Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Физико-механический факультет
Кафедра “Теоретическая механика”

Диссертация допущена к защите
Зав. кафедрой
А. М. Кривцов
“ ” 2012г.

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание академической степени
МАГИСТРА

Тема: Разработка аналитических и компьютерных моделей динамических процессов в полимерах и агломератах частиц

Направление 010900 “Механика”

Выполнил: студент гр. 60510/11 Е.Ю. Витохин
Руководители: д.ф.-м.н., проф. Е.А. Иванова
Dr.-Ing. habil. S. Antonyuk
Консультант по вопросам охраны труда:
к.т.н., доц. В.В. Монашков

Санкт-Петербург
2012

Содержание

Введение 4

Часть I. Учет нелинейных эффектов при описании динамических процессов в полимерах 5

1.1. Цели и методы исследования 5
1.2. Современное состояние вопроса 7
1.2.1. Основные особенности полимеров 7
1.2.2. Методы описания вязкоупругих свойств 8
1.2.2.1. Теория сред с затухающей памятью 8
1.2.2.2. Реологические модели 11
1.2.3. Методы описания тепловых эффектов 16
1.3. Механическая модель, положенная в основу описания поведения материалов, обладающих термовязкоупругими свойствами 18
1.4. Определение коэффициента объемной вязкости по экспериментальным данным 22
1.4.1. Экспериментальное исследование термовязкоупругих свойств полимеров 23
1.4.1.1. Описание прибора 24
1.4.1.2. Схема эксперимента и результаты 24
1.4.2. Связь коэффициента поглощения и комплексного модуля 28
1.4.3. Аппроксимация эмпирических зависимостей для полимеров 29
1.5. Учет нелинейных термовязкоупругих эффектов для резины в одномерном случае 33
1.6. Численное решение линейной задачи термоупругости 35
1.7. Выводы по учету нелинейных эффектов при описании динамических процессов в полимерах 40
1.8. Список литературы 41

Часть II. Исследование поведения частиц в потоке 42

2.1. Цели и методы исследования 42
2.2. Описание экспериментальной установки 42
2.3. Исследование разрушения частиц 44
2.3.1. Описание эксперимента 44

2.4. Исследование газодинамики двухфазного потока пневматической пушки 54
2.4.1. Построение компьютерной модели и разбиение ее на сетку 56
2.4.2. Решение газодинамической задачи пневматической пушки с использованием метода вычислительной гидродинамики 57
2.4.3. Решение задачи движения твердых частиц в пневматической пушке под действием силы сопротивления и сопряженным методом с помощью метода дискретных элементов 66
2.5. Выводы по исследованию поведения частиц в потоке 71
2.6. Список литературы 72
Заключение 73
Приложение А. Охрана труда 74
3.1. Анализ и оценка условий труда в вычислительной лаборатории 74
3.1.1. Классы условий труда 75
3.1.2. Оценка критериев производственной среды 77
3.2. Список литературы 82

Введение

При описании динамических процессов в полимерах и агломератах частиц актуальной является задача создания новых аналитических и компьютерных моделей. Важнейшее место в построении таких моделей занимает эксперимент.

Данная работа состоит из двух частей. Первая посвящена учету нелинейных эффектов при описании динамических процессов в полимерах. Данное исследование заключается в распространении линейной теории термовязкоупругости на два случая нелинейности. Первый случай: учет нелинейной зависимости напряжений от механических деформаций. Второй случай: учет нелинейных тепловых эффектов. Учет нелинейности базируется на результатах экспериментальных исследований, проведенных в рамках научной работы на кафедре МСС и ВТ Пермского Государственного Университета. Кроме того разрабатывается численный алгоритм для решения задач термовязкоупругости. С помощью предложенного численного алгоритма производится решение линейной задачи термоупругости для сравнения данного решения с существующим аналитическим решением. Это необходимо для проверки правильности работы предложенного численного алгоритма.

Вторая часть работы состоит в исследовании поведения частиц и агломератов частиц в потоке. В этом исследовании производится экспериментальное изучение разрушения агломератов частиц, детальное рассмотрение данного процесса, а также нахождение параметров разрушения. Кроме того производится численное исследование динамики частиц в потоке с помощью методов вычислительной гидродинамики и метода дискретных элементов. Находятся такие динамические характеристики, как зависимость скорости частиц от координаты и траектории движения частиц в потоке.

Отличительной особенностью предлагаемого метода решения поставленных задач является использование эмпирических данных для построения аналитических зависимостей.

Часть I. Учет нелинейных эффектов при описании динамических процессов в полимерах

1.1. Цели и методы исследования

В работах Е.А. Ивановой предложена новая линейная модель термовязкоупругости.

Цель данной работы заключается в распространении этой теории на два случая нелинейности:

- *Учет нелинейной зависимости напряжений от механических деформаций.*
- *Учет нелинейных тепловых эффектов.*

Метод исследования опирается на использование опытных результатов, полученных в ходе экспериментальной работы по определению вязкоупругих свойств полимеров, которая проводилась в Пермском Государственном Университете под руководством Г.П. Башина.

В ходе данного исследования будет проведен анализ существующих подходов описания термовязкоупругих свойств материалов, а также произведено описание линейной теории термовзякоупругости, предложенной Е.А. Ивановой. Будет показано, как проводились эксперименты по определению вязкоупругих свойств полимеров, а также приведены результаты этих экспериментов. Также будет находиться связь параметров вязкости линейной теории и описанных экспериментальных данных, после чего будет произведена аппроксимация приведенных эмпирических зависимостей непрерывными аналитическими функциями. На основе уравнений линейной теории термовязкоупругости Е.А. Ивановой, с помощью полученной связи параметров этой модели и экспериментальных

данных, а также с использованием полученных непрерывных зависимостей будут приведены основные нелинейные уравнения термовязкоупругости для полимеров. Ввиду трудоемкости нахождения численного решения нелинейной задачи термовязкоупругости, в качестве начального этапа будет произведено численное решение линейной задачи, без учета вязкости.

1.2. Современное состояние вопроса

1.2.1. Основные особенности полимеров

Полимеры - высокомолекулярные соединения, молекулы которых (макромолекулы) состоят из большого числа одинаковых группировок (мономеров), соединенных химическими связями.

В связи с важной ролью, которую играют в настоящее время полимеры как конструкционные материалы, а также в связи с проблемой переработки их в изделия, изучение механических свойств полимеров приобретает исключительно большое значение.

Одной из замечательных особенностей полимеров являются их резко выраженные вязкоупругие, нелинейные (рис. 1.1) и диэлектрические свойства, а также слабая теплопроводность. Такое поведение обуславливает уникальный комплекс основных физико-механических свойств полимеров.

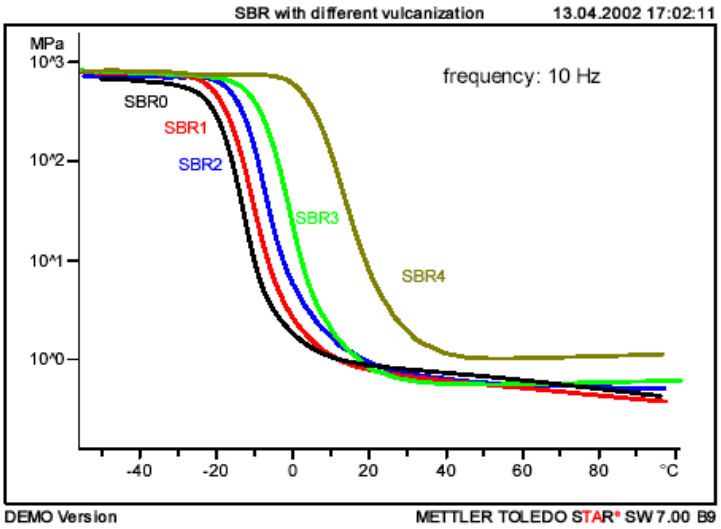


Рис. 1.1 Нелинейная зависимость упругого модуля от температуры

В полимере каждая гибкая нитеподобная молекула заполняет средний объем, намного больший, чем размеры атома; при этом макромолекула непрерывно изменяет свою форму, поскольку она изгибается под действием тепловой энергии. Для характеристики различных конформаций, или формы контура цепи, которые принимает такая молекула, необходимо рассмотреть вначале расположение всей цепи, затем более детально – расположение друг относительно друга отдельных частей этой цепи и т.д., закончив этот процесс рассмотрением ориентации связей основной цепи в атомном масштабе. Это схематически показано на рис. 1.2. Эти типы

пространственного расположения макромолекулы в порядке увеличения расстояний «узлами», «витками» и «клубками». Перераспределение локальных структур (клубков) осуществляется относительно быстро, а перераспределение структур дальнего порядка (клубков) – очень медленно. Под действием напряжения в полимере возникает новый набор конформаций: реакция на новое распределение узлов осуществляется быстро, а реакция на распределение клубков – медленно, и если учесть все

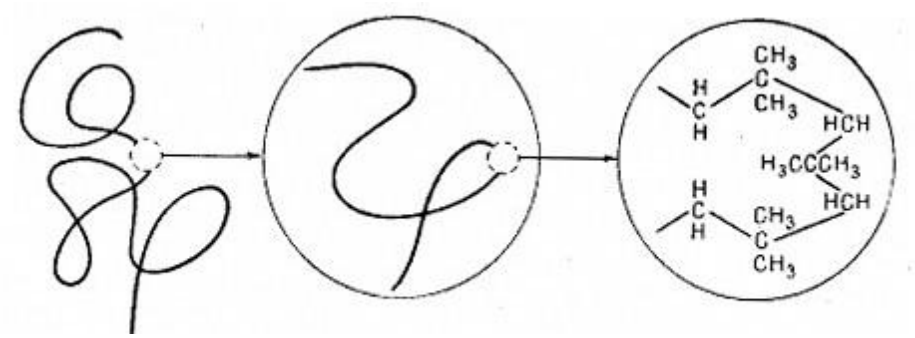


Рис. 1.2 Схематическое изображение расположения участков гибкой молекулы полимера (полиизобутилена) с различной степенью увеличения

возможные процессы, то существует очень широкая и непрерывная область времен, характеризующих реакцию такой системы на внешнее напряжение.

Для описания вязкоупругих свойств материалов существует два основных подхода: теория сред с затухающей памятью и теория сред со сложной реологией.

1.2.2. Методы описания вязкоупругих свойств

1.2.2.1. Теория сред с затухающей памятью

Поведение упругого материала в любой момент времени зависит только от суммарного уровня напряжений. Рассмотрим материал более общего типа, обладающий свойством, которое можно назвать эффектом памяти. При этом поведении материала определяется не только текущим напряженным состоянием, но и всеми прошлыми напряженными состояниями, так что, вообще говоря, материал «запоминает» эти прошлые состояния. Подобная же ситуация возникает, если обратиться к деформациям; в этом случае текущее напряжение зависит от всей истории деформаций.

Помимо теории сред с затухающей памятью существует много других теорий механического поведения материалов с памятью, например инкрементальная теория пластичности. Разница между этими двумя теориями состоит в том, что в теории пластичности не учитывается масштаб времени, используемый в программах нагружения и разгрузки, тогда как в теории вязкоупругости имеется характерная зависимость от времени или от скорости деформации.

В рамках данного подхода связь между напряжениями и деформацией может быть представлена в виде:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \int_0^t {}^4\underline{\underline{G}}(t-\tau) \cdot\cdot\, \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} d\tau \quad (1)$$

где функции ${}^4\underline{\underline{G}}(t-\tau)$ называются *функциями релаксации*, которые и характеризуют степень зависимости напряжений в данный момент времени от истории деформации.

Другую форму соотношения между напряжениями и деформациями можно получить, поменяв в предшествующем выражении ролями деформации и напряжения таким образом, что мгновенные деформации определяются мгновенными значениями и историей изменения напряжений. Тогда можно записать зависимость

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \int_0^t {}^4\underline{\underline{J}}(t-\tau) \cdot\cdot\, \underline{\underline{\dot{\sigma}}} d\tau \quad (2)$$

Функции ${}^4\underline{\underline{J}}(t-\tau)$ называются *функциями ползучести*; так же, как и функции релаксации, они характеризуют механические свойства материала. В отличие от теории упругости в данном подходе нельзя привести тривиальную связь между этими функциями.

Пусть история деформаций определяется гармонической функцией времени в соответствии с формулой

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

Где $\tilde{\varepsilon}_0$ – амплитуда, а ω - частота колебаний.

В (1), учитывая соотношение (3), к функциям релаксации ${}^{4}\underline{\underline{G}}(t-\tau)$ применим преобразование фурье. Таким образом можно получить следующее соотношение между напряжениями и деформациями

$$\tilde{\sigma}(t) = G^*(i\omega)\tilde{\varepsilon}_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

Где $G^*(i\omega)$ – комплексный модуль – представляет собой комплексную функцию частоты, подлежащую определению. Выделяя действительную и мнимую части $G^*(i\omega)$, получаем

$$G^*(i\omega) = G_1(\omega) + iG_2(\omega)$$

Величины $G_1(\omega)$ и $G_2(\omega)$ иногда называются *модулями накопления* (storage) и *потерь* (loss) соответственно.

Соотношение (4) можно переписать в виде

$$\tilde{\sigma}(t) = |G^*(i\omega)|\tilde{\varepsilon}_0 e^{i(\omega t+\delta)}$$

где $|G^*|$ - асболютная величина G^* и

$$\mathrm{tg}\,\delta = \frac{G_2(\omega)}{G_1(\omega)}$$

Величину $\mathrm{tg}\,\delta$ иногда называют тангенсом потерь, а δ - сдвигом фаз.

Модуль накопления G_1 равен отношению составляющей напряжения, совпадающей по фазе с деформацией, к величине этой деформации. Модуль накопления является мерой энергии, получаемой и отдаваемой элементарным объемом данного тела за период.

Модуль потерь G_2 представляет собой отношение составляющей напряжения, отличающейся по фазе на $\pi/2$ от деформации, к величие этой деформации. Модуль потерь является мерой той части энергии упругих колебаний, которая превращается в тепло за один период колебаний. Чем больше сдвиг фаз между напряжениями и деформацией, тем больше величина G_2. В тех случаях, когда сдвиг фаз между напряжением и деформацией становится наибольшим, G_2 проходит через максимум. Таким образом, G_2 характеризует диссипацию энергии колебаний в вязкоупругом теле.

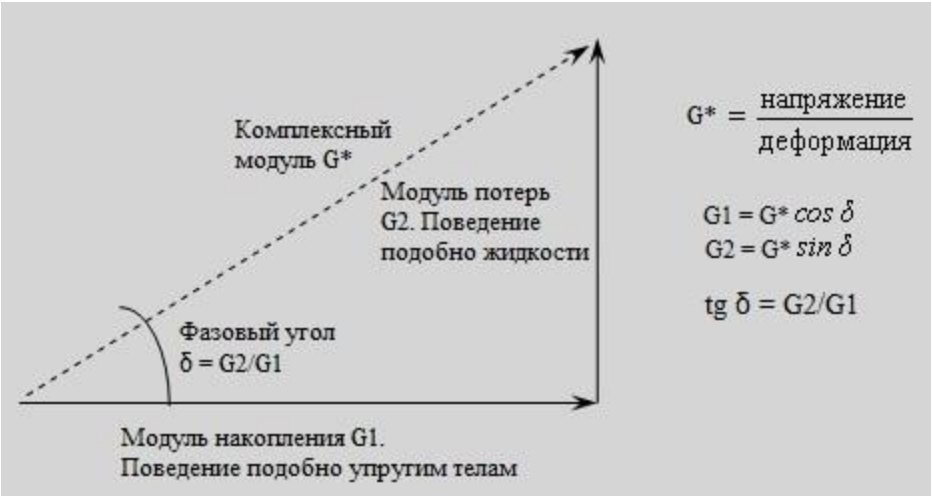


Рис. 1.3 Вязкоупругость и комплексный модуль

На рис. 1.3 показано, как можно наглядно представить комплексный модуль, модуль потерь и накопления. Кроме того, для них верны следующие выражения

$$G_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\cos\delta$$

$$G_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\sin\delta$$

где σ_0 и ε_0 - амплитуды напряжений и деформаций соответственно.

Таким образом G_1 характеризует упругую составляющую деформации вязкоупругого тела, а G_2 - вязкую. Поэтому, для более яркого отражения сути величины, будем называть модуль накопления *динамическим модулем упругости*. Также обозначим комплексный модуль, динамический модуль упругости и модуль потерь по аналогии с упругим телом:

$$E^* = E_1 + iE_2$$

$$E^* = G^*, \qquad E_1 = G_1, \qquad E_2 = G_2$$

Данные обозначения приняты, например, в книге И.И.Перепечко [2]. Далее будем придерживаться этих обозначений.

1.2.2.2. Реологические модели

Модель Максвелла. Наиболее простой моделью, сочетающей упругие и вязкие свойства, является модель Максвелла (рис. 1.4). При быстром нагружении тела, соответствующие модели Максвелла проявляют упругие

свойства. Их механическое противодействие прямо пропорционально деформации (Закон Гука). При медленном нагружении эти тела текут, причем скорость деформации прямо пропорциональна приложенному напряжению (Закон Ньютона).

Модель Максвелла представляет собой последовательное соединение

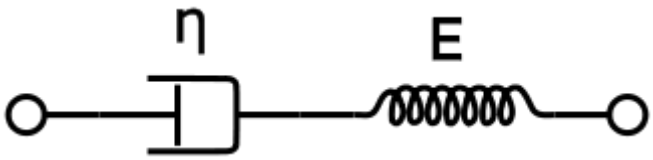


Рис. 1.4 Механическая модель Максвелла

идеально упругой пружины и демпфера, т.е. тела, погруженного в вязкую жидкость, течение которой подчиняется закону Ньютона. Очевидно, что сразу же после приложения силы наступит упругая деформация пружины, а затем в течение всего времени действия силы будет развиваться вязкое течение, следствием которого является необратимая часть общей деформации, та часть, которая не исчезает после прекращения действия силы. Таким образом, в каждый момент времени:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \qquad (5)$$

где ε_1 - упругая деформация пружины, а ε_2 - необратимая деформация вязкого элемента. Однако для упругой пружины, согласно закону Гука, деформация связана с напряжением следующим соотношением:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}\sigma$$

где E - модуль упругости, а $\frac{1}{E}$ - податливость пружины.

Упругая деформация возникает мгновенно при каждом данном значении напряжения, и поэтому скорость изменения деформации определяется скоростью изменения напряжения:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

Благодаря тому, что оба элемента модели соединены последовательно, напряжение на вязком элементе будет таким же, как и на упругом. По закону

Ньютона, при увеличении силы σ, приложенной к жидкости, пропорционально увеличивается скорость течения последней (v):

$$\sigma = \eta v$$

где η - вязкость жидкости, заполняющей демпфер. Учитывая, что $v = d\varepsilon_2/dt$, получим

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}$$

Воспользовавшись формулой (5) можно записать определяющее уравнение в дифференциальной форме:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}$$

В [2] приведен вывод выражений, связывающих комплексные модули с параметрами модели Максвелла, которые имеют следующий вид:

$$E^*(i\omega) = \frac{i\omega\tau E}{1 + i\omega\tau} = E_1(\omega) + iE_2(\omega)$$

$$E_1(\omega) = \frac{E\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$E_2(\omega) = \frac{E\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2},$$

где $\tau = \frac{\eta}{E}$ - время релаксации, а $\omega\tau$ - безразмерная частота.

Анализ этих выражений показывает, что модель Максвелла не может быть использована для описания динамических вязкоупругих свойств полимеров. Действительно, из выражения для E_1 видно, что в случае предельно низких частот (при $\omega\tau \to 0$) $E_1 \to 0$. Таким образом, в этой модели динамический модуль упругости не имеет отличного от нуля конечного значения при $\omega \to 0$, что противоречит экспериментальным данным и указывает на некорректность использования этой модели для описания динамических вязкоупругих свойств полимеров. Кроме того, для этой модели $\mathrm{tg}\delta = E_2/E_1 = 1/(\omega\tau)$; это означает, что $\mathrm{tg}\delta$ не имеет максимума, что также плохо согласуется с экспериментальными данными (рис. 1.5).

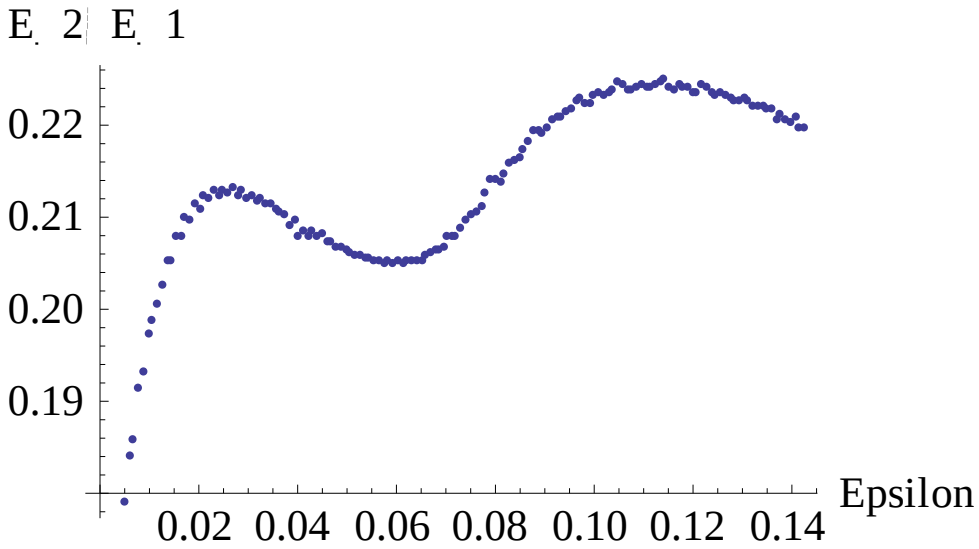


Рис. 1.5 Эмпирическая зависимость сдвига фаз от деформации для резины

Модель Кельвина-Фойхта. Модель Максвелла совершенно не учитывает наличия в полимерных материалах упругости, отличной от гуковской, т.е. упругости, возникающей за счет развертывания макромолекул. Основной особенностью этого вида упругости является необходимость конечного промежутка времени для ее развития. Создается впечатление, что мы деформируем пружину, находящуюся в вязкой среде. Такое представление имеет известную аналогию с развертыванием цепных молекул, находящихся в вязкой среде себе подобных макромолекул. Такая «запаздывающая» упругая реакция может быть представлена моделью, предложенной Кельвином и независимо от него Фойхтом.

Модель представляет собой параллельное жесткое соединение упругого и вязкого элемента (рис. 1.6).

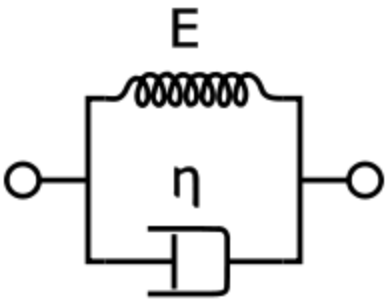


Рис. 1.6 Модель Кельвина-Фойхта

В отличие от модели Максвелла, величина удлинения здесь одинакова для обоих элементов, а общее напряжение складывается из напряжений, возникающих в каждом из элементов:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2,$$

где σ_1 и σ_2 – напряжения на упругом и вязком элементе соответственно. Благодаря тому, что $\sigma_1 = E\varepsilon$, а $\sigma_2 = \eta v = \eta d\varepsilon/dt$, определяющее уравнение в дифференциальной форме для модели Кельвина-Фойхта, примет вид:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Выражения, связывающие параметры данной модели с комплексным модулем упругости, представленные в [2], имеют вид:

$$E^*(i\omega) = E(1 + i\omega\tau) = E_1 + iE_2$$

$$E_1 = E$$

$$E_2 = E\omega\tau = \omega\eta$$

$$\mathrm{tg}\delta = \omega\tau$$

Таким образом, в случае модели Кельвина-Фойхта динамический модуль упругости не зависит от частоты и $\mathrm{tg}\delta$ не имеет максимума на кривой $\mathrm{tg}\delta = f(\omega\tau)$. Оба эти условия вряд ли могут выполняться в таких средах, как полимерные материалы, вязкоупругие свойства которых проявляются чрезвычайно сильно.

В результате мы видим взаимосвязь параметров, которые используются для описания вязкоупругого поведения материалов с помощью теории сред с затухающей памятью и параметров различных реологических моделей. Это говорит о том, что данные подходы связаны и не противоречат друг другу.

Реологические модели, несомненно, обладают наглядным представлением механических процессов, происходящих при деформации вязкоупругих материалов, однако, как было показано выше, и как считают некоторые авторы [3], эти модели носят слишком ограниченный характер. Конечно, можно вводить в рассмотрение различные модификации, в которых имелись бы последовательные повторения элементов Максвелла или Кельвина-Фойхта (обобщенные модели); или различные комбинации чередований вязких и упругих элементов (например: модель линейного вязкоупругого тела [2]). Такие модификации, несомненно, более точно описывают спектр вязкоупругих эффектов в материалах, однако это приводит к значительному увеличению количества параметров модели.

1.2.3. Методы описания тепловых эффектов

На данный момент в науке существует целый ряд методов, используемых для рассмотрения тепловых эффектов. Остановимся на некоторых из них.

Подход Трусделла. В основу данного подхода положено *неравенство Клаузиуса-Дюгема,* которое в локальной форме имеет вид:

$$\dot{H} \geq \frac{\nabla \cdot \underline{h}}{\tilde{T}} - \frac{\underline{h} \cdot \nabla \tilde{T}}{\tilde{T}^2} + \frac{1}{\tilde{T}} \rho s \qquad (6)$$

где $\underline{h}$ - тепловой поток, s - интенсивность источников тепла, H – энтропия, $\tilde{T}$ - температура, ρ – плотность.

Неравновесная термодинамика. Данный подход развивал И. Пригожин. Он утверждал, что выполняется *уравнение баланса энтропии*:

$$\dot{H} = -\nabla \cdot J_s + \sigma \qquad (7)$$

где J_s - поток энтропии, σ - производство энтропии.

Возникает вопрос, почему в данном выражении стоит знак равенства, в отличие от (6)? Нет ли в этом противоречия? Однако противоречия в этом нет, потому что в неравновесной термодинамике понятие энтропии вводится иначе, нежели у Трусделла. В неравновесной термодинамике приращение энтропии складывается из двух частей: прироста за счет внутренних процессов $d_i H$ и внешних процессов $d_e H$.

$$dH = d_e H + d_i H$$

Накладывается условие, что $d_i H \geq 0$. В результате противоречие между (6) и (7) пропадает.

Молекулярно-кинетическая теория. В данном подходе температура вводится как величина пропорциональная средней кинетической энергии хаотического движения.

Статистическая физика является развитием молекулярно-кинетической теории. Температура здесь вводится как производная от внутренней энергии по энтропии. И, если взять в качестве функции распределения функцию Максвелла, то температура будет пропорциональна средней кинетической энергии хаотического движения – так же, как в МКТ.

В механике сплошных сред для описания тепловых эффектов, как правило, используются метод Трусделла или метод неравновесной термодинамики.

Методы МКТ и статистической физики плохо совместимы с методами механики сплошной среды, потому что в них температура попадает в выражение для кинетической энергии, а в МСС – во внутреннюю энергию.

1.3. Механическая модель, положенная в основу описания поведения материалов, обладающих термовязкоупругими свойствами

Для описания термовязкоупругих свойств будем использовать модель, предложенную Е.А. Ивановой [7, 8, 9].

В качестве модели вязкости в данном подходе лежат следующие идеи: 1) предполагается, что частицы материи погружены в некоторую *безграничную* среду, которую можно назвать «физический вакуум», «поле» или «эфир»; 2) внутреннее трение обусловлено тем, что при движении частиц материи в «эфире» возникают волны, в результате часть энергии частиц материи расходуется на образование волн в «эфире». Это аналогично тому, что при движении твердого тела в жидкости потери энергии обусловлены тремя факторами: 1) трение между твердым телом и жидкостью; 2) образование вихрей в жидкости; 3) образование волн в жидкости (Наибольшие потери энергии связаны с образованием волн). Отличие же заключается в том, что взаимодействие частиц материи с «эфиром» происходит по вращательным степеням свободы, а не по трансляционным, как в случае твердого тела и жидкости.

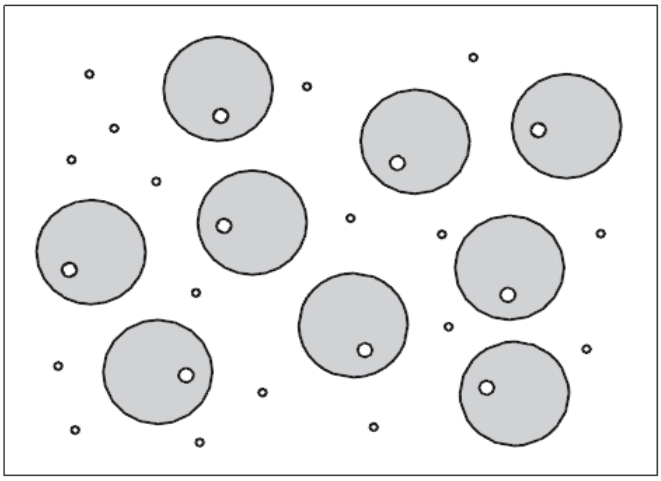


Рис. 1.7 Континуум однороторных гиростатов

Для описания термовязкопругих процессов, проходящих в материале, используется модель континуума *однороторных гиростатов*. (рис. 1.7) Гиростат – это система двух абсолютно твердых тел: несущего тела и внутреннего ротора. Ротор не может совершать трансляционное перемещение относительно несущего тела, но может вращаться, причем так,

чтобы не изменялось распределение масс в гиростате, т.е. если ротор – осесимметричный, то он может вращаться только вокруг своей оси, если же он обладает сферической симметрией, то он может совершать сферическое вращение.

Взаимодействие несущих тел гиростатов отвечает за механические процессы. Взаимодействие роторов моделирует тепловые процессы. Взаимное влияние несущих тел и роторов обеспечивает взаимосвязь механических и тепловых процессов. Частицы «теплового эфира» (аналог фононов) обеспечивают механизм теплопроводности и вязкости.

Основные уравнения динамики континуума однороторных гиростатов [7, 8, 9] имею вид:

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}^s - \nabla \times \underline{q} + \rho \underline{f} = \rho \frac{d^2 \underline{u}}{dt^2} - \frac{\alpha K_{iz} T_a^*}{\beta c_v \eta_v} \frac{d^2 \underline{\theta}_a}{dt^2}, \quad \nabla \times \underline{\varphi} = 0,$$

$$\nabla \tilde{T}_a - \nabla \times \underline{\widetilde{M}}_a + \frac{\alpha K_{iz} T_a^*}{c_v \eta_v} \left(\frac{d\underline{u}}{dt} + \frac{1}{\beta} \frac{d^2 \underline{u}}{dt^2} \right) - \frac{T_a^*}{\lambda} \left(\frac{d\underline{\theta}_a}{dt} + \frac{1}{\beta} \frac{d^2 \underline{\theta}_a}{dt^2} \right) = -\rho \underline{L}_h^a,$$

$$\underline{\underline{\tau}}^s = \left[\left(K_{iz} - \frac{2}{3} G \right) \varepsilon - \alpha K_{iz} \tilde{T}_a \right] \underline{\underline{E}} + 2G \underline{\underline{\varepsilon}}^s, \quad \underline{\underline{\varepsilon}}^s = \frac{1}{2} \left(\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T \right), \quad \varepsilon = \mathrm{tr} \underline{\underline{\varepsilon}}^s,$$

$$\underline{q} = \frac{\lambda (\eta_q - \eta_s)(K_{ad} - K_{iz})}{c_v \eta_v^2} \underline{\gamma} - \frac{\alpha K_{iz} T_a^* \eta_s}{\rho c_v \eta_v} \nabla \times \underline{\theta}_a, \quad \underline{\gamma} = \nabla \times \underline{u} - 2\underline{\varphi},$$

$$\nabla \cdot \underline{\theta}_a = \frac{\rho c_v}{T_a^*} \tilde{T}_a + \alpha K_{iz} \varepsilon, \quad \underline{\widetilde{M}}_a = -\frac{\alpha K_{iz} T_a^* \eta_s}{\rho c_v \eta_v} \underline{\gamma} + \frac{(\eta_q - \eta_s) T_a^*}{\lambda \rho} \nabla \times \underline{\theta}_a,$$

где $\underline{\underline{\tau}}_s$ – симметричная часть тензора напряжений, $\underline{\varphi}$ – угол поворота гиростатов, $\underline{q}$ - антисимметричная часть тензора напряжений, $\underline{\widetilde{M}}_a$ - антисимметричная часть тензора моментных напряжений взаимодействия роторов, $\underline{f}$ - плотность массовых сил, $\underline{u}$ – перемещения гиростатов, $\underline{\theta}_a$ – угол поворота роторов, $\tilde{T}_a$ - шаровая часть тензора моментных взаимодействий роторов, $\underline{\underline{\varepsilon}}^s$ и $\underline{\gamma}$ - меры деформации, $\underline{L}_h^a$ – плотность массовых моментов, действующих на роторы гиростатов.

Допустим, что $\underline{q} = 0$ и $\underline{\widetilde{M}}_a = 0$. Тогда уравнение баланса энергии примет вид:

$$\frac{d(\rho U_m)}{dt} = \underline{\underline{\tau}}^s \cdot\cdot \frac{d\underline{\underline{\varepsilon}}^s}{dt} + T_a \frac{d\nabla \cdot \theta_a}{dt},$$

Здесь слагаемое $\nabla \cdot \theta_a$ обуславливает наличие тепловых эффектов. Вязкость (т.е. диссипация энергии, связанной с трансляционными степенями свободы) обусловлена тем, что количество движения частиц зависит от угловой скорости внутренних роторов, а кинетический момент роторов - от трансляционной скорости частиц. Эта зависимость обеспечивает перекачку энергии с трансляционных степеней свободы на внутренние вращательные степени свободы (связанные с тепловыми процессами).

где U_m – внутренняя энергия. Предположим, что приведенная выше модель описывает поведение классической среды, которая помимо упругих свойств, также обладает вязкими и теплопроводными свойствами. Тогда последнее слагаемое в уравнении баланса энергии имеет термодинамический смысл. Т.е. T_a имеет смысл абсолютной температуры, а $\nabla \cdot \theta_a$ имеет смысл плотности энтропии. Проблема размерности решается путем введения соответствующего нормировочного коэффициента. Тогда систему уравнений, описывающую динамику однороторных гиростатов можно рассматривать как систему уравнений, описывающую термовязкоупругое поведение классической среды. При этом величины q и $\underline{\widetilde{M}}_a$ введены для того, чтобы система обладала сдвиговой вязкостью. Величина $\widetilde{T}_a$ – отклонение абсолютной температуры от значения T_a^*, при которой определены параметры модели.

Коэффициенты приведенной выше модели тогда имеют следующий физический смысл: α - коэффициент температурного расширения, K_{iz} - изотермический коэффициент объемного сжатия, K_{ad} - адиабатический коэффициент объемного сжатия, c_v – теплоемкость, η_v - объемный коэффициент вязкости, η_s и η_q – коэффициенты сдвиговой вязкости , β^{-1} - время релаксации теплового потока, λ – теплопроводность, ρ – плотность.

Отличие описанного подхода, например, от подхода Трусделла заключается в следующем: в предложенном подходе не используется неравенство Клаузиуса-Дюгема для получения определяющих уравнений и уравнения теплопроводности; кроме того, в нем есть механическая интерпретация температуры и энтропии, которая позволяет получить

уравнение теплопроводности из уравнения движения роторов, а определяющие уравнения получаются из уравнения баланса энергии.

1.4. Определение коэффициента объемной вязкости по экспериментальным данным

Коэффициент объемной вязкости, фигурирующий в описанной выше модели, отличается от того, который используется в литературе. Для того, чтобы определить этот коэффициент объемной вязкости можно использовать коэффициент поглощения акустических волн, значение которого определяется экспериментально и для ряда веществ приведено в справочниках.

Решив задачу о распространении волн в среде, которая описывается приведенными выше уравнениями, получим комплексное дисперсионное соотношение, связывающее между собой волновое число, коэффициент затухания и частоту. На рис. 1.8 приведены дисперсионные кривые, характеризующие зависимость затухания от частоты. Эти кривые соответствуют модели термовязкоупругости, предложенной Ивановой Е.А., а также термоупругости гиперболического типа.

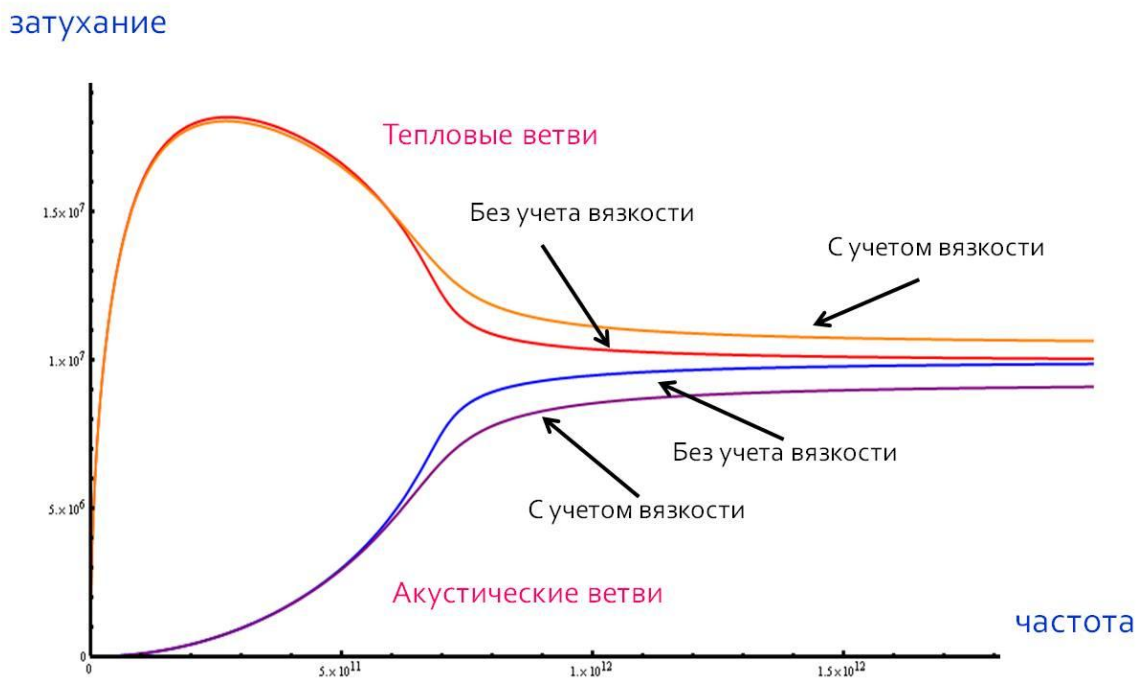


Рис. 1.8 Дисперсионные зависимости

Проводится асимптотический анализ дисперсионных соотношений для случая акустических волн при низких частотах. Делается это следующим образом: комплексное дисперсионное соотношение записывается в виде двух вещественных, затем эти уравнения упрощаются для случая низких

частот, после этого из них исключается волновое число, получается соотношение, согласно которому коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В этом соотношении фигурирует ряд констант, в том числе коэффициент вязкости. Измерив коэффициент поглощения и скорость распространения сигнала при заданной частоте, а также зная значения остальных констант, можно определить коэффициент вязкости.

В итоге, в одномерном случае можно получить следующее выражение для объемного коэффициента вязкости:

$$\eta_v = -\frac{2\rho c^3}{\omega\left(\frac{\rho c^2}{E} - 1\right)}\left(\frac{\gamma}{\omega}\right) + \frac{\lambda}{c_v}, \qquad (8)$$

где γ – коэффициент затухания, ω - частота, c - скорость звука в среде. Выражение (8) также имеет теоретический характер

1.4.1. Экспериментальное исследование термовязкоупругих свойств полимеров

В ходе экспериментальной работы на кафедре МССиВТ Пермского Государственного университета под руководством Башина Г.П. были получены зависимости параметров теории сред с затухающей памятью: динамического модуля упругости E_1, модуля потерь E_2 и сдвига фаз δ ($\mathrm{tg}\,\delta = E_2/E_1$) от амплитуды перемещений в одной серии опытов, и от температуры в другой серии опытов. В опытах с переменной амплитудой перемещений испытывались образцы из резины с углеродистым наполнителем и без него, а в экспериментах с переменной температурой исследовалось поведение чистого и содержащего различное количество наноглины полиэтилена. Средние размеры образцов были равны 2x4x20 мм, при базовой длине, которая указана в документации к прибору, 10,5 мм. Эксперименты проводились на приборе, предназначенном для динамического механического анализа (ДМА) DMA/SDTA 861e компании Mettler-Toledo.

1.4.1.1. Описание прибора

Технические характеристики

- Диапазон температур: от -150 до 500 °C;
- Максимальная нагрузка: 12Н, 18Н или 40Н;
- Минимальная нагрузка: 0.005;
- Диапазон частот: от 0.001 до 1000 Гц.

Режимы измерения

Режимы измерения основываются на изменении температуры, частоты или амплитуды нагрузки.
Наиболее употребительные режимы работы DMA/SDTA861e:

- Изотермические измерения и сканирование по температуре;
- Измерения при одной или нескольких выбранных частотах;
- Частотное сканирование;
- Измерение кривых нагрузка-деформация.

Области применения прибора DMA

Метод динамического механического анализа (ДМА) применяется для исследования вязкоупругих свойств материалов ($E_1, E_2, E_2/E_1$) в зависимости от времени, температуры или частоты. Прибор динамического механического анализа DMA/SDTA 861e производства МЕТТЛЕР ТОЛЕДО работает в широком диапазоне нагрузок, позволяя одинаково успешно выполнять измерения модуля упругости как очень мягких, так и высокопрочных материалов.

1.4.1.2. Схема эксперимента и результаты

В серии опытов с *резиной*, имеющей 0% и 40% углеродистого наполнителя, гармоническая растягивающая нагрузка варьировалась таким образом, чтобы амплитуда перемещений изменялась в диапазоне от 0 до 1500 мкм (порядка 14%) с малым шагом и обратно в рамках одного эксперимента. Эксперименты проводились при комнатной (приблизительно постоянной, 25-27 град.) температуре. Частота гармонической

растягивающей нагрузки 1 Гц и 10 Гц. Для одного и того же образца проводилось несколько экспериментов с различным интервалом времени (от нескольких часов, до нескольких недель).

Для частоты 1 Гц были получены следующие значения динамического модуля упругости:

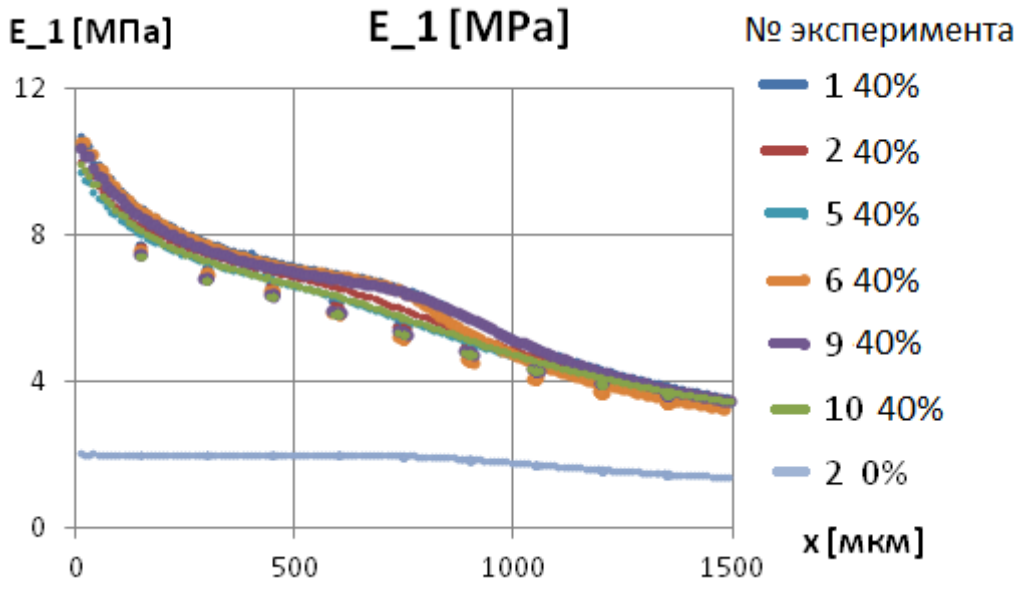


Рис. 1.9 Динамический модуль упругости резины при частоте возбуждающей нагрузки 1 Гц. В легенде указано процентное содержание наполнителя

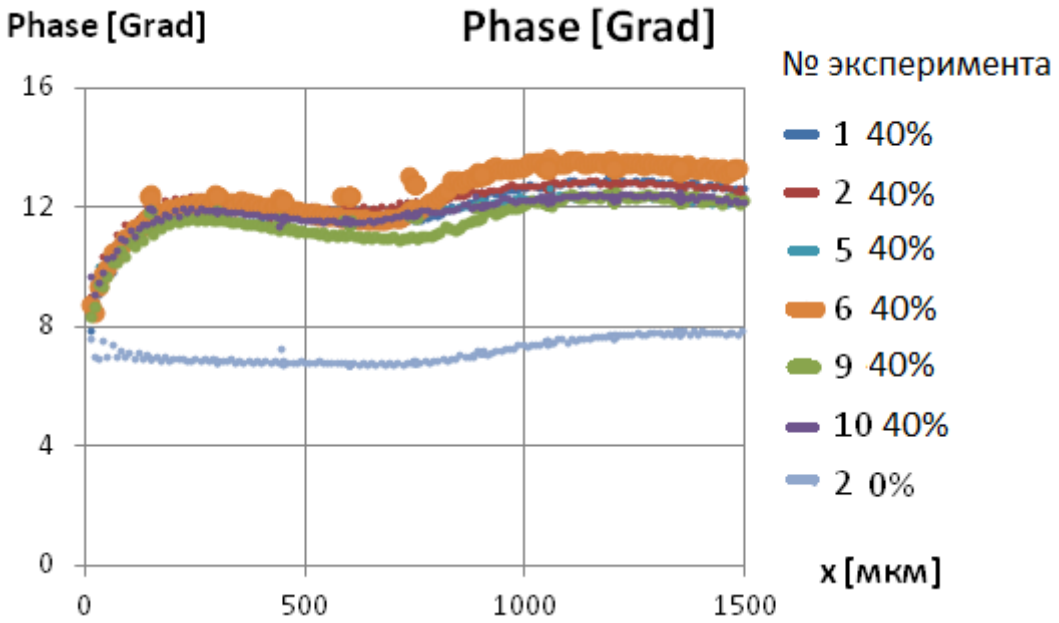


Рис. 1.10 Сдвиг фаз для резины при частоте возбуждающей нагрузки 1 Гц. В легенде указано процентное содержание наполнителя

Точкам на рис. 1.9 и 1.10 соответствует разгружение образца. Особенность прибора заключается в том, что он не может произвести непрерывную разгрузку, поэтому проводилось несколько циклов нагружения с большим шагом, с постепенно уменьшающейся заданной амплитудой перемещений.

Кроме того проводились эксперименты с образцами *полиэтилена*, имеющего различное процентное содержание глинистого нанонаполнителя. Имелось четыре типа образцов: без наполнителя, с 5% наполнителя, с 10% наполнителя и с 15% наполнителя. Были определены: динамический модуль упругости, модуль потерь и сдвиг фаз в зависимости от температуры.

В первой серии опытов каждый образец испытывался при переменной температуре, начиная с -125 заканчивая 155°С. Температура изменялась линейно. Испытания проводились при частотах в 1 Гц, 10 Гц и 100 Гц.

Во второй серии образцы из полиэтилена испытывались при цикличном изменении температуры при частотах 1, 10 и 100 Гц.

Температура по циклам изменялась следующим образом:

1) от 25 до -50 ^{o}С.
2) от -50 до 50 и снова до -50 ^{o}С.
3) от -50 до 50 и снова до -50 ^{o}С.
4) от -50 до 50, а потом опускаться до 25° С.

Изменение температуры достигалось подачей в теплоизолированную камеру жидкого азота. В некоторых экспериментах, несмотря на прекращения подачи азота в камеру, образцы продолжали охлаждаться. По этой причине фактическая температура образцов, в некоторых экспериментах, оказывалась ниже программной (рис. 1.11, 1.12).

Эксперименты, проведенные при частоте 1 Гц, показали следующие значения динамического модуля упругости:

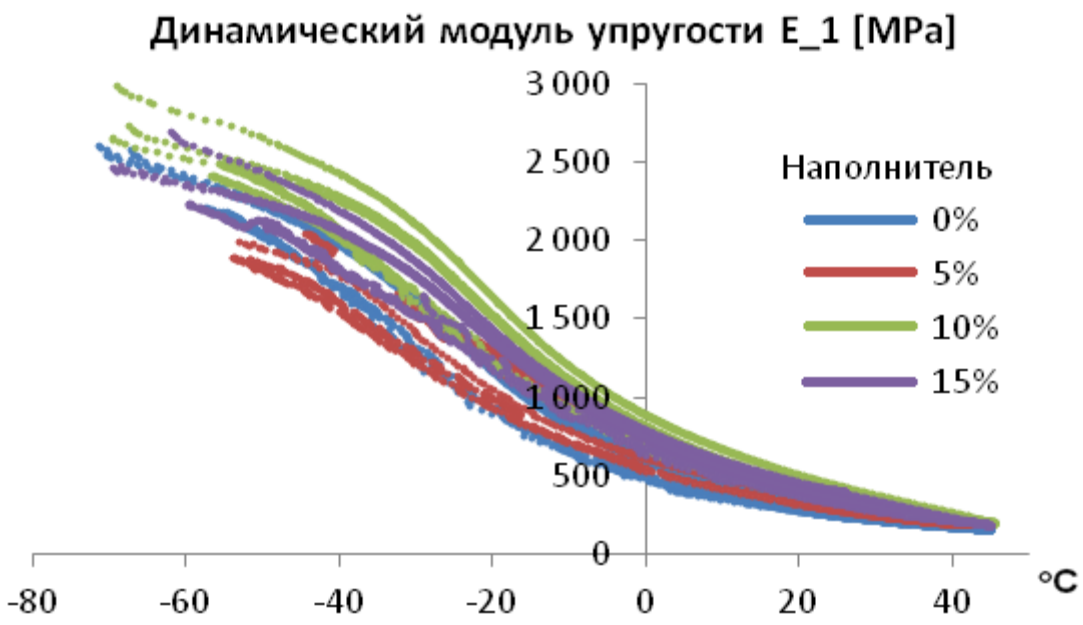


Рис. 1.11 Динамический модуль упругости нанокомпозита на основе полиэтилена при частоте 1 Гц

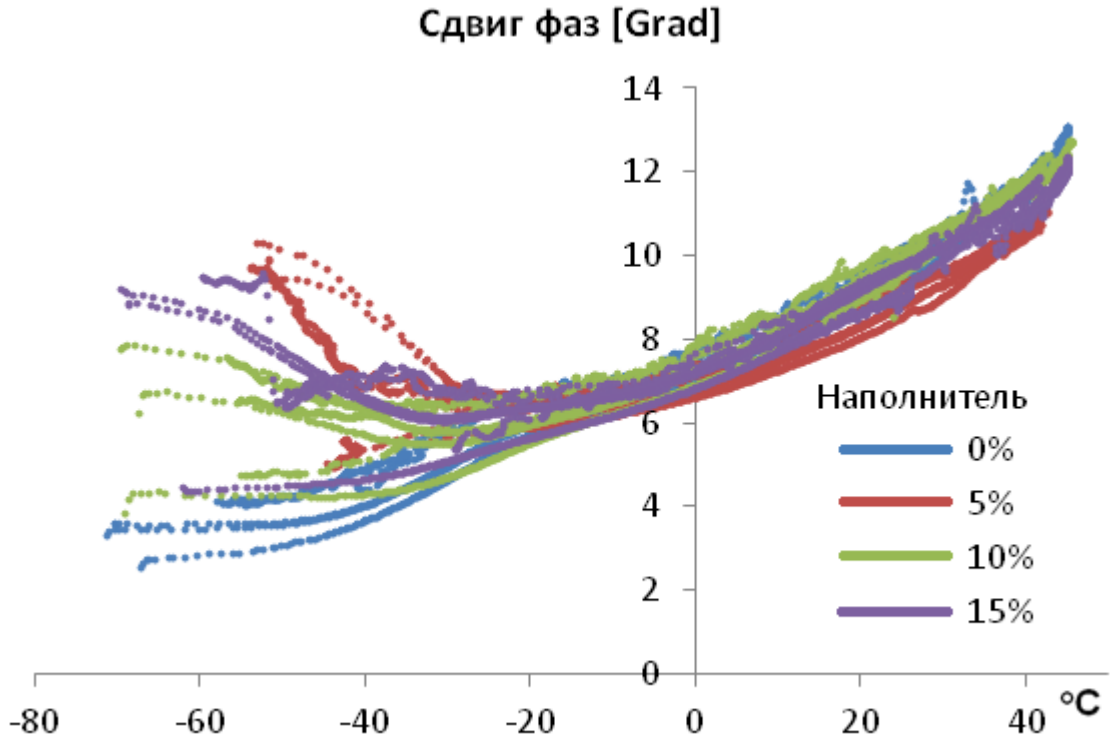


Рис. 1.12 Зависимость сдвига фаз полиэтилена с различным количеством наполнителя от температуры

В итоге было проведено две серии опытов - с резиной и с полиэтиленом. В результате была выявлена нелинейная зависимость вязких характеристик

$(E_1, E_2, E_2/E_1)$ от деформации на примере резины и от температуры на примере полиэтилена.

1.4.2. Связь коэффициента поглощения и комплексного модуля

Цель, преследуемая в данном пункте – выразить коэффициент объемной вязкости, определенный формулой (8), через полученные из опыта величины E_1 и E_2. Для этого необходимо выразить коэффициент поглощения акустических волн через эти величины. Проведем следующие рассуждения.

Для упругого тела имеем уравнение движения и определяющее соотношение:

$$\sigma' = \rho\ddot{u}, \qquad \sigma = E\varepsilon, \qquad \varepsilon = u'$$

Следовательно, справедливо следующее:

$$E\varepsilon'' = \rho\ddot{\varepsilon} \qquad (9)$$

Вязкие свойства учитывают переходом к комплексным величинам:

$$E_* = E_1 + iE_2, \;\; \varepsilon_* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$$

Тогда, по аналогии с выражением для упругого тела, для вязкоупругого тела можно записать:

$$E_*\varepsilon_*'' = \rho_*\ddot{\varepsilon}_*$$

Решение будем искать в виде: $\varepsilon_* = \varepsilon_0 \sin(\omega t) e^{-(\gamma + i\kappa)s}$. Получим *дисперсионное соотношение:*

$$(\gamma + i\kappa)^2 E_* = -\rho_*\omega^2$$

Исключая отсюда волновое число κ, и учитывая, что $E_2 \ll E_1$, получим приближенную формулу.

$$\frac{\gamma}{\omega} \approx \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\rho}{E_1}\frac{E_2}{E_1}} \qquad (10)$$

В линейной модели вязкость вычислялась по формуле

$$\eta_v = -\frac{2\rho c^3}{\omega\left(\frac{\rho c^2}{E} - 1\right)}\left(\frac{\gamma}{\omega}\right) + \frac{\lambda}{c_v}$$

Считая, $c^2 = E_1/\rho$, и принимая во внимание (10), получаем формулу для вязкости:

$$\eta_v = \frac{\lambda}{c_v} - \frac{1}{\omega}\left(\frac{E_2}{E_1}\right)\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_1}\right)^{-1},$$

где E_1, E_2 – переменные величины, определенные в экспериментах, зависящие либо от температуру, либо от деформации; E – постоянная, соответствующая среднему значению E_1; λ, c_v - теплопроводность и теплоемкость, соответственно, которые берутся из справочников; ω - частота, при которой определялись E_1 и E_2.

1.4.3. Аппроксимация дискретных эмпирических зависимостей непрерывными аналитическими функциями

В ходе экспериментов были получены дискретные вязкие характеристики. Через эти характеристики определяется объемный коэффициент вязкости. Для использования этих характеристик в дальнейших исследованиях необходимо аппроксимировать их непрерывными функциями.

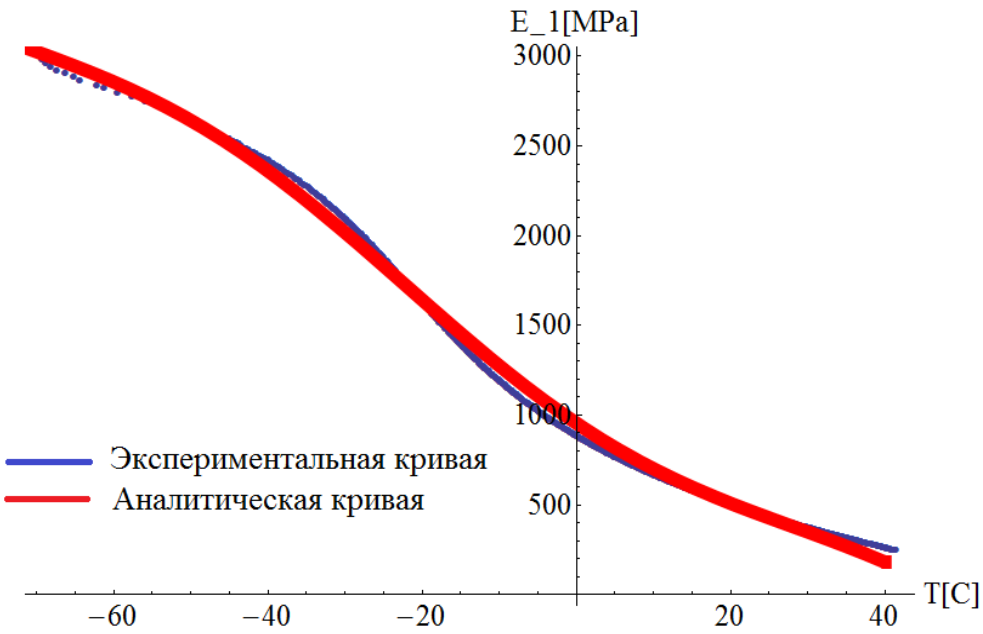


Рис. 1.13 Зависимость динамического модуля упругости от температуры

На рис. 1.13 представлены дискретная и аналитическая зависимости динамического модуля упругости от температуры. Экспериментальная кривая соответствует первой ветки синей кривой (0% наполнителя) изображенной на рис. 1.11. Формула, определяющая аналитическую кривую, следующая:

$$E_1(\tilde{T}_a) = c_1\tilde{T}_a + c_2\sin(\Omega_3\tilde{T}_a - \varphi_3) + c_3$$

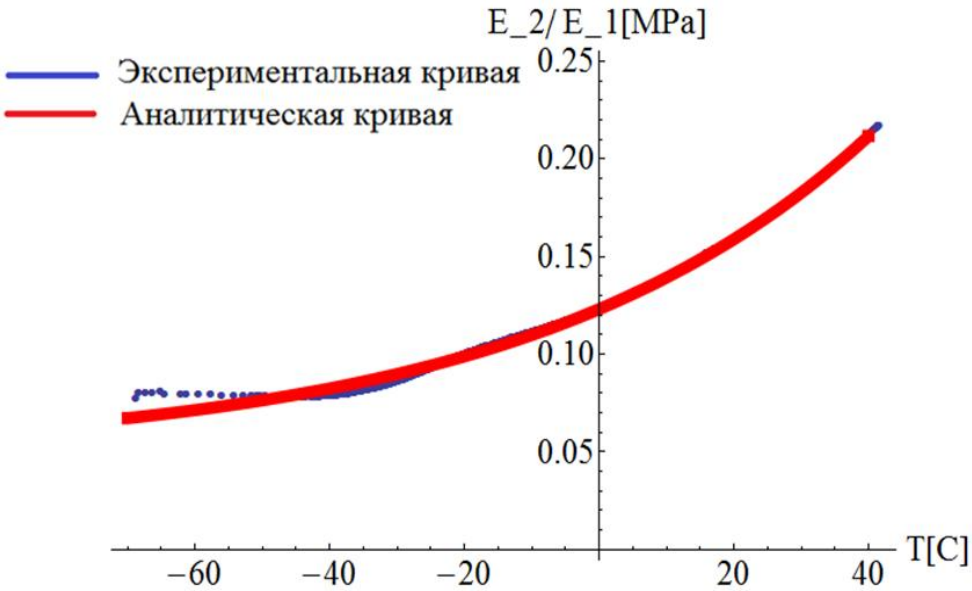


Рис. 1.14 Зависимость отношения модулей E2/E1 от температуры

На рис. 1.14 изображены аналитические и дискретные зависимости отношения модулей E_2/E_1 от температуры. Эмпирическая зависимость на данном графике соответствует первой ветке синей кривой (0% наполнителя), представленной на рис. 1.12. Формула, описывающая аналитическую кривую, приведена ниже.

$$\frac{E_2(\tilde{T}_a)}{E_1(\tilde{T}_a)} = d_1 e^{d_2\tilde{T}_a} + d_3$$

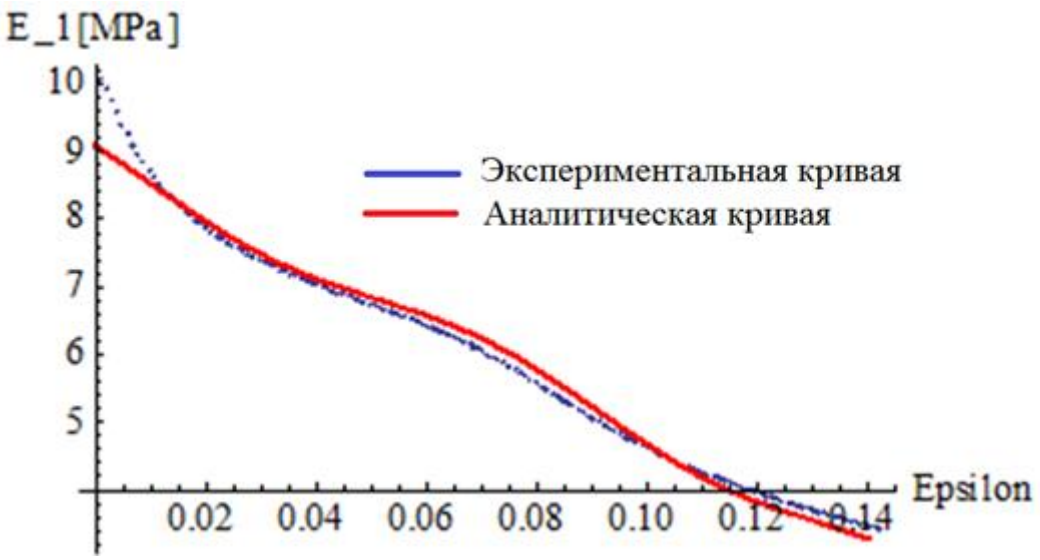


Рис. 1.15 Зависимость динамического модуля упругости от деформации

Кривые, изображенные на рис. 1.15 представляют собой дискретную и аналитическую зависимость динамического модуля упругости от деформации. Экспериментальная зависимость на данном графике соответствует кривой 9 эксперимента для резины с 40% наполнителя, изображенной на рис. 1.9. Аналитическая кривая определена следующим выражением:

$$E_1(\varepsilon) = a_1\varepsilon + a_2 \sin(\Omega_1\varepsilon - \varphi_1) + a_3$$

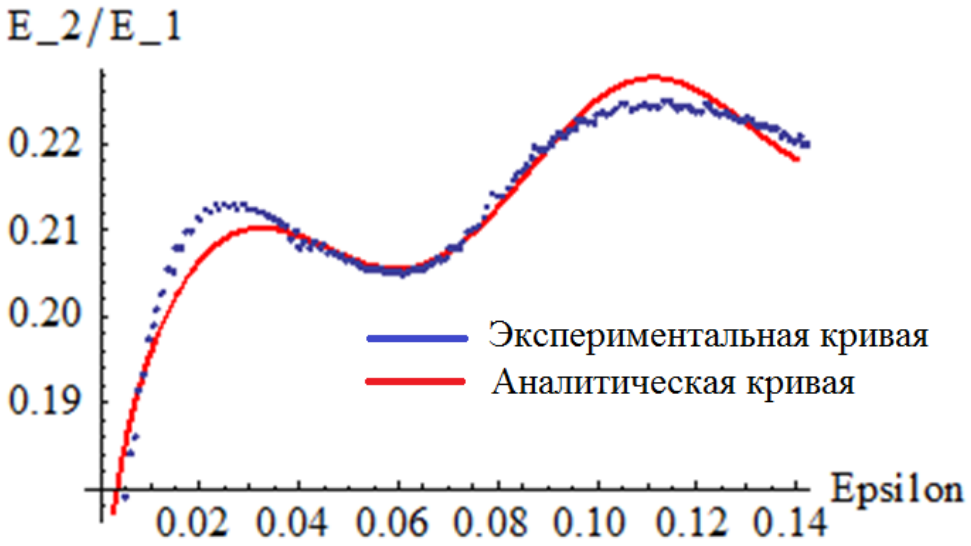


Рис. 1.16 Зависимость отношения модулей E2/E1 от деформации

Характер аналитической и дискретной зависимости отношения модулей E_2/E_1 от деформации приведен на рис. 1.16. Эмпирическая кривая соответствует оранжевой кривой на рис. 1.10 (6 эксперимент). Выражение, приведенное ниже, определяет аналитическую зависимость.

$$\frac{E_2(\varepsilon)}{E_1(\varepsilon)} = b_1 + b_2 \ln(1 + b_3\varepsilon) + b_4 \sin(\Omega_2\varepsilon)$$

В результате получены непрерывные аналитические зависимости динамического модуля упругости E_1 и отношения модулей E_2/E_1 от температуры и деформации. Таким образом, найдена нелинейная зависимость объемного коэффициента вязкости от температуры и деформации.

1.5. Учет нелинейных термовязкоупругих эффектов для полимеров в одномерном случае

В предыдущем пункте была получена нелинейная зависимость коэффициента объемной вязкости от температуры и деформации. Теперь попытаемся распространить сформулированную в пункте 1.3 линейную теорию термовязкопругости на случай нелинейной зависимости коэффициента объемной вязкости и модуля Юнга от деформации и температуры с учетом полученных выше зависимостей.

В одномерном случае уравнение динамики имеет вид:

$$\sigma' = \rho\ddot{u} - \frac{\alpha E_1(\varepsilon, \tilde{T}_a) T_a^*}{\beta(\varepsilon, \tilde{T}_a) c_v \eta_v(\varepsilon, \tilde{T}_a)} \ddot{\theta}_a,$$

Аналог уравнения теплопроводности:

$$\tilde{T}_a' + \frac{\alpha E_1(\varepsilon, \tilde{T}_a) T_a^*}{c_v \eta_v(\varepsilon, \tilde{T}_a)} \left(\dot{u} + \frac{1}{\beta(\varepsilon, \tilde{T}_a)} \ddot{u} \right) - \frac{T_a^*}{\lambda} \left(\dot{\theta}_a + \frac{1}{\beta(\varepsilon, \tilde{T}_a)} \ddot{\theta}_a \right) = 0,$$

Определяющие соотношения:

$$\theta_a' = \frac{\rho c_v}{T} \tilde{T}_a + \alpha \int_0^{\varepsilon} E_1(\varepsilon, \tilde{T}_a)\, d\varepsilon$$

$$\sigma = \int_0^{\varepsilon} E_1(\varepsilon, \tilde{T}_a)\, d\varepsilon - \alpha \int_{T_a^*}^{\tilde{T}_a} E_1(\varepsilon, \tilde{T}_a) d\tilde{T}_a,$$

В случае испытаний с резиной испытания проводились при комнатной температуре, поэтому материал проявлял зависимость только от деформации. Таким образом, динамический модуль упругости, определяющие соотношения, время релаксации теплового потока и коэффициент вязкости, с учетом полученных аналитических зависимостей, имеют следующий вид:

$$E_1(\varepsilon) = a_1 \varepsilon + a_2 \sin(\Omega_1 \varepsilon - \varphi_1) + a_3$$

$$\frac{E_2(\varepsilon)}{E_1(\varepsilon)} = b_1 + b_2 \ln(1 + b_3 \varepsilon) + b_4 \sin(\Omega_2 \varepsilon)$$

Время релаксации теплового потока:

$$\frac{1}{\beta(\varepsilon)} = \frac{\lambda}{c_v(a_1\varepsilon + a_2\sin(\Omega_1\varepsilon - \varphi_1) + a_3)}$$

Коэффициент объемной вязкости:

$$\eta_v(\varepsilon) = \frac{\lambda}{c_v} - \frac{b_1 + b_2\ln(1 + b_3\varepsilon) + b_4\sin(\Omega_2\varepsilon)}{\omega\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{(a_1\varepsilon + a_2\sin(\Omega_1\varepsilon - \varphi_1) + a_3)}\right)}$$

Определяющие соотношения:

$$\theta_a' = \frac{\rho c_v}{T}\tilde{T}_a + \alpha\int_0^{\varepsilon} E_1(\varepsilon)\,d\varepsilon$$

$$\sigma = \int_0^{\varepsilon} E_1(\varepsilon)\,d\varepsilon - \alpha E_1(\varepsilon)\tilde{T}_a,$$

В экспериментах с полиэтиленом была исследована зависимость вязких характеристик только от температуры, потому, принимая предположение, что данные характеристики от деформации не зависят, а зависят только от температуры, можно сформулировать следующее:

$$\frac{1}{\beta(\tilde{T}_a)} = \frac{\lambda}{c_v(c_1\tilde{T}_a + c_2\sin\left(\Omega_3\tilde{T}_a - \varphi_3\right) + c_3)}$$

$$\eta_v(\tilde{T}_a) = \frac{\lambda}{c_v} - \frac{1}{\omega}\left(d_1 e^{d_2\tilde{T}_a} + d_3\right)\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{c_1\tilde{T}_a + c_2\sin\left(\Omega_3\tilde{T}_a - \varphi_3\right) + c_3}\right)^{-1}$$

$$\theta_a' = \frac{\rho c_v}{T}\tilde{T}_a + \alpha E_1(\tilde{T}_a)\varepsilon$$

$$\sigma = E_1(\tilde{T}_a)\varepsilon - \alpha\int_{T_a^*}^{\tilde{T}_a} E_1\left(\tilde{T}_a\right)d\tilde{T}_a,$$

$$E_1\left(\tilde{T}_a\right) = c_1\tilde{T}_a + c_2\sin\left(\Omega_3\tilde{T}_a - \varphi_3\right) + c_3$$

$$\frac{E_2(\tilde{T}_a)}{E_1(\tilde{T}_a)} = d_1 e^{d_2\tilde{T}_a} + d_3$$

1.6. Численное решение линейной задачи термоупругости

Численное решение нелинейной системы в том виде, в котором она приведена в предыдущем пункте в силу ее сложности весьма трудоемко. По этой причине для начала создадим численный алгоритм решения линейной задачи термоупругости для случая объемных колебаний без учета вязкости. Это делается для того, чтобы проверить правильность решения, которое дает численный алгоритм и отладить написанную программу путем сравнения с существующим аналитическим решением. Протестировав алгоритм на данной задаче, можно будет приступать с его помощью к нахождению численного решения полученных в предыдущем пункте нелинейных уравнений.

Убрав слагаемые с вязкостью в уравнениях пункте, и проведя несложные преобразования, можно получить следующее:

$$E\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial x^2} - \alpha E\frac{\partial^2\tilde{T}_a}{\partial x^2} = \rho\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial\tau^2}$$

$$\frac{\partial^2\tilde{T}_a}{\partial x^2} = \frac{\rho c_v}{\lambda}\frac{\partial\tilde{T}_a}{\partial\tau} + \frac{\rho}{E}\frac{\partial^2\tilde{T}_a}{\partial\tau^2} + \frac{T_a^*\alpha E}{\lambda}\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau} + \frac{T_a^*\alpha}{c_v}\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial\tau^2}$$

Здесь вместо штриха производная по пространственной координате обозначается $\frac{\partial}{\partial x}$, а по времени вместо точки $\frac{\partial}{\partial\tau}$.

Эти уравнения представляют собой уравнения связанной задачи термоупругости гиперболического типа. Отличие их от классических состоит в наличие вторых производных по времени от температуры, которые обуславливают гиперболичность системы. В классическом случае теплопроводность является параболической. В несвязанной задаче термоупругости гиперболического типа механический процесс описывается волновым уравнение, а теплопроводность - транспортным уравнением.

Аналог этой системы для объемных колебаний трехмерного тела имеет вид:

$$(K_{iz} + \frac{4}{3}G)\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial x^2} - \alpha K_{iz}\frac{\partial^2\tilde{T}_a}{\partial x^2} = \rho\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial\tau^2}$$

$$\frac{\partial^2\tilde{T}_a}{\partial x^2} = \frac{\rho c_v}{\lambda}\left(\frac{\partial\tilde{T}_a}{\partial\tau} + \frac{1}{\beta}\frac{\partial^2\tilde{T}_a}{\partial\tau^2}\right) + \frac{T_a^*\alpha K_{iz}}{\lambda}\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\tau} + \frac{1}{\beta}\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial\tau^2}\right)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\lambda}{c_v\left(K_{ad} + \frac{4}{3}G\right)}$$

Будем решать именно последние уравнения, потому что для них существует известное нам аналитическое решение, с которым можно будет сравнить полученное численное решение.

Для численного решения данных уравнений их необходимо обезразмерить. После проведения этой процедуры уравнения принимают вид:

$$\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial s^2} - b\frac{\partial^2\zeta}{\partial s^2} = \frac{\partial^2\varepsilon}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2\zeta}{\partial s^2} = \frac{\partial\zeta}{\partial t} + d\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2} + a\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + d\,\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial t^2}\right)$$

где ζ, s, t, ω - безразмерные температура, координата, время и частота соответственно. Они связаны с разменными величинами следующим образом:

$$\zeta = \alpha\tilde{T}_a$$

$$s = \frac{c_v}{\lambda}\sqrt{\rho\left(K_{iz} + \frac{4}{3}G\right)}\,x,$$

$$t = \frac{c_v}{\lambda}\left(K_{iz} + \frac{4}{3}G\right)\tau$$

$$\omega = \frac{\Omega\lambda}{c_v\left(K_{iz} + \frac{4}{3}G\right)}$$

Безразмерные коэффициенты:

$$b = \frac{1}{1 + \frac{4}{3}\frac{G}{K_{iz}}}, \quad a = \frac{c_p - c_v}{c_v}, \quad d = \frac{K_{iz} + \frac{4}{3}G}{K_{ad} + \frac{4}{3}G}$$

Здесь K_{ad} - адиабатический модуль объемного сжатия. $K_{ad} = \frac{c_p K_{iz}}{c_v}$. Следовательно, в случае теплопроводности гиперболического типа $d < 1$, при этом $d \sim 1$. В случае классической теплопроводности $d = 0$.

Рассматривается задача о распространении волн (рис. 1.16) в полупространстве вдоль оси s. На границе полупространства задано гармоническое возмущение $\varepsilon(0,t) = A \sin \omega t$.

Рис. 1.17 Распространение волн в полупространстве

Численное решение данной задачи находилось для случая полосы (рис. 17) шириной L, причем рассматривались промежутки времени, когда волна не успевала доходить до границы L.

Рис. 1.18 Распространение волн в полосе

Для решения использовался *метод конечных разностей*.

$$f'' = \frac{f_{i+1}^k - 2f_i^k + f_{i-1}^k}{h^2}$$

$$f' = \frac{f_{i+1}^k - f_{i-1}^k}{2h}$$

$$\dot{f} = \frac{f_i^{k+1} - f_i^{k-1}}{2\tau}$$

$$\ddot{f} = \frac{f_i^{k+1} - 2f_i^k + f_i^{k-1}}{\tau^2}$$

Граничные условия:

$$\varepsilon(L,t) = 0, \qquad \zeta(L,t) = 0$$

$$\varepsilon(0,t) = A\sin\omega t\,, \qquad \zeta(0,t) = 0$$

Начальные условия:

$$\varepsilon(s,0) = 0, \qquad \zeta(s,0) = 0, \qquad \dot{\varepsilon}(s,0) = 0, \qquad \dot{\zeta}(s,0) = 0$$

Шаг по пространству h выбирался вручную, а по времени Δt из *условия Куранта:*

$$\Delta t = \frac{h}{c},$$

где c – скорость звука, вычислялась по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Численный алгоритм был реализован в программной среде Delphi. В результате было построено решения для следующего набора безразмерных параметров:

1) $b = 1;\ a = 0{,}1;\ \ d = 0$; параболическая теплопроводность
2) $b = 1;\ \ a = 0{,}1;\ \ d = 0{,}9$; гиперболическая теплопроводность
3) $b = 0{,}85; a = 0{,}01; d = 0$; параболическая теплопроводность
4) $b = 0{,}85; a = 0{,}01; d = 1$; гиперболическая теплопроводность

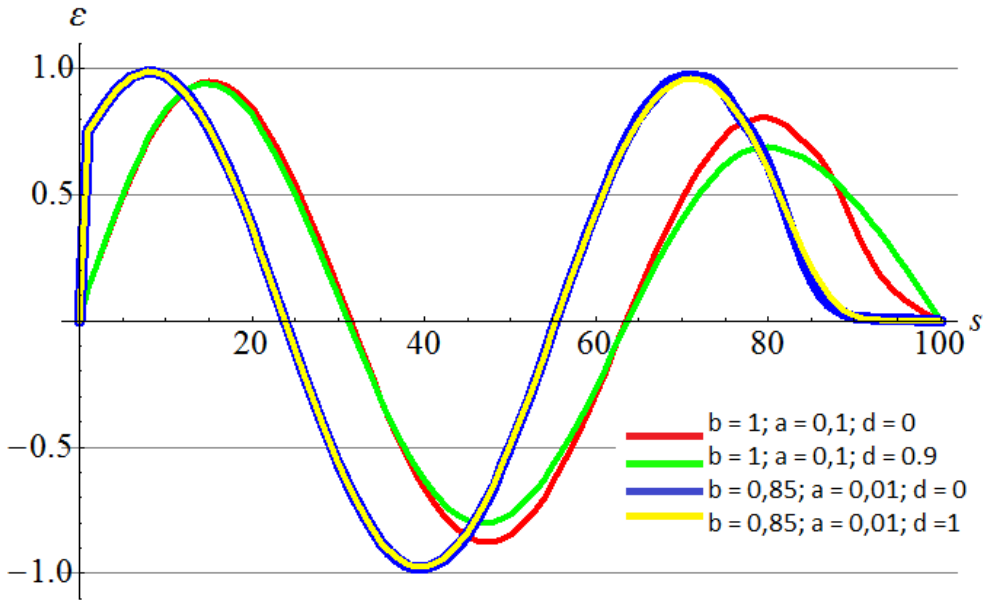


Рис. 1.19 Результат численного решения линейной задачи: зависимость деформации от координаты

Из графика видно, что амплитуда колебаний зеленой и красной кривой затухает в процессе распространения, в отличие от синей и желтой. Это происходит по причине того, что коэффициент a, стоящий при первой производной и отвечающий за диссипацию, для красной и зеленой кривой на порядок выше, чем для желтой и синей.

Кроме того, рис. 1.19 демонстрирует различие параболической и гиперболической теплопроводности. Первой соответствуют красная и синяя (коэффициент d, стоящий при второй производной, равен нулю) синусоида, а второй – зеленая и желтая (коэффициент d отличен от нуля). Легко видеть, что при увеличении безразмерного коэффициента a, отвечающего за диссипацию, различие между данными типами теплопроводности увеличиваются.

1.7. Выводы по учету нелинейных свойств при описании динамических процессов в полимерах

Главным результатом данного исследования является предложение и реализация метода учета нелинейных динамических свойств полимеров. В частности, учет нелинейных зависимостей коэффициента вязкости от температуры и деформаций в нанокомпозитах полиэтилена и резины.

Предложенный метод заключается в использовании экспериментально полученных динамических свойств для распространения линейной теории термовязкоупругости на более общий случай нелинейных зависимостей вязких характеристик в полимерах.

Выражен модуль объемной вязкости через нелинейные экспериментальные данные. На основании дискретных эмпирических данных получены непрерывные аналитические зависимости, с помощью которых сформулированы основные нелинейные уравнения термовязкоупругости для полимеров. Получено численное решение линейной задачи термоупругости и проведено сравнение гиперболической и параболической термоупругости.

Список литературы

1. Дж. Ферри. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Иноиздат, 1963. 535 с.
2. И.И. Перепечко. Введение в физику полимеров. М.: Химия, 1978. 312 с.
3. Р.Кристенсен. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 338 с.
4. Г.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. Структура и механические свойства полимеров. М.: Высшая школа, 1972. 320 с.
5. К. Трусделл. Первоначальный курс рациональной механики сплошной среды. М.: Мир, 1975. 592 с.
6. И.Пригожин. Введение в термодинамику необратимых процессов. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 160 с.
7. Е.А. Иванова. Об одном подходе к формулировке связанной задачи термоупругости, включающей уравнение теплопроводности гиперболического типа // Пятые Поляховские чтения. Избранные труды. СПб. Изд. ВВМ. 2009. С. 301-306.
8. E.A. Ivanova. Derivation of theory of thermoviscoelasticity by means of two-component medium // Acta Mechanica: V. 215, Issue 1 (2010), P.261-286.
9. E.A. Ivanova. On one model of generalized continuum and its thermodynamical interpretation // Mechanics of generalized Continua (Ed. H. Altenbach, G.A. Maugin, V. Erofeev). Berlin: Springer, 2011. pp. 151-174.

Часть II. Исследование поведения частиц в потоке

2.1. Цели и методы исследования

Рассмотрим случай полета частицы или агломерата частиц в потоке и последующее столкновение его с жесткой преградой. Необходимо исследовать: 1) вероятность разрушения, 2) распределение фрагментов частиц по размерам в зависимости от кинетической энергии удара, 3) области энергии разрушения, 4) зависимость скорости воздуха от координаты в экспериментальной установке, 5) скорости частиц в зависимости от пути, 6) зависимость скорости частиц от скорости воздуха.

Выше перечисленные цели будут достигаться с помощью экспериментов и численного моделирования.

2.2. Описание экспериментальной установки

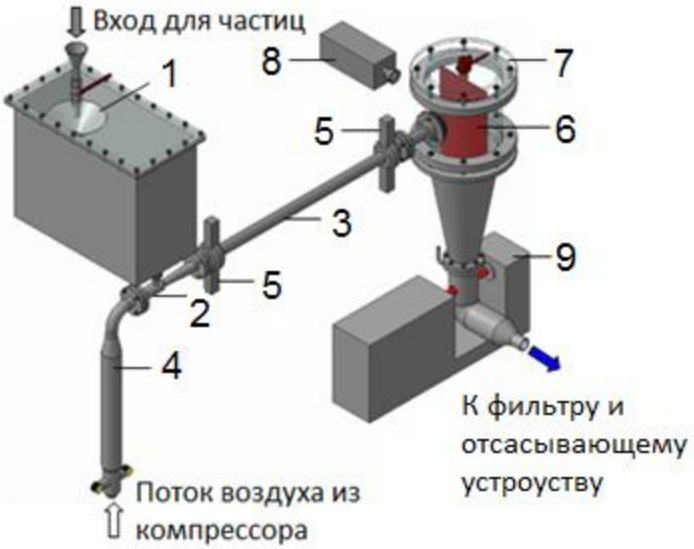


Рис. 2.1 Экспериментальная установка «Пневматиеская пушка» Технического Университета Гамбурга-Харбурга (TUHH)

В качестве экспериментального прибора, а также основы для построения модели для численного моделирования использовалась пневматическая пушка (рис. 2.1). Перед началом испытаний частицы засыпаются в вибрационный питатель (1), который находится в камере, которая закрывается с помощью клапана, чтобы не нарушить герметичность аппарата. Затем включается отсасывающее устройство и компрессор. Расход воздуха может быть измерен с помощью ротаметра (4). Частицы при помощи вибрации, интенсивность которой можно изменять, попадают из подающего механизма (1) в воздушный поток в инжекторе Вентури (2) и разгоняются. Их скорость можно получить с помощью двух лазерных детекторов (5), измеряя время прохождения расстояния между детекторами. Затем частицы сталкиваются в камере удара (7) со стальной стенкой (6), после чего целые частицы и фрагменты попадают в фильтр. Процесс удара может быть рассмотрен детально с помощью высокоскоростной камеры IDT Motion Pro Y4 Speed 2 с максимальной частотой 100000 кадров/с (8). Распределение размеров фрагментов частиц можно измерить с помощью лазер-спектрометра (Система Helos типа KF компании Sympatec) (9) перед их попаданием в фильтр.

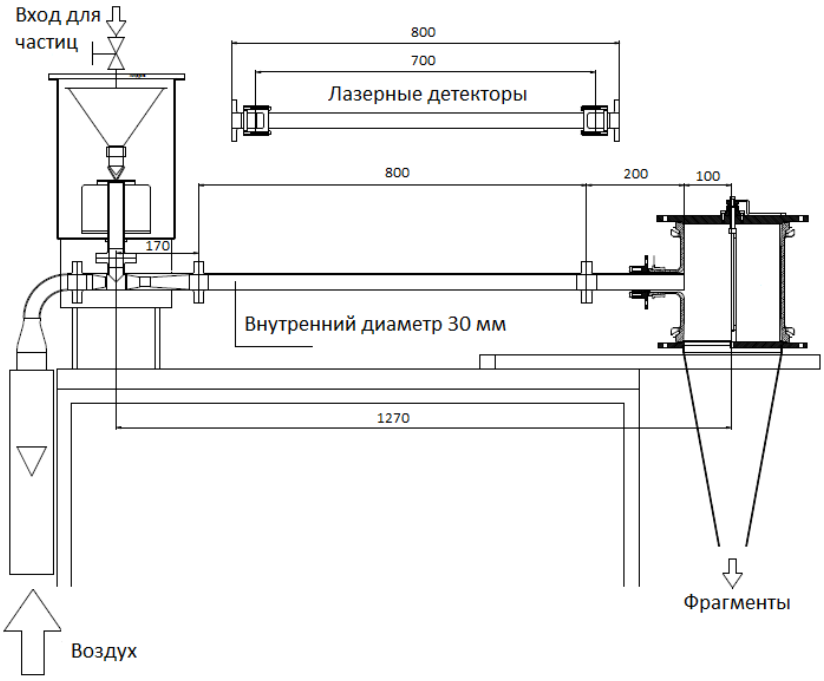


Рис. 2.2 Продольный разрез пневматической пушки Технического Университета Гамбурга-Харбурга (TUHH)

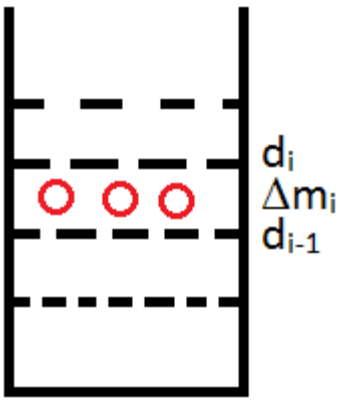
На рис. 2.2 приведены основные размеры экспериментального аппарата.

2.3. Исследование разрушения частиц

Данное исследование являлось экспериментальным, проводилось с использованием двух типов образцов: 1) зерна кофе, 2) измельченное кофе; и состояло из нескольких этапов:

- Подготовка пробы
- Испытание на удар с жесткой стенкой зерен и измельченного кофе с помощью пневматической пушки при различных скоростях воздуха
- Проведение ситового анализа фрагментов зерен и измельченного кофе после испытаний на удар для определения функции распределения и плотности распределения массы в зависимости от размеров частиц
- Определение функции распределения частиц в зависимости от размеров частиц измельченного кофе после соударения его с жесткой стенкой в пневматической пушке с помощью лазер-спектрометра
- Определение скоростей частиц, движущихся в воздушном потоке в пневматической пушке при различных скоростях воздуха с помощью лазерных детекторов и высокоскоростной камеры
- Нахождение вероятности разрушения в зависимости от кинетической энергии удара

2.3.1. Описание эксперимента



Подготовка пробы. Первоначальная проба зерен и измельченного кофе подвергалась *ситовому анализу*, т.е. проба просеивалась с помощью набора сит с различным размером ячеек ($d_1 \dots d_n$, n - количество сит). После этого на каждом из сит оставалась определенная часть массы первоначальной пробы. Каждое сито с частицами взвешивалось, и, зная массу каждого

сита, определялась масса частиц на каждом из сит. Затем определялась фракция (Δm_i), масса которой была больше всех остальных. Именно эта фракция считалась представительной и затем использовалась в экспериментах.

Рис. 2.3 Образцы кофе после отбора самой массовой фракции

Делается предположение, что самым малым и большим размером частиц во фракции являются размеры ячеек малого и большого сита соответственно, между которыми эта фракция располагается. Таким образом, представительная фракция зерен кофе (рис. 2.3 левое изображение) лежала между ситами с размерами 6,8 и 8 мм, а представительная фракция измельченного кофе (рис. 2.3 правое изображение) находилась между ситами 1 и 1,25 мм.

Испытание на удар с жесткой стенкой зерен и измельченного кофе с помощью пневматической пушки при различных скоростях воздуха. На данном этапе испытывались зерна кофе и измельченное кофе. Размеры зерен кофе до эксперимента лежали в интервале от 6,8 до 8 мм, а измельченного кофе между 1 и 1,25 мм. Опыты с зернами проводились при пяти скоростях входящего воздушного потока: 15, 20, 25, 30 и 35 м/с. Эксперименты с измельченным кофе проводились при скорости воздуха 5, 6, 15, 20, 25, 30 и 35 м/с.

Проведение ситового анализа фрагментов зерен и измельченного кофе после испытаний на удар для определения функции распределения и плотности распределения в зависимости от размеров частиц. После

испытаний частицы оседали в фильтре, откуда они вынимались, а затем взвешивались. Масса частиц после эксперимента сравнивалась с их массой до эксперимента. Этим самым контролировался баланс масс. После этого с пробой проводился *ситовый анализ.* Так определялось распределение массы частиц после испытаний в зависимости от их размера.

Если известно распределение массы частиц по классам размеров частиц:

$$m_i = f(d_i), \qquad i = \overline{1, n}$$

где n - количество классов, d_i - размер класса, m_i - масса частиц в данном классе; то можно определить функцию распределения и плотность распределения частиц по классам размеров частиц.

Функция распределения частиц Q_3^* определяется как отношение суммы масс частиц по всем классам, размер которых меньше текущего, к общей массе частиц.

$$Q_{3,i}^* = \frac{\sum_{j=1}^{i} \Delta m_j}{m_{\text{общ}}}$$

Таким образом, представленная функция распределения в фиксированной точке показывает, сколько частиц в выборке имеют размер меньше данного.

Функция плотности распределения q_3 может быть вычислена как отношение массы частиц в данном классе Δm_i к общей массе частиц и к разнице размеров следующего и данного класса $\Delta d_i = d_i - d_{i-1}$.

$$q_3 = \frac{\Delta m_i}{m_{\text{общ}} \cdot \Delta d_i}$$

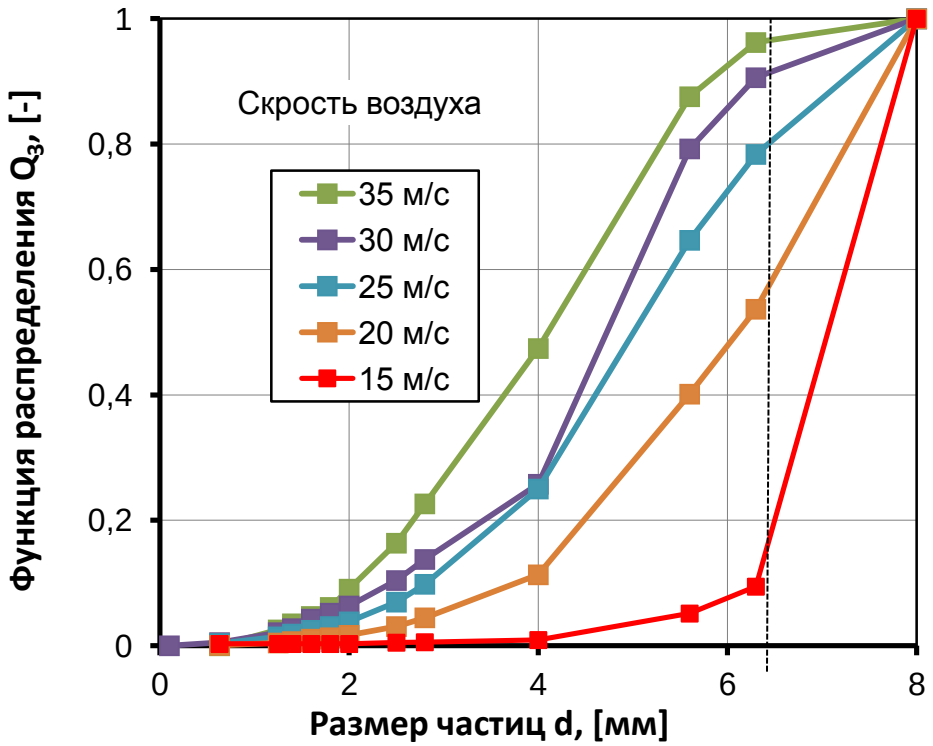


Рис. 2.4 Функция распределения в зависимости от диаметра частиц для зерен кофе (пунктирной линией отмечен d_{min})

В результате испытаний зерен кофе при различных скоростях воздушного потока были получены функции распределения, представленные на рис. 2.4.

Из данного графика видно, что при скорости воздуха 15 м/с около 90% зерен остались целыми, а при 35 м/с было разрушено 95% частиц. Зависимости функции плотности распределения от размера частиц также были определены (рис. 2.5).

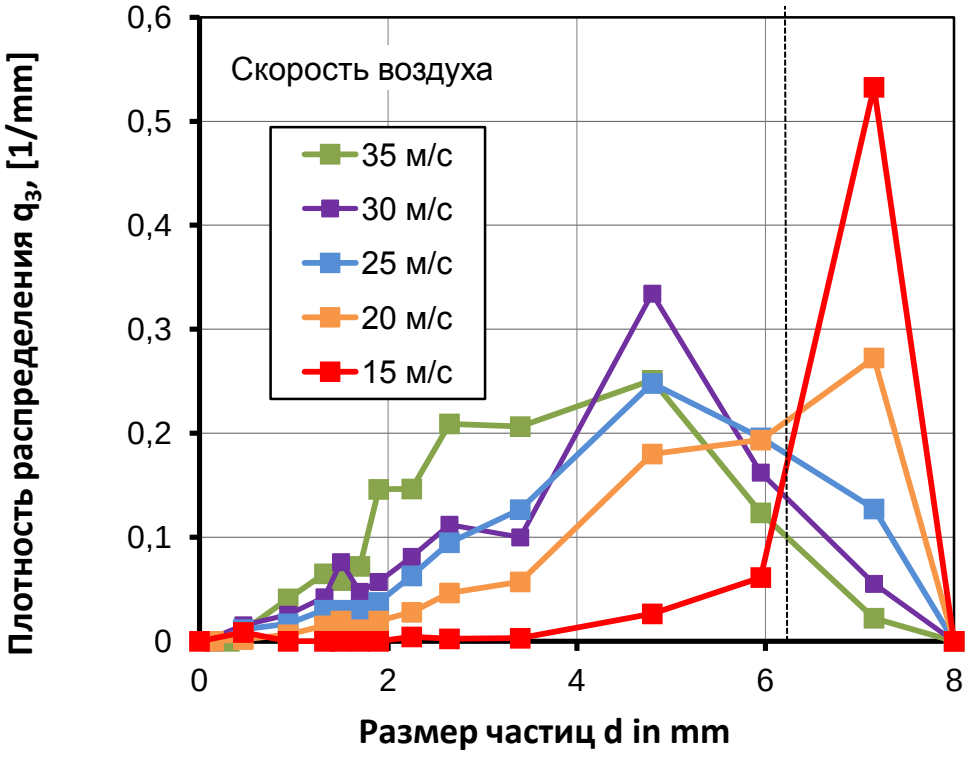


Рис. 2.5 Функция плотности распределения для зерен кофе

Определение функции распределения частиц зависимости от размеров частиц измельченного кофе после соударения его с жесткой стенкой в пневматической пушке с помощью лазер-спектрометра. Также была определена функция распределения в зависимости от размеров фрагментов частиц для измельченного кофе. Данная функция получалась в ходе экспериментов с пневматической пушкой при различных скоростях воздушного потока: 5, 6, 15, 20, 25, 30 и 35 м/с. Частицы запускались в воздушный поток в инжектор Вентури посредством вибрационного питателя, разгонялись, соударялись со стенкой, после этого фрагменты частиц проходили через луч лазерного спектрометра. Специализированное программное обеспечение производило автоматическую обработку данных, получаемых с лазерного спектрометра, и выводило данные о функции распределения (рис. 2.6).

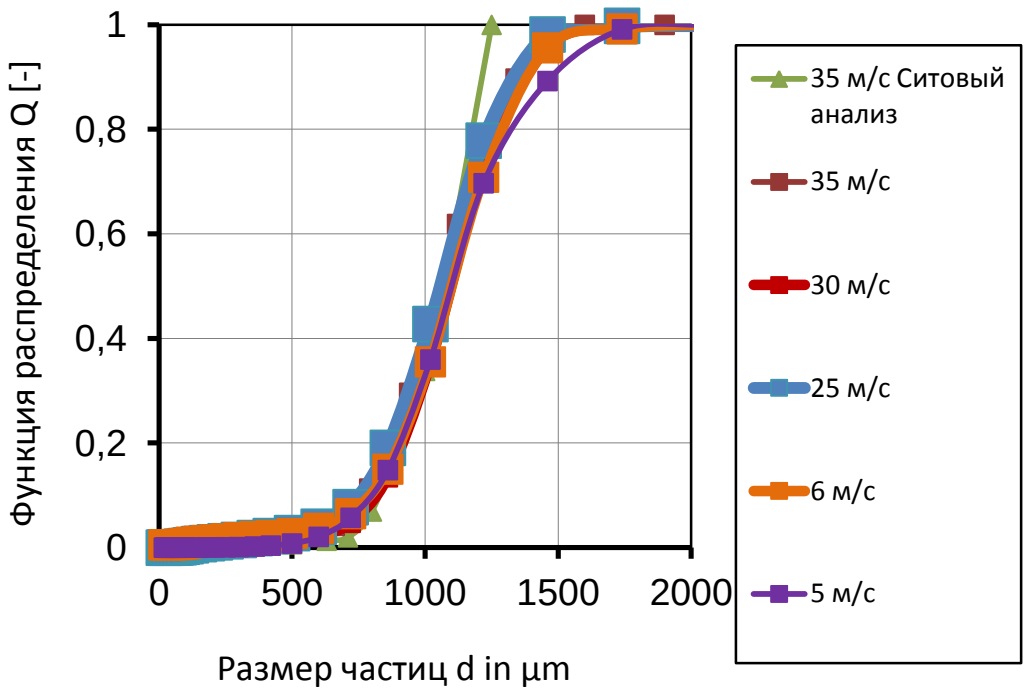


Рис. 2.6 Функция распределения в зависимости от диаметра частиц для измельченного кофе

На рис. 2.6 приведены не все полученные функции распределения, потому что они практически не отличаются друг от друга, что также видно из этого графика. Потому можно сделать вывод, что частицы измельченного кофе разрушаются одинаково при различных скоростях воздушного потока, и практически не проявляя зависимость от его скорости.

Определение скоростей частиц, движущихся в воздушном потоке в пневматической пушке при различных скоростях воздуха с помощью лазерных детекторов и высокоскоростной камеры. Для нахождения зависимости вероятности разрушения от кинетической энергии удара частиц необходимо знать их скорости. В эксперименте они определялись двумя способами: 1) с помощью лазерных фотодетекторов, размещенных на ускорительной трубе пневматической пушки и 2) путем обработки графической информации, полученной с помощью съемки полета частиц в камере удара (рис. 2.7) на высокоскоростную камеру DT Motion Pro Y4 Speed 2.

Рис. 2.7 Момент удара зерна кофе, снятый с помощью высокоскоростной камеры

Таким образом, были получены следующие зависимости скоростей зерен кофе от скорости воздуха:

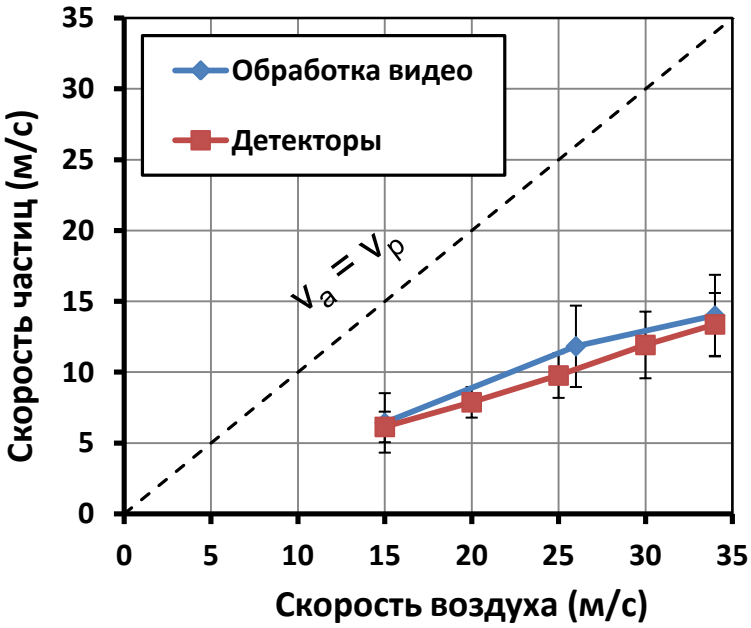


Рис. 2.8 Зависимость скорости зерен кофе от скорости воздушного потока

Также были проведены эксперименты, в ходе которых производилась съемка высокоскоростной камерой частиц измельченного кофе с целью определения их скоростей. Съемка проводилась при двух скоростях воздуха: 15 и 19 м/с. На рис. 2.9 представлены усредненные значения скоростей частиц измельченного кофе при заданной скорости воздуха, а также, для сравнения, изображен график зависимости скоростей зерен кофе от скорости воздуха.

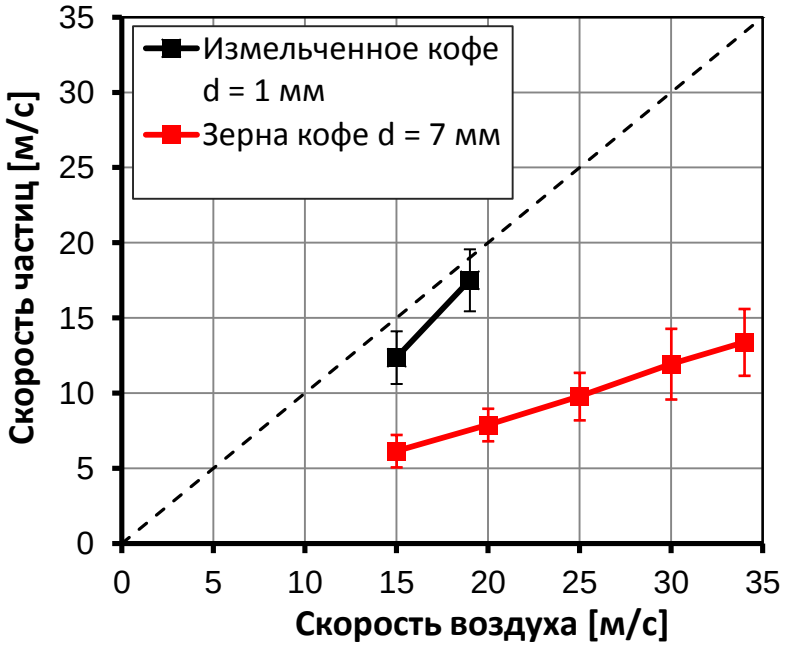


Рис. 2.9 Зависимость скорости частиц измельченного кофе от скорости воздуха

Нахождение вероятности разрушения в зависимости от кинетической энергии удара. Найдя функцию распределения и зависимость скоростей частиц от скорости воздушного потока можно определить вероятность разрушения в зависимости от кинетической энергии удара.

Вероятность разрушения считается как отношение количества разрушенных частиц к общему числу частиц. Это эквивалентно отношению массы разрушенных частиц к общей массе частиц, т.к. принимается, что плотность частиц не зависит от их размера.

$$P(E_{kin}, d_{\text{ч}}) = \frac{N_{\text{разр}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{m_{\text{разр}}}{m_{\text{общ}}}$$

, где E_{kin} - кинетическая энергия частицы, $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы

Частица считалась разрушенной, если ее размер после эксперимента становился меньше d_{min} – наименьшего размера частиц до испытания.

Кроме того, зная функцию распределения, вероятность разрушения можно определить следующим образом:

$$P = Q_3(d_{min}, V = 0),$$

Т.е. вероятность разрушения равна значению функции распределения в той точке, которая соответствует минимальному размеру частиц до испытаний (при скорости частиц $V = 0$, рис. 2.10).

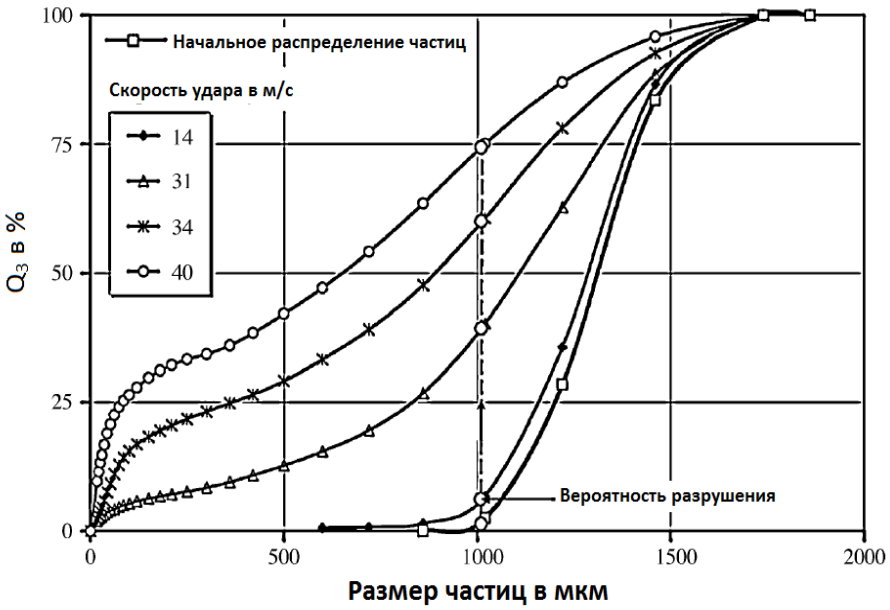


Рис. 2.10 Функция распределения и вероятность разрушения

Допустим, что размеры частиц после испытаний распределены по n классам. Класс с номером n является тем классом, все размеры частиц в котором больше d_{min}, т.е. является, по сути, классом не разрушенных частиц. Тогда вероятность разрушения можно получить, просуммировав функцию распределения $Q^*_{3,i}$ по $n-1$ классу.

$$P = Q^*_{3,n-1} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \Delta m_j}{m_{\text{общ}}}$$

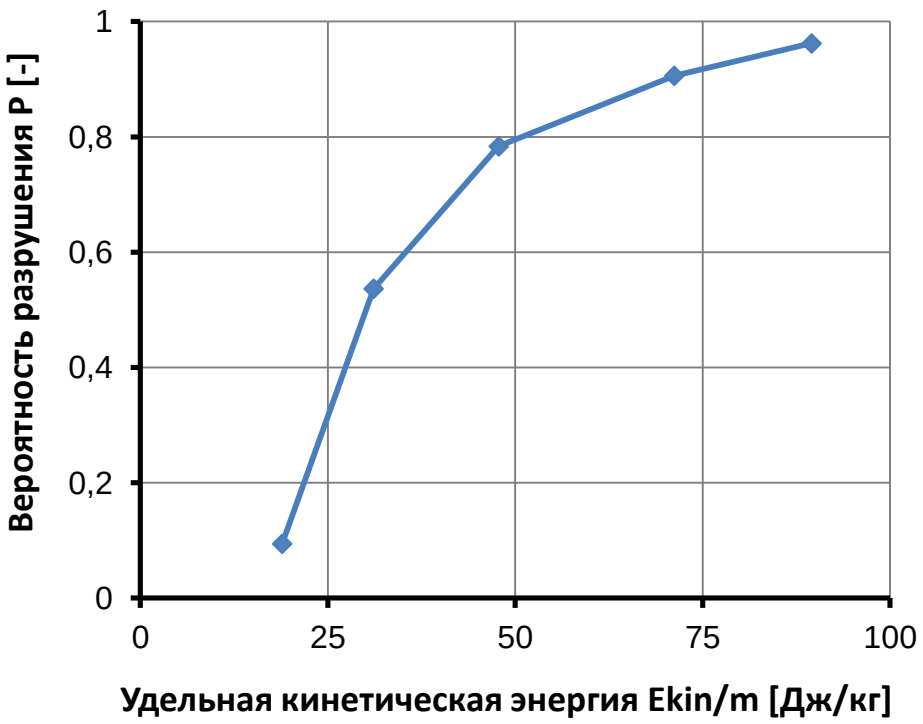


Рис. 2.11 Вероятность разрушения зерен кофе

В результате анализа функции распределения при скоростях зерен кофе, близких к 13, 11, 9, 7 и 6 м/с, была получена зависимость вероятности разрушения от удельной кинетической энергии частиц. Эта зависимость представлена на рис. 2.11.

2.4. Исследование газодинамики двухфазного потока пневматической пушки

Данное исследование заключается в изучении движения твердых частиц в воздушном потоке пневматической пушки. Провести такое исследование можно несколькими способами. Мы это сделали двумя из них.

Первый способ. Использование силы аэродинамического сопротивления в методе дискретных элементов. Сила сопротивления стремится уравновесить скорость потока и частицы, находящейся в этом потоке, тем самым увлекая изначально покоившуюся частицу за собой.

Сила сопротивления зависит от скорости потока в точке, в которой находится частица, коэффициента затухания, плотности потока и от размеров частицы. Для определения скоростей потока в пневматической пушке необходимо построить компьютерную модель экспериментальной установки, разбить ее на сетку, решить газодинамическую задачу пневматической пушки с использованием полученного разбиения на сетку, построить аналитическую зависимость скорости потока от координаты, определить коэффициент сопротивления и тогда можно приступать к непосредственному построению силы сопротивления.

Определив эту силу, ее можно добавить к сумме сил, действующих на частицу и решить задачу о движении твердых частиц в пневматической пушке методом дискретных элементов, т.е. определить траектории движения частиц и зависимости их скоростей от координаты.

Преимущество данного подхода состоит в том, что можно изолированно друг от друга решать газодинамическую задачу и задачу о движении частиц методом дискретных элементов, поэтому решение каждой отельной задачи происходит намного быстрее, чем решение сопряженной

Второй способ. Решение сопряженной задачи метода вычислительной гидродинамики и метода дискретных элементов. В решении этой задачи на каждом временном шаге метод вычислительной гидродинамики посылает данные о распределении скоростей воздуха в расчетной области, а метод дискретных элементов данные о пористости сетки, т.е. об отношении количества твердой фазы в данной ячейке сетки, к количеству воздушной.

Преимуществом же данного способа заключается в том, что в это случае нет необходимости отдельно строить какие-либо силы. Однако сильно возрастает время расчета, т.к. много времени тратится на коммуникации между методами.

Таким образом, основными целями данного исследования являются:

1) Построение компьютерной модели пневматической пушки
2) Создание сетки на основе этой модели
3) Расчет газодинамики однофазного потока
4) Определение зависимости скорости воздуха от координаты в пневматической пушке
5) Определение силы аэродинамического сопротивления, действующей на твердые частицы со стороны воздушного потока
6) Исследование движения частиц под действием силы сопротивления с помощью метода дискретных элементов
7) Определение зависимости скорости частиц от координаты
8) Расчет газодинамики двухфазного потока с помощью сопряженного решения задачи методами вычислительной гидродинамики и дискретных элементов

2.4.1. Построение компьютерной модели и разбиение ее на сетку

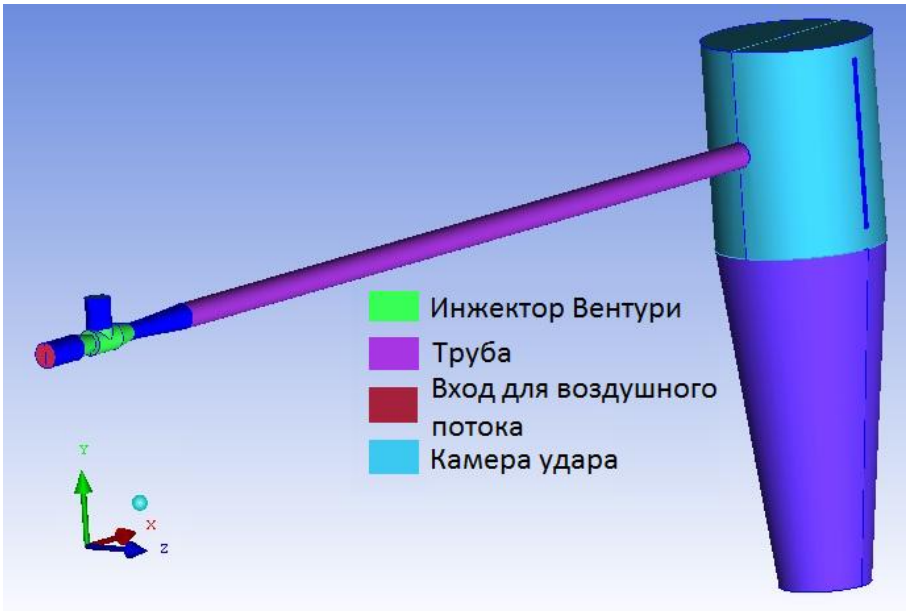


Рис. 2.12 Модель пневматической пушки

В данном исследовании используется первый способ описания движения твердых частиц в воздушном потоке, описанный в предыдущем пункте. Вначале была построена компьютерная модель пневматической пушки (рис. 2.12).

После построения компьютерной модели, она разбивалась на сетку, которая измельчалась в инжекторе, потому что скорость потока в нем резко возрастает, и он имеет ряд небольших элементов, по сравнению с остальной геометрией. В ускорительной же трубе, в камере удара, а также в выходном конусе сетка наоборот укрупнялась. В итоге была получена разбиение компьютерной модели (рис. 2.13) на $8 \cdot 10^5$ элементов и $1{,}5 \cdot 10^5$ узлов. В качестве элементов использовались пирамиды с различными основаниями. Также особенностью построения модели является то, что начало координат помещено в центр сечения, с которого начинается ускорительная труба и на котором заканчивается инжектор (рис. 2.13).

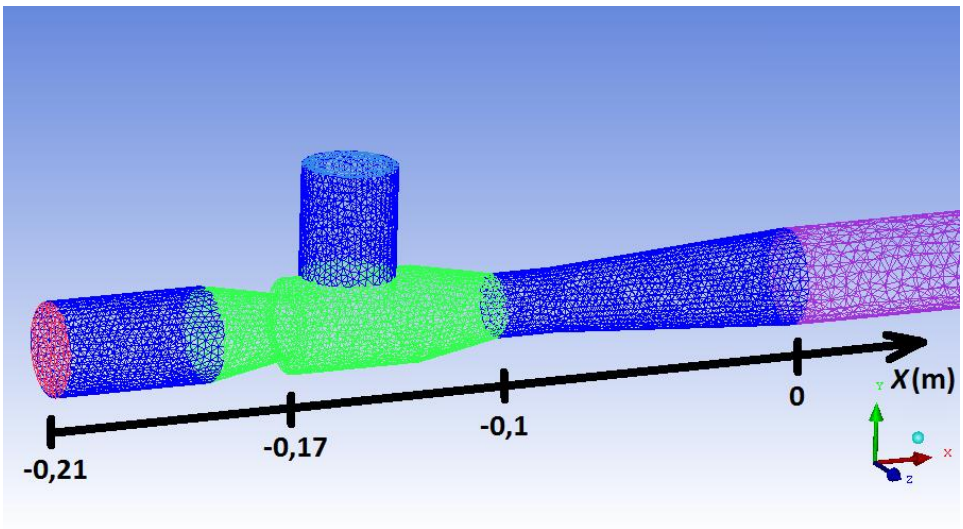


Рис. 2.13 Разбиение на сетку модели пневматической пушки в окрестности инжектора

2.4.2. Решение газодинамической задачи пневматической пушки с использованием метода вычислительной гидродинамики

Построив компьютерную модель экспериментального аппарата, и разбив ее на сетку, можно приступать к решению газодинамической задачи. Решение производилось с помощью пакета ANSYS Fluent. В качестве газовой фазы использовался воздух, а в качестве материала стенок – алюминий. Вязкость воздуха и теплопроводность не учитывались. В ряде расчетов поток считался ламинарным, но также проводились расчеты с учетом турбулентности.

ANSYS Fluent позволяет проводить исследования для широкого спектра задач, относящихся к моделированию несжимаемых и сжимаемых, ламинарных и турбулентных потоков. Причем, интересующие нас исследования могут быть выполнены в рамках установившихся или переходных процессов. Fluent оперирует широким диапазоном математических моделей для явлений обмена (например, теплообмен и химические реакции), а также является действенным при наличии сложной геометрии расчётной области.

Уравнения Эйлера. Для всех потоков Fluent решает уравнение баланса массы и уравнение баланса количества движения. Для турбулентного потока считаются дополнительные уравнения переноса.

Уравнение баланса массы, или уравнение неразрывности, можно записать как

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \underline{v}\right) = S_m$$

, где ρ – плотность потока, t – время, $\underline{v}$ - скорость, S_m - источниковый член.

Данное уравнение - это общая форма уравнения баланса массы и справедливо как для сжимаемых, так и для несжимаемых потоков. Источниковый член S_m - это масса, добавляемая к непрерывной фазе от диспергированной второй среды.

Уравнением баланса количества движение в инерционной системе отсчета имеет следующий вид [1]

$$\frac{\partial y}{\partial t}\left(\rho \underline{v}\right) + \nabla \cdot \left(\rho \underline{v}\underline{v}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} + \rho \underline{g} + \underline{F}$$

, где p - статическое давление, $\underline{\underline{\tau}}$ – тензор напряжений (описан ниже), и $\rho \underline{g}$ и $\underline{F}$ - гравитационная массовая сила и внешняя массовая сила соответственно.

Тензор напряжений имеет вид

$$\underline{\underline{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \underline{v} + \nabla \underline{v}^T\right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \underline{v} \underline{\underline{I}}\right]$$

, где μ - молекулярная вязкость, $\underline{\underline{I}}$ – единичный тензор. Последнее слагаемое в выражении для $\underline{\underline{\tau}}$ отвечает за объемное расширение.

Модель турбулентности в Fluent. Самой простой «полной моделью» турбулентности является модель, состоящая из двух уравнений. В ней решаются два отдельных уравнения переноса, которые позволяют независимо определить турбулентную скорость и масштаб турбулентности. В решении поставленной задачи применялась стандартная модель $k - \varepsilon$. Данная модель, присутствующая в Fluent, широко используется для решения

практических инженерных задач, была предложена Лаундером и Спалдингом [6].

Стандартная $k-\varepsilon$ модель [6] – это полуэмпирическая модель, основанная на уравнениях переноса для кинетической энергии турбулентности (k) и ее степени диссипации (ε). Уравнение переноса для k получается из точного уравнения, в то время как уравнение переноса для ε получается из физических соображений, и имеет мало общего со своим точным математическим аналогом.

В выводе уравнений модели $k-\varepsilon$ принимается предположение, что поток полностью турбулентный, а эффектом молекулярной вязкости можно пренебречь. По этой причине стандартная модель $k-\varepsilon$ применима только для полностью турбулентных потоков.

Кинетическая энергия турбулентности, k, и ее скорость диссипации, ε, получается из следующих уравнений переноса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon$$

В этих уравнениях, G_k представляет генерацию кинетической энергии турбулентности за счет градиентов скорости. G_b - генерация кинетической энергии турбулентности за счет подъемной силы. Y_M представляет вклад неустойчивого расширения в сжимаемой турбулентности в общую скорость диссипации. $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ и $C_{3\varepsilon}$ – константы. σ_k и σ_ε - турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно. S_k и S_ε - заданные источниковые члены.

Турбулентная вязкость, μ_t, вычисляется путем объединения k и ε, как ниже

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon},$$

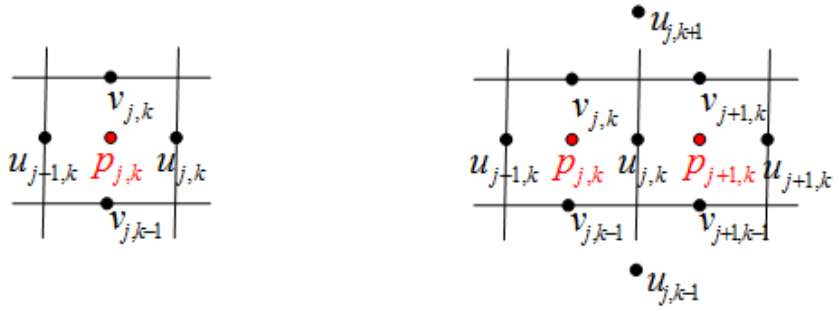
где C_μ - константа.

Константы модели $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k$ и σ_ε имеют следующие значения [6]:

$$C_{1\varepsilon}=1{,}44; C_{2\varepsilon}=1{,}92; C_\mu=0{,}09; \sigma_k=1{,}0; \sigma_\varepsilon=1{,}3$$

Эти значения были получены из экспериментов с воздухом и водой для фундаментальных турбулентных вихревых потоков, включающих гомогенные вихревые потоки и затухающую изотропную турбулентность сетки.

Метод конечных объемов. Решение в пакете Fluent основано на применении метода конечных объемов. Метод конечных объемов (МКО) тесно связан с методом конечных разностей (МКР) и зачастую может быть интерпретирован как некоторое приближение МКР в дискретизации дифференциальных уравнений. Однако, МКО получен на основе интегральных законов сохранения, что обеспечивает множество преимуществ при решении задач.



(а) Уравнение неразрывности *(б) Уравнение импульса по оси x*

Рис. 2.14 Контрольные объёмы метода SIMPLE

МКО, который применялся для описания течения как сжимаемых, так и несжимаемых сред, обладает двумя важными преимуществами. Во-первых, он обладает хорошими консервативными свойствами. Во-вторых, он допускает дискретизацию сложных вычислительных областей в более простой, хотя и не обязательно столь же точной форме, чем это позволяет изопараметрическая конечно-элементная формулировка или введение обобщённых координат.

Методы типа SIMPLE. В качестве метода решения использовались методы типа *SIMPLE.* В данном семействе алгоритмов используется дискретизация уравнений по методу конечных объёмов на разнесённых сетках. Последнее означает, что различные зависимые переменные определяются в разных точках сетки: давление – в ячейках, скорости – в узлах и.т.п. Метод SIMPLE был предложен и детально описан в работе [5]. Аббревиатура SIMPLE происходит от Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equations и описывает итерационную процедуру решения дискретных

уравнений. Итерационная процедура здесь рассматривается как метод установления для решения нестационарных уравнений в дискретном виде с целью определения стационарного течения. На разнесённой сетке для различных уравнений используются различные контрольные объёмы (Рис. 14).

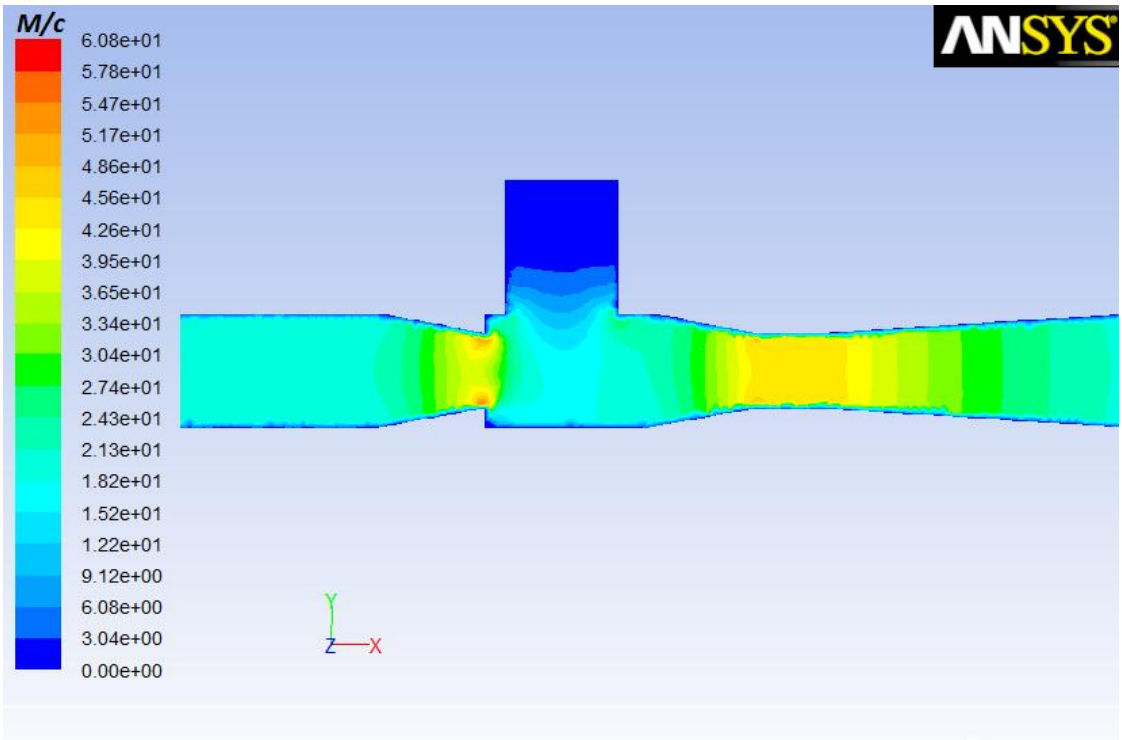


Рис. 2.15 Изолинии x-компоненты скорости

Решение задачи газодинамики пневматической пушки. Ламинарный случай. В качестве граничных условий в ламинарном случае задавались различные скорости воздушного потока на входе в инжектор: 5, 10, 15 и 20 м/с. На выходе задавалось относительное давление, равное нулю.

Таким образом, было получено следующее распределение x-компоненты скорости воздушного потока в продольном сечении пневматической пушки в окрестности инжектора (рис. 2.15).

Была получена зависимость x-компоненты скорости воздушного потока, а также x-компоненты скорости, отнесенной к начальной скорости от координаты x. На отрезке прямой, проведенной через центры сечений инжектора и ускорительной трубы распределение x-компоненты имеет вид, представленный на рис. 2.16.

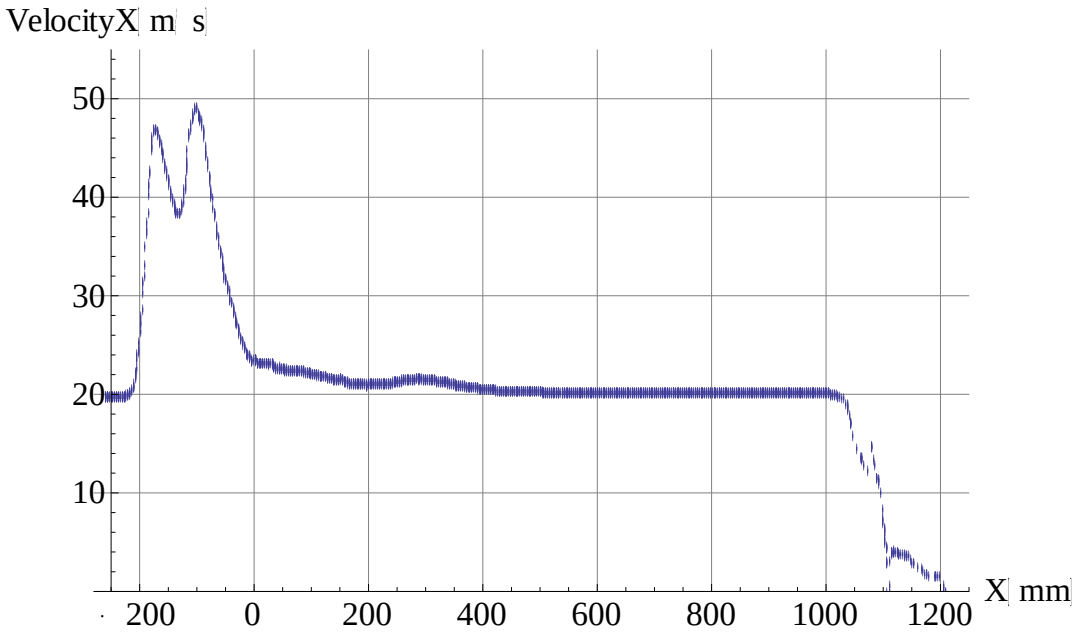


Рис. 2.16 Зависимость x-компоненты скорости потока от координаты x на отрезке прямой, проходящей через центры сечений инжектора и ускорительной трубы

Значение отнесенной скорости на той же линии представлено ниже (рис. 2.17). Стоит отметить еще раз особенность построения модели, что ноль находится в конце инжектора и начале ускорительной трубы, а координата $x = -220$ является точкой входа воздушного потока.

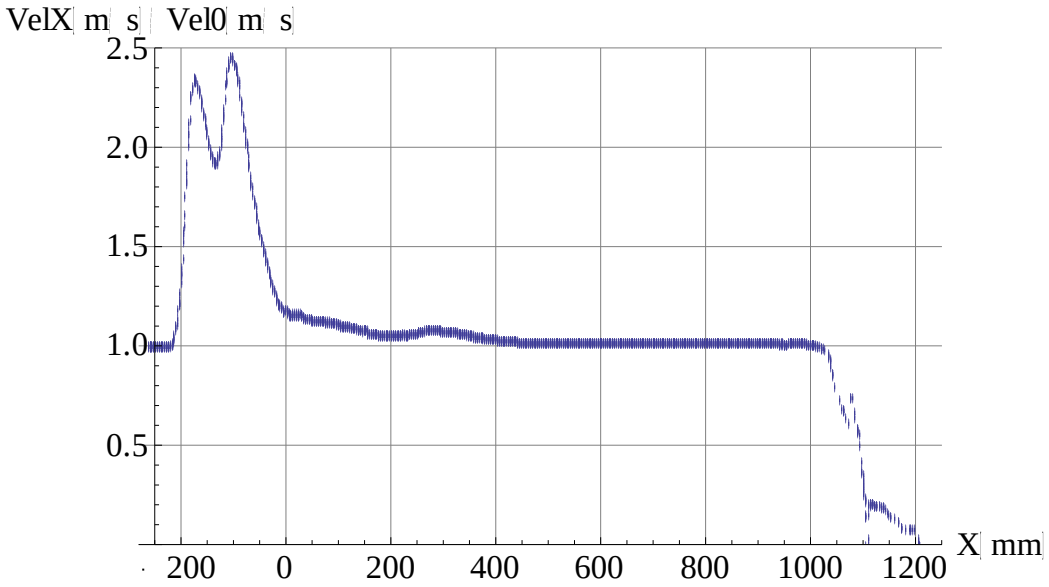


Рис. 2.17 Зависимость x-компоненты скорости потока, отнесенной к начальной скорости, от координаты x на отрезке прямой, проходящей через центры сечений инжектора и ускорительной трубы

Аналогичные графики были получены для других скоростей входящего воздушного потока: 5, 10 и 15 м/с. Стоит отметить, что значения x-

компоненты скорости воздушного потока, отнесенной к начальной скорости, в данной точке не отличаются друг от друга при рассчитанных скоростях входящего потока. Это продемонстрировано на рис. 2.18.

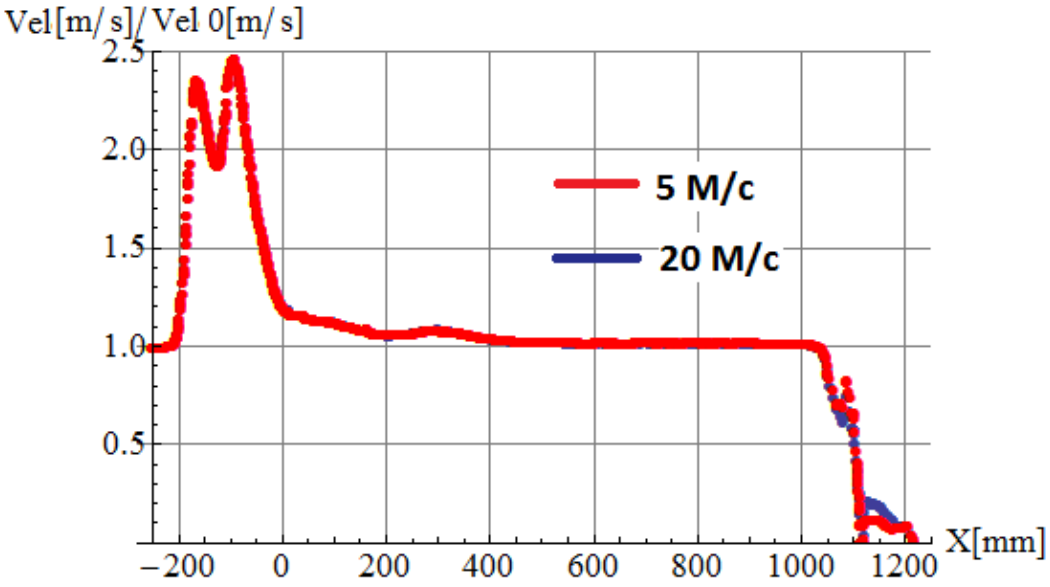


Рис. 2.18 Сравнение значений отнесенной скорости при скоростях входящего потока 5 и 20 м/с

Синяя кривая, соответствующая скорости входящего воздушного потока 20 м/с, едва видна из под красной кривой, соответствующей 5 м/с, т.к. отнесенные скорости в точности совпадают, за исключение конечного отрезка.

Решение задачи газодинамики пневматической пушки. Турбулентный случай. Турбулентность потока учитывалась описанной выше моделью $k-\varepsilon$. Расчеты проводились при скоростях 5, 20 и 40 м/с входящего воздушного потока. Разбиение на сетку, свойства газовой фазы, стенок задавались те же, что и в ламинарном случае. Также не учитывалась теплопроводность. Граничные условия представлены в табл. 2.1

Табл. 2.1 Граничные условия расчета газодинамической задачи при учете турбулентности

Граничное условие	Значение	Размерность
Скорость воздушного потока на входе	5, 20, 40	м/с
Кинетическая энергия турбулентности	1	$м^2/с^2$
Скорость диссипации кинетической энергии турбулентность	1	$м^2/с^2$
Интенсивность турбулентности	5	%

Относительная вязкость турбулентности	10	-
Гидравлический диаметр	1	м
Относительное давление на выходе	0	Па

В итоге была также получена зависимость скоростей воздуха от координаты. На прямом отрезке, проходящем через центры сечений инжектора и ускорительной трубы зависимость x-компоненты скорости воздушного потока, при начальной скорости воздуха, равной 40 м/с, от координаты x имеет вид, представленный на рис. 2.19.

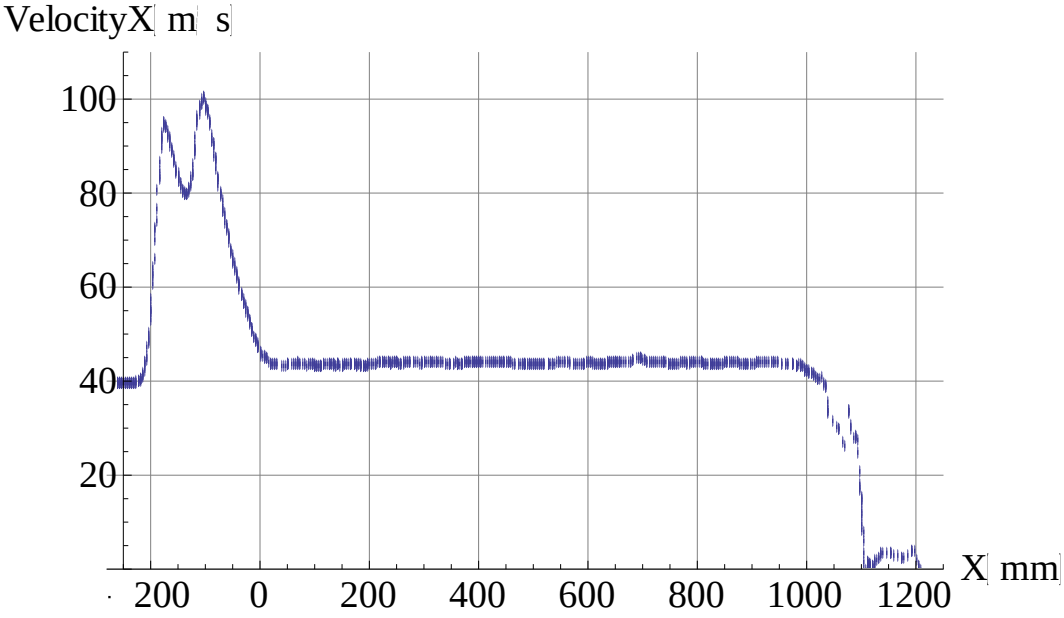


Рис. 2.19 Зависимость x-компоненты скорости от координаты x на линии, проходящей через центры сечений инжектора и ускорительной трубы с учетом турбулентности

На рис. 2.20 представлено сравнение значений отношения x-компоненты скорости к начальной скорости при 5 и 40 м/с с учетом турбулентности и 5 м/с в ламинарном случае.

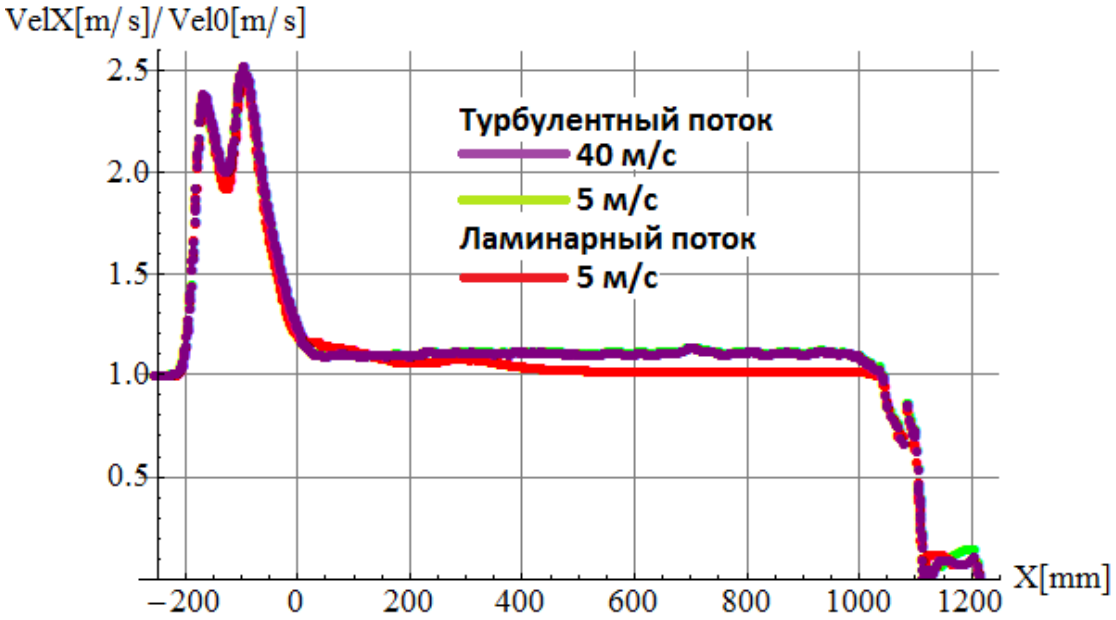


Рис. 2.20 Сравнение значений отнесенных скоростей при различных типах потока

Из рис. 2.20 видно, что также, как и в ламинарном случае, кривые, соответствующие различным скоростям входящего воздушного потока совпадают. Также прослеживается отличие, вносимое в значение скорости турбулентностью: графики, соответствующие турбулентному случаю, в области ускорительной трубы (от 0 до 1000 мм) находятся немного выше графика, соответствующего ламинарному случаю. Таким образом, если в ламинарном случае скорость воздуха в ускорительной трубе была непостоянна и практически равна скорости входящего воздушного потока, то в турбулентном случае эта скорость неизменна и немного выше значения скорости потока на входе в аппарат. Тем не менее, можно заключить, что отличие между значениями скоростей в ламинарной и турбулентной постановке мало, следовательно, влияние турбулентности незначительно.

В итоге были получены профили скоростей воздушного потока в зависимости от координаты в пневматической пушке в ламинарном и турбулентном случае. Были представлены графики зависимостей x-компоненты скорости от координаты x. Это сделано потому, что вектор скорости входящего потока направлен вдоль оси x и, большая часть установки параллельна оси x. Потому значения других компонент скорости на несколько порядков меньше значения x-компоненты практически на всей длине пути воздушного потока. За исключением окрестности ударной стенки в камере удара и за ней. В этих областях значение x-компоненты скорости резко падает до нуля, а значение y-компоненты растет. По этой причине

целесообразно учитывать значение x-компоненты только в окрестности ударной стенки.

2.4.3. Решение задачи движения твердых частиц в пневматической пушке под действием силы сопротивления и сопряженным методом с помощью метода дискретных элементов

Определение аналитической зависимости скорости потока от координаты. Для построения силы сопротивления необходима аналитическая функция скорости. Ранее нами уже была решена газодинамическая задача и получен профиль скоростей воздуха, в зависимости от координаты. Как и было сказано выше, почти на всем пути значения z и y-компонент скорости воздуха на несколько порядков меньше x-компоненты. Поэтому в силе сопротивления будем учитывать именно эту компоненту. Кроме того, предположим, что значение скорости в аппарате не зависят от радиуса, а в камере удара значение x-компоненты скорости в точках, лежащих на расстояниях больших радиуса ускорительной трубы от ее оси равно нулю. Данные предположения приняты благодаря анализу распределения скоростей воздуха по продольному сечению аппарата, представленному на рис. 2.15 и 2.21.

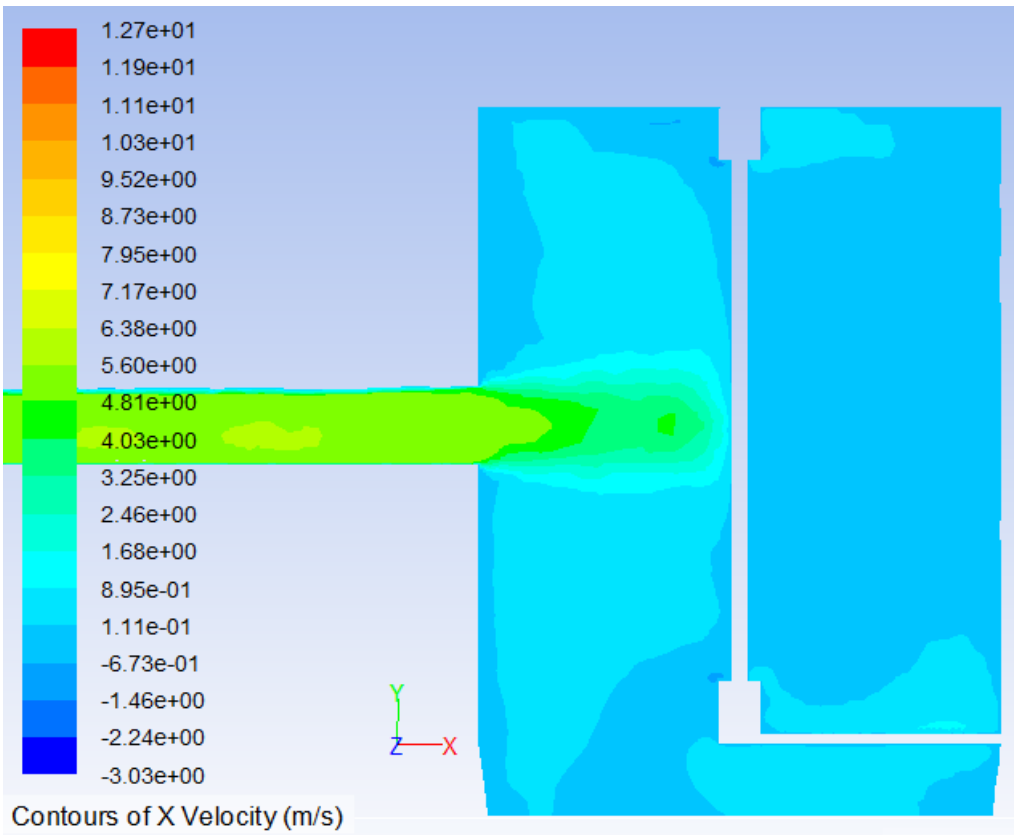


Рис. 2.21 Значение x-компоненты скорости в поперечном сечении пневматической пушки в окрестности камеры удара при скорости 5 м/с входящего потока

Исходя из изложенных выше предположений, будем использовать для построения силы сопротивления значения x-компоненты скорости на линии, проходящей через центры сечений инжектора и ускорительной трубы. Профиль скоростей, представляемый Fluent в результате решения, является дискретным, но для силы построения силы сопротивления необходима непрерывная аналитическая кривая. Потому дискретная кривая Fluent была аппроксимирована (рис. 2.22)

$$V_{\text{возд}}(x) = a_1 + a_2 \exp(a_3(x + a_4)^2) - a_1 \exp(a_5(x + a_4)^2) - a_1 \exp(a_6(x - a_7)^2)$$

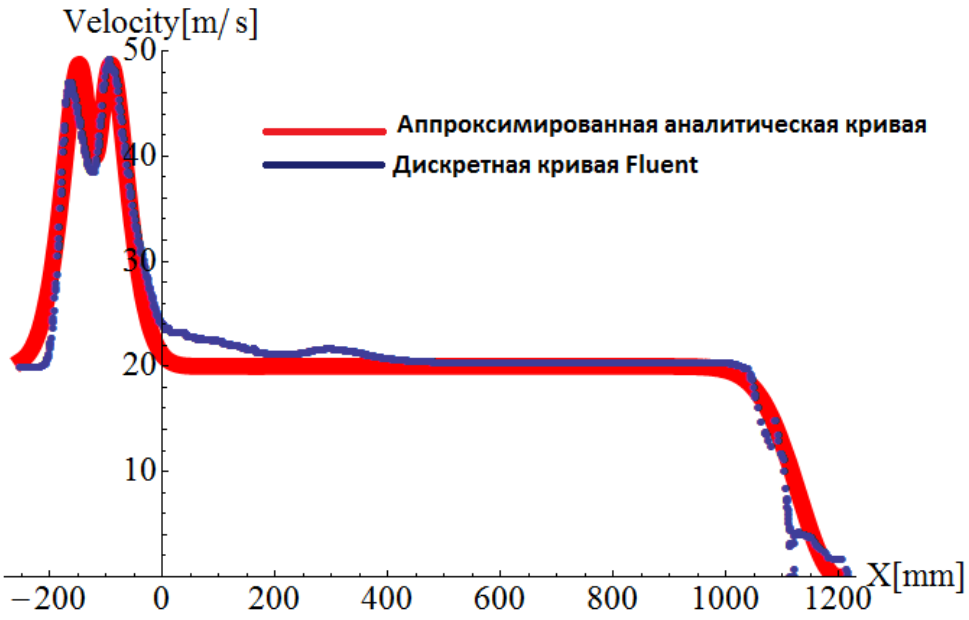


Рис. 2.22 Дискретная и аналитическая зависимость x-компоненты скорости от координаты

Построение силы аэродинамического сопротивления. Модуль силы аэродинамического сопротивления может быть выражен следующим соотношением

$$F_D(x) = \frac{1}{2} A c \rho \left(V_{\text{ч}}(x) - V_{\text{п}}(x)\right)^2,$$

где A – Характерная площадь, $V_{\text{ч}}(x)$ - скорость частицы в точке x, $V_{\text{п}}(x)$ - скорость потока в точке x, ρ - массовая плотность среды, c – коэффициент сопротивления. Направление силы зависит от знака разности скоростей воздуха и частицы, т.е. если скорость частицы меньше скорости потока, то она будет разгоняться до скорости потока, а если скорость частицы меньше скорости потока, то она будет им тормозиться. Тем самым сила аэродинамического сопротивления стремится уравновесить скорость потока и частицы, находящейся в данном потоке.

Коэффициент сопротивления c может быть определен по формуле Каскаса [4]

$$\text{c} = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0{,}4$$

$$Re \in (0; 2 - 4 \cdot 10^5)$$

При скоростях воздуха, лежащих в интервале от 5 до 40 м/с число Рейнолдса можно принять равным 10^5.

Расчет движения частиц в потоке под действием силы сопротивления и сопряженным методом с помощью метода дискретных элементов. Решение данной задачи с помощью силы сопротивления осуществлялось посредством пакета EDEM Dem-solutions. Оно производилось отдельно от решения газодинамической задачи в пакете Fluent. Сопряженное же решение происходило одновременно в Fluent и EDEM. Граничные условия, материалы частиц и стенок, разбиение на сетку использовались в обоих подходах одинаковые. За исключением скорости входящего воздушного потока. В случае сопряженного решения она была равна 25 м/с, а при расчете с помощью силы сопротивления она бралась равно 20 м/с.

Сила сопротивления учитывалась посредством подключения particle body force – массовой силы частиц. В качестве профиля скоростей потока брался случай, при котором скорость входящего потока была равной 20 м/с. В качестве свойств частиц брались свойства Al_2O_3. За свойства стенки – свойства стали. Данные свойства приведены в табл. 2.2. Частицы генерировались прямо в инжекторе с нулевой начальной скоростью.

Табл. 2.2 Свойства частиц и стенок, заданные при расчете в пакете EDEM

Свойство	Значение	Размерность
Частицы (Al_2O_3)		
Диаметр ($d_ч$)	1,8	мм
Плотность ($\rho_ч$)	1040	кг/м^3
Коэффициент восстановления (e)	0,735	-
Коэффициент трения частицы с частицей ($\mu_{ч\text{-}ч}$)	0,7	-
Коэффициент трения качения ($\mu_{качен}$)	0,01	-
Коэффициент Пуассона ($\nu_ч$)	0,25	-
Модуль сдвига (G)	$6{,}5\cdot10^9$	Па
Стенка (сталь)		
Коэффициент Пуассона ($\nu_{ст}$)	0,28	-
Модуль сдвига (G)	$79{,}3\cdot10^9$	Па
Плотность ($\rho_{ст}$)	7874	кг/м^3
Коэффициент трения частицы со	0,16	-

стенкой ($\mu_{ч\text{-}стенка}$)		

В результате обоих решений были получены траектории и зависимости скоростей частиц от координаты (рис. 2.23).

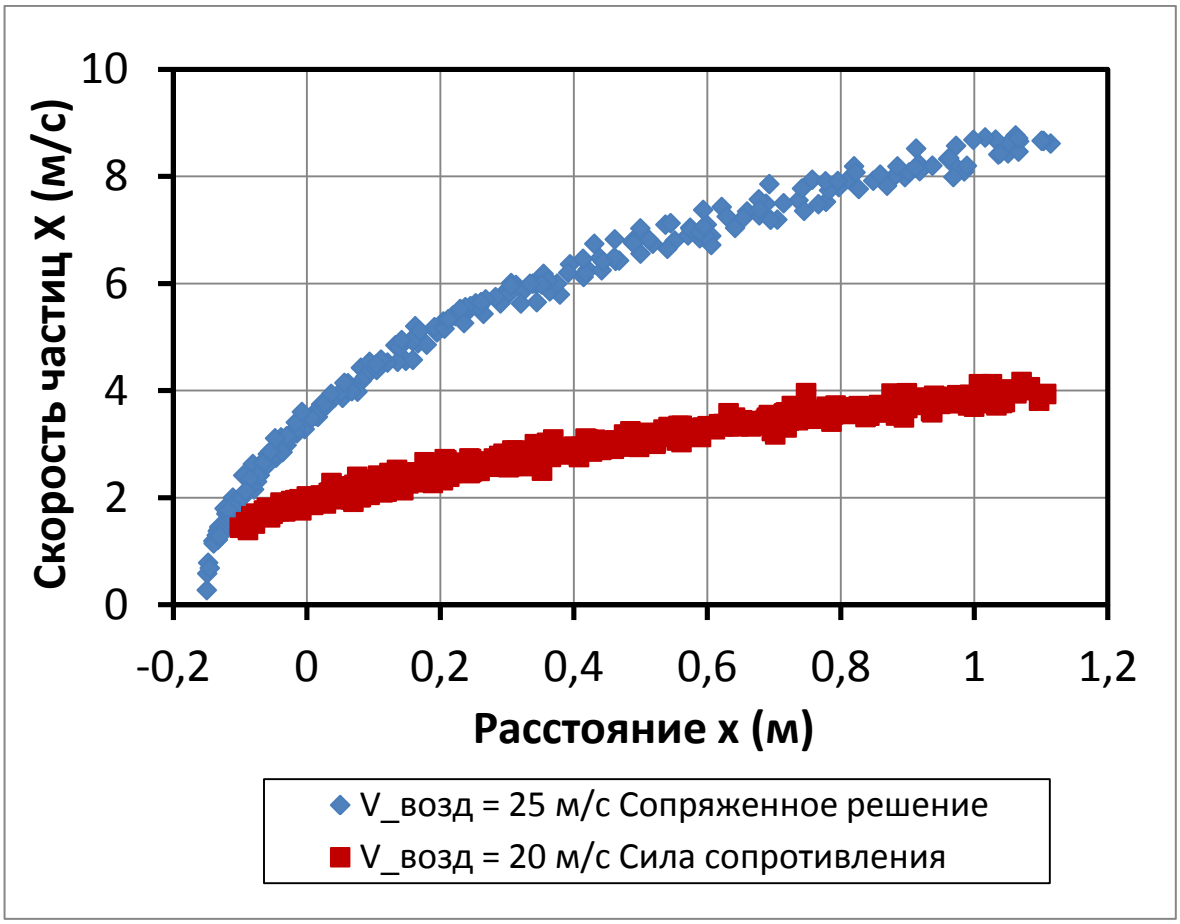


Рис. 2.23 Зависимость скорости частиц от координаты в пневматической пушке

2.5. Выводы по исследованию поведения частиц в потоке

Проведено численное и экспериментальное исследование движения и разрушения частиц и их агломератов.

В ходе численного моделирования было изучено движение воздуха и частиц в пневматической пушке. Решена газодинамическая задача и определена аналитическая зависимость скорости воздуха от координаты. Построена сила аэродинамического сопротивления. С использованием двух различных численных методов решена задача о движении частиц в пневматической пушке (методом дискретных элементов под действием силы сопротивления и методом сопряженного решения) и получена зависимость скорости частиц от координаты.

В итоге экспериментального исследования был изучен процесс разрушения агломератов частиц при соударении их с жесткой стенкой в пневматической пушке. Были получены функции распределения и плотности распределения частиц в зависимости от их размеров после удара. С помощью высокоскоростной камеры и лазерных детекторов определена зависимость скорости частиц от скорости воздуха в ускорительной трубе и камере удара и вычислена вероятность разрушения в зависимости от кинетической энергии удара частиц.

Список литературы

1. G. K. Batchelor. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1967.
2. Флетчер К., Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с., ил.
3. Флетчер К., Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с., ил.
4. Sergiy Antonyuk, Manoj Khanal, Juergen Tomas, Stefan Heinrich, Lothar Moerl: Impact breakage of spherical granules: Experimental study and DEM simulation, Chemical Engineering and Processing 45 (2006) 838–856.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости, Энергоатомиздат, М., 1984
6. B. E. Launder and D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence: Academic Press, London, England, 1972.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей, Наука, М., 1973
8. Г. Корн, Т. Корн, Справочник по математике, Наука, М., 1973

Заключение

Проведено исследование динамических свойств полимеров, а также частиц и их агломератов на примере кофе и оксида алюминия. Предложен метод для описания этих свойств, базирующийся на использовании экспериментальных данных для построения аналитических зависимостей.

В первой части исследования получено выражение модуля объемной вязкости через нелинейные экспериментальные данные. На основании этих данных получены непрерывные аналитические зависимости, с помощью которых сформулированы основные нелинейные уравнения термовязкоупругости для полимеров. Предложен численный алгоритм для решения задач термовязкоупругости, протестированный на решении линейной задачи термоупругости.

Во второй части работы численно и экспериментально исследовано поведение частиц в воздушном потоке. С помощью эксперимента получены аналитические зависимости скоростей частиц от скорости воздуха, а также вероятность разрушения агломерата в зависимости от кинетической энергии удара на примере кофе. Численное моделирование позволило получить зависимость скорости частиц, движущихся в потоке, от координаты.

Приложение А. Охрана труда

3.1. Анализ и оценка условий труда в вычислительной лаборатории

Для решения задач компьютерного моделирования необходимо использование вычислительной техники. Практика работы с вычислительной техникой показывает, что наиболее эффективной работы и можно добиться при одновременном использовании большого числа электронно-вычислительных машин, сосредоточенных в вычислительном центре (ВЦ), и при тесном сотрудничестве специалистов различного профиля. Критериями выбора оптимального варианта организации работы в ВЦ является техническая эффективность и соответствие требованиям эргономики и охраны труда. Эргономикой изучаются возможности и особенности деятельности человека в процессе труда с целью создания таких условий, методов и организаций трудовой деятельности, которые делают трудовой процесс наиболее производительным и вместе с тем обеспечивают безопасность и удобство работающему, сохраняют его здоровье и работоспособность [1].

Аттестация рабочих мест осуществляется по условиям труда и фактору травмоопасности с учетом обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты. Условия труда определяются с помощью гигиенических критериев по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса. В современных условиях любой труд человека связан с производственным процессом или выполняется с применением техники. В основе умственного труда лежат восприятие, переработка информации и принятие решений. Особенностью данного вида труда является повышенное эмоциональное напряжение, напряжение слуха и зрения и в отдельных случаях – однообразие и простота выполняемых функций (монотония), а также пониженная мышечная активность (гипокинезия).

По природе действия вредные и опасные факторы подразделяются на следующие группы:

- Физические факторы: температура, влажность и подвижность воздуха, неионизирующие электромагнитные излучения (ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное, лазерное, микроволновое, радиочастотное, низкочастотное), статическое, электрические и магнитные поля, ионизирующие излучения, производственный шум, вибрация (локальная, общая), ультразвук, аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (пыли), освещенность (отсутствие естественного освещения, недостаточная освещенность, повышенная ультрафиолетовая радиация);
- Химические факторы, в том числе некоторые вещества биологической природы (антибиотики, витамины, гормоны, ферменты);
- Биологические факторы: патогенные микроорганизмы, микроорганизмы продуценты, препараты, содержащие живые клетки и споры микроорганизмов, белковые препараты;
- Факторы трудового процесса, характеризующие тяжесть физического труда: физическая динамическая нагрузка, масса поднимаемого и перемещаемого груза, стереотипные рабочие движения, статическая нагрузка, рабочая поза, наклоны корпуса, перемещение в пространстве;
- Факторы трудового процесса, характеризующие напряженность труда: интеллектуальные, сенсорные, эмоциональные нагрузки, монотонность нагрузок, режим работы.

3.1.1. Классы условий труда

Условия труда на рабочем месте в соответствии с гигиеническими критериями оценки подразделяются на четыре класса:

1-й класс – **оптимальные** условия труда – такие условия, при которых сохраняется не только здоровье работающих, но и создаются предпосылки для поддержания высокого уровня работоспособности. Оптимальные нормативы производственных факторов установлены для микроклиматических параметров и факторов трудового процесса. Для других факторов условно за оптимальные принимаются такие условия труда, при которых неблагоприятные факторы не превышают уровни, принятые в качестве безопасных для населения.

2-й класс – **допустимые** условия труда – характеризуются такими уровнями факторов среды и трудового процесса, которые не превышают установленных гигиеническими нормативами для рабочих мест, а возможные изменения функционального состояния организма восстанавливаются во время регламентированного отдыха или к началу следующей смены и не должны оказывать неблагоприятного воздействия в ближайшем и отдаленном периоде на состояние здоровья работающих и их потомство. Оптимальный и допустимый классы соответствуют безопасным условиям труда.

3-й класс – **вредные** условия труда – характеризуются наличием вредных производственных факторов, превышающих гигиенические нормативы и оказывающих неблагоприятное воздействие на организм работающего и/или его потомство. Вредные условия труда по степени превышения гигиенических нормативов и выраженности изменений в организме работающих подразделяются на четыре степени вредности:

1-я степень 3-го класса – условия труда, характеризующиеся такими отклонениями от гигиенических нормативов, которые, как правило, вызывают обратимые функциональные изменения и обусловливают риск развития заболеваемости;

2-я степень 3-го класса – условия труда с такими уровнями производственных факторов, которые могут вызывать стойкие функциональные нарушения, приводящие в большинстве случаев к росту заболеваемости с временной утратой трудоспособности, повышению частоты общей заболеваемости, появлению начальных признаков профессиональной патологии;

3-я степень 3-го класса – условия труда, характеризующиеся такими уровнями вредных факторов, которые приводят к развитию, как правило, профессиональной патологии в легких формах в период трудовой деятельности, росту хронической общесоматической патологии, включая повышенные уровни заболеваемости с временной утратой трудоспособности;

4-я степень 3-го класса – условия труда, при которых могут возникать выраженные формы профессиональных заболеваний, отмечаются значительный рост хронической патологии и высокие уровни заболеваемости с временной утратой трудоспособности;

4-й класс - **опасные (экстремальные)** условия труда – характеризуются такими уровнями производственных факторов, воздействие которых в течение рабочей смены (или ее части) создает угрозу для жизни, высокий риск возникновения тяжелых форм острых профессиональных поражений.

Гигиенические критерии условий труда. Классы условий труда определяются в зависимости от уровня гигиенических нормативов факторов производственной среды, показателей тяжести и напряженности трудового процесса [2]:

1. содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ;
2. показатели ионизирующих излучений на рабочих местах;
3. показатели электромагнитных излучений на рабочих местах;
4. показатели шума и вибрации на рабочих местах;
5. параметры световой среды производственных помещений;
6. показатели микроклимата в рабочей зоне;
7. эргономические требования;
8. показатели напряженности трудового процесса.

3.1.2. Оценка критериев производственной среды

Содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ. Содержание вредных химических веществ в производственных помещениях, работа на видеодисплейных терминалах (ВДТ) и персональных электронно-вычислительных машинах (ПЭВМ) в которых является основной (диспетчерские, операторские, расчетные, кабины и посты управления, залы вычислительной техники и др.), не должно превышать «Предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» [3, 4].

Излучения. В настоящее время электронно-лучевые дисплеи практически повсеместно заменены жидкокристаллическими, в которых отсутствует излучение электронно-лучевой трубки дисплея (рентгеновское, радиочастотное, видимое и ультрафиолетовое). Однако работа за компьютером, особенно длительное время, вредит зрению даже с использованием ЖК мониторов. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Продолжительность непрерывной работы с ВДТ без регламентированного перерыва не должна превышать 2часов. Рекомендуется использовать комплексы упражнений для глаз [5].

Уровень шума. На рабочем месте программиста источником шума является вычислительная машина, производящая постоянный небольшой шум. Шум представляет собой сочетание звуков, различных по интенсивности и частоте в частотном диапазоне 16--20 кГц, не несущих полезной информации. Шум вредно воздействует не только на органы слуха, но и на весь организм человека в целом через центральную нервную систему. Шум – причина преждевременного утомления, ослабления внимания, памяти. Постоянным считается шум, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день изменяется во времени не более чем на 5дБА. Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума 50 дБ (для помещения в котором осуществляется эксплуатация ЭВМ) [6,7].

Мой персональный компьютер является шумным для своего класса, однако для моего рабочего помещения уровень шума не превышает ПДУ, что соответствует второму (допустимому) классу условий труда. Поэтому применение специальных звукоизоляционных материалов не требуется. Воздействие вибрации, инфра- и ультразвука в помещении отсутствует.

Освещение. Помещения с ВДТ и ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Естественное освещение должно осуществляться через светопроемы, ориентированные преимущественно на север и северо-восток, и обеспечивать коэффициент естественной освещенности (КЕО) не ниже 1.2% в зонах с устойчивым снежным покровом и не ниже 1.5 на остальной территории [8].

Мое рабочее помещение обладает достаточным естественным (окна) и искусственным (система общего равномерного освещения) освещением, а также мое рабочее место дополнительно оборудовано светильниками местного освещения.

Микроклиматические условия. Устанавливаемые СанПиН [1] и Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений [9] оптимальные нормы температуры (23-25°С) и относительной влажности (40-60%) для теплого периода года, а также (22-24 °С) и (40-60%) соответственно для холодного и переходного, скорости движения воздуха соблюдаются благодаря наличию системы кондиционирования, работающей в режиме автоматического

регулирования. Скорость движения воздуха не превышает допустимого значения (<0.1м/с, как для холодного, так и для теплого периода).

Эргономические требования. Рассмотрим более подробно требования эргономики, предъявляемые к рабочему месту оператора при работе с ВДТ. Под рабочим местом понимается зона, оснащенная необходимыми техническими средствами, в которой совершается трудовая деятельность исполнителя или группы исполнителей, совместно выполняющих одну работу или операцию. Организацией рабочего места называется система мероприятий по оснащению рабочего места средствами и предметами труда и их размещению в определенном порядке. Конструкция рабочего места должна обеспечивать быстроту, безопасность, простоту и экономичность технического обслуживания в нормальных и аварийных условиях; полностью отвечать функциональным требованиям и предполагаемым условиям эксплуатации. Площадь на одно рабочее место с ВДТ или ПЭВМ для взрослых пользователей должна составлять не менее 6.0кв. м., а объем не менее 20.0 куб. м.. Рабочие места с ВДТ и ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, следует изолировать друг от друга перегородками высотой 1.5-2.0 м.

В моем конкретном случае эти условия выполняются.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей (размер ВДТ и ПЭВМ, клавиатуры и др.), характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм. Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать подержание рациональной рабочей позы при работе на ВДТ и ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) должен выбираться в зависимости от характера и продолжительности работы с ВДТ и ПЭВМ с учетом роста пользователя. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона

сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию. Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, неэлектризующимся и воздухонепроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100--300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Мой стол является не регулируемым по высоте, высота рабочей поверхности составляет 725 мм, что удовлетворяет необходимым требованиям. Рабочий стул также удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Напряженность трудового процесса. Тяжесть моего трудового процесса можно отнести к оптимальному классу условий труда (легкая физическая нагрузка): работа связана с интеллектуальной нагрузкой, есть возможность в любое время менять рабочую позу прерываться для отдыха. Как видно из всего выше написанного, моя рабочая обстановка является оптимальной и соответствует всем установленным нормам. Так как выполняемый мной вид работ относится к интеллектуальному виду деятельности, то основная нагрузка на организм ложится на нервную систему и зрение. Остальные факторы являются сопутствующими.

Оценка моей рабочей деятельности по степени напряженности:

- Содержание работы (интеллектуальные нагрузки)
  - решение сложных задач с выбором по известным алгоритмам (напряженный труд 1-ой степени);
  - иногда эвристическая, творческая деятельность, требующая решения сложных задач при отсутствии алгоритма (напряженный труд 2-ой степени);
- Степень сложности задания (интеллектуальные нагрузки)
  - Обработка, выполнение задания и его проверка (Допустимый уровень, напряженность труда средней степени)
- Характер выполняемой работы (интеллектуальные нагрузки)
  - Большая часть времени – работа по установленному графику с возможной его коррекцией по ходу деятельности (напряженный труд 1-ой степени);

    - иногда – работа в условиях дефицита времени и информации с повышенной ответственностью за конечный результат (напряженный труд 2-ой степени);
- Наблюдение за экранами ВДТ (сенсорные нагрузки)
    - более четырех часов за рабочий день (напряженный труд 2-ой степени);
- Степень ответственности (эмоциональная нагрузка)
    - Несет ответственность за функциональное качество основной работы. Влечет за собой исправления за счет дополнительных усилий всего коллектива (напряженный труд 2-ой степени);
- Степень риска для собственной жизни (эмоциональная нагрузка)
    - исключена (напряженность труда легкой степени);
- Степень риска за безопасность других лиц (эмоциональная нагрузка)
    - исключена (напряженность труда легкой степени);
- Фактическая продолжительность рабочего дня (режим работы)
    - 8 – 9 часов (напряженность труда средней степени).

Подводя итог, можно сказать, что условия труда в моем случае являются оптимальными, а сам трудовой процесс можно отнести к напряженному по количеству условий, относящихся к напряженному труду первой и второй степени.

Список литературы

1. Санитарные правила и нормы, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, 10.06.2003.
2. Гигиенические критерии оценки и классификации условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса, Руководство Р 2.2.755-99.
3. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны ГН 2.2.5.1313.03.
4. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест, ГН 2.1.6.1338-03.
5. Производственная гимнастика для работников умственного труда, Приказ Минздравмедпрома России и Госсанэпиднадзора России 280/88 от 05.10.1995.
6. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы, СН.2.2.4/2.1.8.566-96.
7. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы, СН 2.2.4/2.1.8.562-96.
8. Естественное и искуственное освещение, СниП 23-05-95.
9. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, СанПиН 2.2.4.548-96.