные фильтры для экранов, защитные козырьки и т.п. В поле зрения оператора ВДТ должно быть обеспечено соответствующее распределение яркости. Отношение яркости экрана ВДТ к яркости окружающих его поверхностей не должно превышать в рабочей зоне 3:1.

# 5.6 Требования к защите от статического электричества и излучений

Для предотвращения образования и защиты от статического электричества в помещениях где располагаются ЭВМ необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Допускаемые уровни напряженности электростатических полей не должны превышать 20кВ в течение 1 часа (ГОСТ 12.1.045-84). Уровни различных видов излучения, таких как рентгеновское, радиочастотное, видимое и ультрафиолетовое, генерируемых устройствами визуального отображения достаточно низки и не превышают действующих норм. Однако, следует учитывать, что мягкое рентгеновское излучение, возникающее при напряжении 20-22кВ на аноде, а также высокое напряжение на токоведущих частях схем вызывают ионизацию воздуха с образованием положительных ионов, считающихся неблагоприятными для человека. Поэтому в машинных залах необходимо контролировать уровень аэроионизации. Оптимальным уровнем аэроионизации в зоне дыхания работающего считается содержание легких аэроионов обоих знаков от 150 до 500В 1см<sup>3</sup> воздуха.

# 5.7 Требования к видеотерминальному устройству.

Видеомониторное устройство должно отвечать следующим техническим требованиям (СанПиН 2.2.2.542-96):

- 1. Яркость свечения экрана не менее 100 кд/ $M^2$
- 2. Минимальный размер светящейся точки не более 0.4мм для монохромного дисплея и не более 0.6мм для цветного дисплея.
  - 3. Контрастность изображения знака не менее 0.8.

- 4. Частота регенерации изображения при работе с позитивным контрастом в режиме обработки текста не менее 72 Гц.
  - 5. Количество точек в строке не менее 640.
- 6. Низкочастотное дрожание изображения в диапазоне 0.05-1.0 Гц должно находится в пределах 0.1 мм.
  - 7. Экран должен иметь антибликерное покрытие.
- 8. Размер экрана должен быть не менее 31см по диагонали, а высота символов на экране не менее 3.8мм, при этом расстояние от глаз оператора до экрана должно быть в пределах 40—80 см.

# Список литературы

- [1] Гольдштейн Р.В., Морозов Н.Ф. Механика деформирования и разрушения наноматериалов и нанотехнологии. Физ. мезомеханика. 2007. Т. 10. № 5. С. 17–30.
- [2] Кривцов А.М., Морозов Н.Ф. О механических характеристиках наноразмерных объектов. Физика твердого тела. 2002. Т. 44. № 12. С. 2158–2163.
- [3] Каток А.Б., Хасселблат Б. Введение в современную теорию динамических систем М.: Факториал, 1999. 768 с.
- [4] Арнольд В.И. Математические методы классической механики. Изд. 5-е стереотипное. М.: Едиториал УРСС, 2003. С. 62.
- [5] Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Т.З. Изд.2. М.: Едиториал УРСС, 2003 с.330
- [6] Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.
- [7] Кирьянов Д.В., Кирьянова Е.Н. Вычислительная физика. М.: Полибук Мультимедиа, 2006. 252 с.
- [8] Кривцов А.М. Колебания энергий в одномерном кристалле. Доклады Академии Наук, 2014, том 458, № 3, с. 279–281.
- [9] Кривцов А.М. Распространение тепла в бесконечном одномерном гармоническом кристалле. Доклады Академии Наук. 2015, том 464, № 2, в печати.
- [10] Бабенков М.Б., Цветков Д.В. Распространие тепла в линейном одномерном кристалле. в печати.
- [11] Путилов К.А. Курс физики. Том III. Оптика. Атомная физика. Ядерная физика. М.: ГИ ФМЛ, 1963, 636 с.