

На правах рукописи



Орлов Сергей Александрович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
АЭРОДИНАМИКИ В ЛЕСНЫХ МАССИВАХ И НАСАЖДЕНИЯХ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск - 2012

Работа выполнена на кафедре прикладной аэромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
Васенин Игорь Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Алексей Степанович Ткаченко

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Сергей Викторович Тимченко

Ведущая организация: Институт прикладной механики Уральского отделения Российской Академии Наук.

Защита состоится «17» февраля 2012 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ФБГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корпус 10.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФБГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

E-mail автора: [orlov@ftf.tsu.ru](mailto:orlov@ftf.tsu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» января 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук



Ю.Ф. Христенко

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертационная работа посвящена моделированию процессов аэродинамики в лесных массивах и насаждениях.

### **Актуальность работы**

В настоящее время процессы урбанизации, наращивания промышленных производств и развитие больших городских агломераций приводит к тому, что обостряется проблема чистого воздуха и защиты населенных территорий от вредных промышленных выбросов. Значительная урбанизация, а к началу XXI века население крупных городов всего мира составило почти треть от населения земного шара, привела к проблеме планирования городских застроек, в результате чего создается повышенная концентрации крупных источников выбросов вредных веществ вблизи городов и территорий плотной застройки. К таким источникам можно отнести промышленные предприятия, отопительные котельные, автомобильный транспорт. Эти проблемы характерны и для большинства российских городов, многие из которых признаются экспертами зонами экологического бедствия. Вредные промышленные выбросы, образующиеся в большом количестве, могут распространяться в атмосфере на достаточно большие расстояния, оказывая неблагоприятное воздействие на жителей близлежащих населенных пунктов. Одним из способов защиты от вредных выбросов являются заградительные лесные полосы, массивы из насаждений на пути возможного распространения техногенных выбросов, пылевых облаков от промышленных объектов, выбросов от автомобильного транспорта.

Применение лесозащитных насаждений известно достаточно давно, однако начиная с середины прошлого века, в связи с обострившейся проблемой больших городов, наибольшее распространение получило использование лесозащитных полос и защитных массивов растительности для защиты от переноса пыли, снега и вредных промышленных газов. Защитные лесные полосы вдоль автомобильных и железных дорог ограждают их от снежных и песчаных заносов, снижают скорость порывов ветров. Вокруг городов и других населенных пунктов создаются массивы леса, системы лесных полос.

В связи с этим, а так же в связи с высокой плотностью застройки современных городов, актуальной становится задача создания математических моделей переноса пылевых облаков в лесных массивах с целью оптимального планирования мероприятий по созданию систем лесозащитных полос, а так же лесных насаждений вблизи населенных пунктов.

В последнее время активно происходит утилизация старых боеприпасов с истекшим сроком хранения и снятых с вооружения. Нередко подрыв отслуживших свой срок боеприпасов производится вблизи населенной территории, что значительно влияет на здоровье жителей и наносит вред жилым и промышленным постройкам. Действенным способом по снижению такого влияния на жилые постройки может быть размещение полигонов в лесных массивах или обустройство действующих полигонов специальными системами лесозащитных полос.

### **Цель работы.**

1. Целью диссертационной работы являлось построение математической модели взаимодействия массивов растительности с двухфазными газодинамическими потоками на основании уравнений газовой динамики, а также создание численной методики, алгоритмов и компьютерных программ для проведения исследований по распространению пылевых облаков и акустических возмущений в лесных массивах с разными геометрическими характеристиками, формами посадки и сортами деревьев.

2. Построение модели требует данных по коэффициентам сопротивления крон различных сортов деревьев. Поэтому другой целью диссертационной работы также являлось создание экспериментальной методики для определения коэффициентов сопротивления крон деревьев, проведение экспериментальных исследований, построение зависимостей для этих коэффициентов.

3. Проведение численных параметрических исследований процессов осаждения частиц и затухания акустических колебаний в массивах растительности.

### **Задачи исследований**

- Построение математической модели распространения пылевого облака в трехмерной постановке на основе уравнений газовой динамики;
- Разработка численной методики, алгоритма и компьютерной программы для проведения исследований по влиянию лесозащитных полос и лесных массивов на движение воздушных масс с пылевыми облаками;
- Разработка экспериментальной методики по определению коэффициентов сопротивления крон различных сортов деревьев, проведение экспериментальных исследований;
- Анализ влияния лесозащитных насаждений различных сортов и форм посадки на процессы распространения пылевого облака;
- Исследование влияния лесных массивов на процесс затухания звуковых колебаний

### **Положения выносимые на защиту**

1. Газодинамический метод расчета прохождения газопылевого облака через лесной массив.
2. Результаты экспериментальных исследований коэффициентов сопротивления элементов лесного массива.
3. Результаты исследований влияния параметров лесного массива и газопылевого потока на степень очистки воздуха от пыли.
4. Метод расчета затухания акустических колебаний в лесном массиве.
5. Результаты математического моделирования затухания акустических волн в лесозащитных полосах.

**Обоснование и достоверность научных положений**, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- обоснованностью исходных предпосылок и использованием апробированных методов математического моделирования для решения задач экологии
- удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования с расчётами других авторов и имеющимися экспериментальными данными.

### **Научная новизна**

- Экспериментально изучены коэффициенты сопротивления крон некоторых сортов деревьев, широко распространенных на территории Сибири (сосна кедровая, ель);
- Разработана математическая модель движения двухфазного газодинамического потока с частицами при прохождении через лесной массив с учетом исследованных коэффициентов сопротивления крон.
- В результате численных параметрических исследований показано, что наиболее полную защиту от пылевых выбросов обеспечивают лесные полосы с шахматной посадкой деревьев при наличии подлеска.

**Практическая значимость** работы определяется тем, что предложенная методика расчета движения газопылевого облака в лесном массиве и экспериментальная методика определения коэффициентов сопротивления позволяют рассчитывать картину распространения выбросов в трехмерной постановке с учетом преград в виде лесозащитных полос. Приведенные расчеты позволяют оценить, с учетом полученных экспериментальных данных, задерживающую способность тех или иных лесозащитных насаждений для пыли различного состава и с различными размерами частиц, моделировать лесозащитные полосы разных форм и расположений.

## Апробация работы

Результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях, из которых 2 – в журналах из Списка ВАК, сделаны 3 доклада на Всероссийских научных конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 132 с., содержит 48 рисунков. Список источников литературы включает 102 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальности исследования аэродинамических процессов в лесных массивах, формулируются цели и задачи исследования, показывается научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен литературный обзор по исследованию загрязнений воздушной среды, распространению воздушных масс в лесных массивах, массовым и геометрическим характеристикам лесных защитных полос. В параграфе 1.3 были описаны геометрические характеристики крон хвойных пород деревьев, позволяющие определить массу кроны в единице объема.

**Во второй главе** проведены экспериментальные исследования коэффициентов сопротивления крон ели и кедровой сосны.

В §2.1 приводится математическая постановка задачи. Движение воздушных масс в лесном массиве описывается нестационарными трехмерными интегральными уравнениями, которые в объеме  $\Omega$  с поверхностью  $S$  с учетом пористости  $\xi$  записывающейся в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \xi d\Omega + \int_S \xi \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) ds = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \xi \vec{U} d\Omega + \int_S \xi [p \vec{n} + (\vec{U} \cdot \vec{n}) \rho \vec{U}] ds = \int_{\Omega} (-\vec{F} + p \cdot \text{grad} \xi) d\Omega, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \xi \left( e + \frac{|\vec{U}|^2}{2} \right) d\Omega + \int_S \rho \xi (\vec{U} \cdot \vec{n}) \left( e + \frac{|\vec{U}|^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) ds = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $e$  – внутренняя энергия;  $\vec{U}$  – вектор скорости воздуха;  $\vec{n}$  – единичная нормаль к границе  $S$ ; оператор

$(\vec{U} \cdot \vec{n})$  - проекция  $\vec{U}$  на нормаль  $\vec{n}$ ,  $\vec{F}$  – сила сопротивления элементов лесного массива.

На распространение воздушных масс в лесных массивах влияет интенсивность взаимодействия между элементами крон деревьев и воздухом. В связи с тем, что в лесном массиве имеется спектр характерных размеров твердой фазы – от стволов с характерным размером порядка метра, до хвои с характерным размером порядка миллиметра, то зависимость эффективной силы межфазного трения может иметь сложную структуру.

Для сравнительной оценки и определения режима обтекания кроны и ствола деревьев возьмем среднюю скорость потока воздушной массы  $U \sim 10$  м/с, плотность воздуха  $\rho_v \sim 1$  кг/м<sup>3</sup>, вязкость воздуха  $\eta \sim 1.8 \cdot 10^{-5}$  Па·с. При таких параметрах число Рейнольдса обтекания отдельных иголок хвойных пород имеет величину порядка  $\sim 5 \cdot 10^2$ . При обтекании стволов, крупных ветвей и листьев число Рейнольдса превышает критическое и обтекание этих элементов происходит в турбулентном режиме. Сила сопротивления, действующая на отдельные стволы деревьев, может быть оценена с помощью известных зависимостей для коэффициентов сопротивления круглого цилиндра (Справочник по теплообменникам. В двух томах. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 561 с.).

Силу сопротивления отдельных иголок хвойных деревьев также можно оценить как силу сопротивления цилиндров. Однако в густых кронах процессы обтекания отдельных иголок влияют друг на друга. Поэтому сила сопротивления иголок веток не равняется сумме сил сопротивления одиночных иголок и её нужно изучать как силу, действующую на ветку в целом.

В работе проводились экспериментальные исследования с ветками кедровой сосны и ветками ели. При исследованиях сопротивления ветки в качестве безразмерных параметров можно выделить два числа Рейнольдса, одно из которых рассчитывается по диаметру иголок, другое по диаметру ветки-основания, к которой крепятся иглы. Однако экспериментальные исследования показали, что при скоростях ветра до 20 м/с силы сопротивления иголок во много раз превышают силы сопротивления ветки, на которой крепятся иголки. Поэтому в дальнейшем силы сопротивления изучались в зависимости только от числа Рейнольдса, рассчитанного по диаметру иголок.

Можно предположить, что сила сопротивления единицы объема кроны  $F$ , входящая в уравнение движения (1), пропорциональна массе веток в этом объеме. Для наиболее распространенных видов деревьев массы и размеры

крон подробно изучены биологами. Поэтому, сила сопротивления ветки представлялась в виде

$$f = \varphi(Re)m_d \frac{\rho_e U^2}{2}, \quad (2)$$

где  $m_d$  – масса исследуемой ветки,  $\varphi(Re)$  – коэффициент сопротивления. Тогда, зная функцию  $\varphi(Re)$  силу сопротивления  $\vec{F}$  можно вычислять по формуле

$$\vec{F} = \varphi(Re)M \frac{\rho_e U \cdot \vec{U}}{2}, \quad (3)$$

где  $M$  - масса веток в единице объема.

Введенное выражение для силы сопротивления веток (3) отличается от более известного выражения  $\vec{F} = C_R S_M \frac{\rho_e U \cdot \vec{U}}{2}$  для сил сопротивления. Дело в том, что согласно результатам исследований лесных массивов хорошо известна масса крон деревьев, но не сечение Миделя  $S_M$ . В то же время в экспериментах, описанных ниже, возможно определение величины  $\varphi(Re)$ , которая из сравнения формул для  $F$  имеет вид  $\varphi_R = \frac{C_R S_M}{m_d}$ . Таким образом,

величина  $\varphi(Re)$  пропорциональна  $S_M$ . Однако, в формуле  $\vec{F} = C_R S_M \frac{\rho_e U \cdot \vec{U}}{2}$  нам необходимо знать произведение  $C_R S_M$ , а не каждый из множителей в отдельности. Это произведение равно  $\varphi_R m_d$ , которое мы используем для расчетов.

В качестве методики определения функции  $\varphi(Re)$  в настоящей работе используется гидродинамический подход, при котором изучается коэффициент сопротивления исследуемой ветки при движении в воде.

При течениях со скоростями до 20 м/с основным параметром, определяющим обтекание тел заданной геометрии, является число Рейнольдса. Полагая число Рейнольдса в воде и воздухе равными, получим соотношение (4):

$$\frac{U_e}{U} = \frac{\rho}{\rho_e} \frac{\eta_e}{\eta}, \quad (4)$$

где  $\rho, U, \eta$  – плотность, скорость и динамическая вязкость воздуха,  $\rho_e, U_e, \eta_e$  – плотность, скорость и динамическая вязкость воды. Подставляя в (4) величины  $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_e = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 0,00018 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\eta_e = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , получим соотношения скоростей  $U_e/U = 0,056$ . Таким



образом, для получения в воде тех же самых чисел Рейнольдса, которые достигаются в воздушном потоке, нужно обеспечить скорости течения почти в 20 раз меньше, чем в воздухе. При рассмотрении скоростей воздушного потока до 20 м/с, в воде такие же числа Рейнольдса можно достичь при скоростях не превышающих 1,1 м/с.

На этом основании для исследования коэффициентов сопротивления элементов лесных массивов была собрана установка, основанная на изучении падения этих элементов в прозрачном бассейне с водой под действием сил тяжести, создаваемых специальными грузами. В центре бассейна установлен металлический стержень, по которому скользит специальная державка с закрепленными на нем грузами и элементами лесных массивов. На стержне отмечена мерная линейка для фиксации процесса падения. Видеорегистрация проводилась при помощи высокоскоростной камеры Citius Imagine на скорости 800 кадров в секунду.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки.

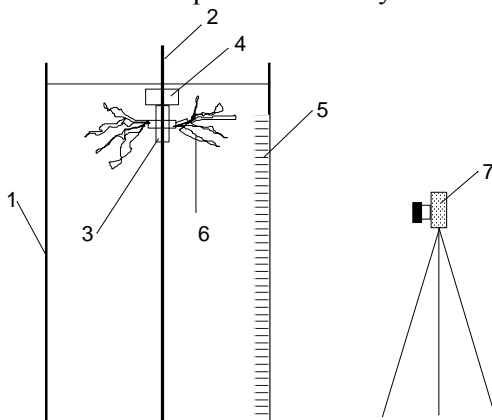


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

На схеме введены обозначения: 1 – прозрачный бассейн с водой, 2 – металлический стержень, по которому движется закрепленный в скользящей державке элемент лесного массива, 3 – скользящая державка, 4 – груз, под действием которого происходит движение ветки, 5 – мерная линейка для фиксации процесса падения, 6 – исследуемый элемент лесного массива, 7 – высокоскоростная цифровая видеокамера Citius Imagine для регистрации процесса падения.

На все элементы, находящиеся в воде действуют сила тяжести, силы сопротивления и силы Архимеда. Введем обозначения:  $m_d$  - масса исследуемого элемента,  $m$  - суммарная масса груза и державки,  $U$  - скорость

падения,  $\rho_m$  - плотность материала, из которого состоит груз,  $\rho_d$  - плотность исследуемого элемента,  $x$  - глубина погружения системы.

В связи с тем, что в движении участвует и присоединенная масса воды  $m_{np}$ , то необходим её учет в левой части уравнения движения.

Тогда движение системы при погружении описывается уравнениями (5)- (6):

$$(m + m_d + m_{np}) \frac{dU}{dt} = (m + m_d)g - F_A - F_{Am} - (\varphi_R m_d + \varphi_{Rm}) \frac{\rho_g U^2}{2}, \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = U, \quad (6)$$

где  $\varphi_R$  – коэффициент сопротивления веток массой  $m_d$ ,  $\varphi_{Rm}$  – коэффициент сопротивления груза и державки,  $F_A$  – выталкивающая сила для веток,  $F_{Am}$  – выталкивающая сила для державки,  $V$  – объем державки и груза.

Выталкивающие силы для державки и для веток определялись экспериментально путём подбора такой массы грузов, при которых сила Архимеда компенсировалась бы силой тяжести. Это условие вытекает из (2.7) если положить скорость  $U=0$  в любой момент времени. При нахождении такой массы грузов величины выталкивающих сил фиксировались и использовались при дальнейших расчетах.

Условия эксперимента позволили проводить исследования в бассейне, заполненном водой при нормальных условиях. Глубина бассейна 85 см, через каждые 5 см были отмечены деления, которые использовались для замеров времени прохождения их державкой. На первом этапе проводились исследования по определению коэффициента сопротивления  $\varphi_{Rm}$  для державки и грузов, с целью включения его в уравнение (5) и дальнейшего более точного нахождения коэффициента сопротивления веток  $\varphi_R$ . Была построена таблица значений для каждого груза, при условии, что в последующих экспериментах с ветками использовались те же самые сочетания грузов.

После определения коэффициентов сопротивления державки и грузов была проведена серия экспериментов с теми же грузами, но при наличии двух кедровых веток.

Для каждого груза проводилось по три эксперимента, и строились экспериментальные зависимости. Данные о времени прохождения отметок снимались через каждые 5 см. В результате каждого эксперимента получалось 17 измерений скорости в разном положении державки.

Было выявлено, что скорость движения державки с грузом и ветками выходит на стационарный режим движения уже при прохождении отметки

20 см, в дальнейшем падение происходит с постоянной скоростью. Данный факт позволяет не учитывать присоединенную массу воды, а, зная коэффициенты сопротивления державки и грузов, вычислять коэффициенты сопротивления веток из уравнения (5), полагая скорость постоянной и равной стационарной в тех точках, в которых она уже достигла стационарного значения. Выражение для коэффициента сопротивления в этом случае записывается в виде:

$$\varphi_R = 2 \frac{\left[ (m + m_d)g - F_A - F_{Am} \right]}{\rho_a U^2 m_d} - \frac{\varphi_{Rm}}{m_d}. \quad (7)$$

При подстановке в выражение (7) в качестве  $U$  – скорость стационарного движения державки с ветками из экспериментов находились значения для коэффициента сопротивления исследуемых веток. В качестве стационарной скорости движения использовалась средняя стационарная скорость по трем экспериментам для каждого груза.

По результатам, полученным из экспериментов для значений коэффициентов сопротивления кедровых веток, была введена вспомогательная функция  $\psi = \ln(\varphi_R)$ , для которой можно построить зависимость этого коэффициента от числа Рейнольдса. Для этого был применен метод наименьших квадратов, найдены несмещенные оценки выборочных дисперсий. При помощи критерия Колмогорова была проведена проверка нормальности распределения наблюдений, а при помощи критерия Фишера – однородности дисперсий по известным методам математической статистики. (Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.)

Для наилучшего описания экспериментальных данных использован полином пятого порядка, найдены все коэффициенты регрессии, после чего проведен дисперсионный анализ результатов оценивания, определено значение критерия значимости  $F = \frac{\sigma_R^2}{\sigma_0^2}$ , проведена проверка адекватности

построенной модели при помощи статистики  $F = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_\psi^2}$ . Проведено

доказательство адекватности и значимости полученной модели, после чего получена зависимость коэффициента сопротивления массы единицы объема кроны кедровой сосны от числа Рейнольдса:

$$\varphi_R(\text{Re}) = \exp(1,4868 - 0,0067 \cdot \text{Re} + 4,2260 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}^2 + 2,2288 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Re}^3 - 4,5611 \cdot 10^{-12} \cdot \text{Re}^4 + 1,6816 \cdot 10^{-15} \cdot \text{Re}^5) \quad (8)$$

Полученная зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальные данные, в связи с чем, рекомендуется при дальнейших расчетах применять её для моделирования сопротивления кроны кедровой сосны при движении воздушных масс в лесных массивах состоящих преимущественно из кедровой сосны при значениях числа Рейнольдса в диапазоне от 62 до 1381.

Данная методика была применена так же для исследования коэффициентов сопротивления еловых веток. Была получена следующая зависимость коэффициента сопротивления массы единицы объема кроны ели от числа Рейнольдса:

$$\varphi_R(\text{Re}) = \exp(1,0804 - 0,00058 \cdot \text{Re} - 7,1077 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}^2 + 1,0238 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Re}^3 - 5,4898 \cdot 10^{-12} \cdot \text{Re}^4 + 1,1099 \cdot 10^{-15} \cdot \text{Re}^5) \quad (9)$$

Область применимости полученной модели лежит в диапазоне чисел Рейнольдса от 53 до 935.

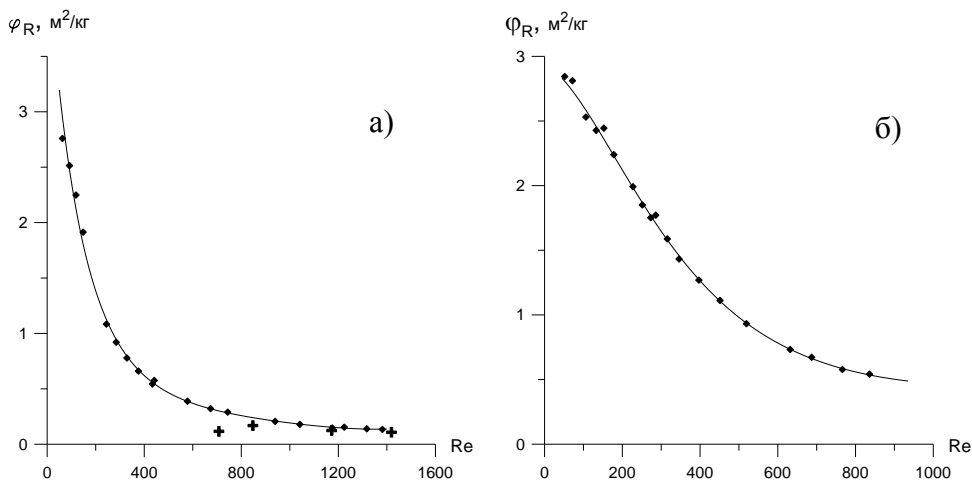


Рис. 2. Коэффициент сопротивления единицы объема кроны кедровой сосны (а) и ели (б) в зависимости от чисел Рейнольдса.

**Третья глава** посвящена моделированию движения пылевого облака в лесном массиве. В данной главе рассматривается движение газопылевого облака в трехмерном пространстве, в котором присутствует проницаемая преграда представляющая собой лесозащитную полосу. Для моделирования сил сопротивления элементов крон лесных массивов использованы результаты экспериментальных исследований, полученные во второй главе.

В §3.1 приводится математическая постановка задачи движения пылевого облака. Распространение ветра в лесном массиве описывается трехмерными уравнениями газовой динамики. Лес и его отдельные деревья моделируются пористой средой. Её влияние на движение воздуха учитывается функциями пористости  $\xi$  и силового взаимодействия  $\vec{F}$ . В предположении малой массовой концентрации пыли в воздушной среде её влиянием на движение воздушных масс пренебрегается. В этих условиях распространение порыва ветра в лесном массиве описывается нестационарными трехмерными интегральными уравнениями, которые в объеме  $\Omega$  с поверхностью  $S$  с учетом пористости записывающейся в виде (10) – (13):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \xi d\Omega + \int_S \xi \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) ds = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \xi \vec{U} d\Omega + \int_S \xi \left[ p \vec{n} + (\vec{U} \cdot \vec{n}) \rho \vec{U} \right] ds = \int_{\Omega} (-\vec{F} + p \cdot \text{grad} \xi) d\Omega, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \xi \left( e + \frac{|\vec{U}|^2}{2} \right) d\Omega + \int_S \rho \xi (\vec{U} \cdot \vec{n}) \left( e + \frac{|\vec{U}|^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) ds = 0, \quad (12)$$

$$e = \frac{p}{\rho(\kappa - 1)} \quad (13)$$

где  $t$  – время;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $e$  – внутренняя энергия;  $\vec{U}$  – вектор скорости воздуха;  $\vec{n}$  – единичная нормаль к границе  $S$ ; оператор  $(\vec{U} \cdot \vec{n})$  – проекция  $\vec{U}$  на нормаль  $\vec{n}$ ,  $\kappa$  – показатель адиабаты.

Взаимодействие воздуха с кронами деревьев моделируется формулой:

$$\vec{F} = \varphi(\text{Re}) M \frac{\rho_e U \cdot \vec{U}}{2} \quad (14)$$

где  $M$  – масса кроны в единице объема,  $\varphi(\text{Re})$  – коэффициент сопротивления крон, найденный из экспериментальных исследований, описанных во второй главе.

Важными геометрическими параметрами, влияющими на аэродинамику дерева, являются: высота дерева, высота и диаметр его кроны, средний диаметр ствола, среднее количество и диаметр ветвей дерева, форма кроны. В математической трехмерной модели форма кроны принималась осесимметричной. Для елей и кедров эта форма была взята в виде конуса.

Дерево моделируется пористой структурой, состоящей из двух объемов. Один объем представляет собой круговой конус высоты  $h$  с радиусом

основания  $R$ . Основание конуса располагается на высоте  $H-h$ , где  $H$  – высота ели. Так как в модели вязкость влияет на течение только через силы сопротивления с пористой структурой, то для учета силы сопротивления ствола он также предполагался пористым. При этом параметры пористости ствола подбирались таким образом, чтобы возникающая сила сопротивления равнялась экспериментальной силе сопротивления цилиндра с диаметром, равным среднему диаметру ствола.

Исходя из данных по массовым и геометрическим характеристикам, описанным в §1.3, найдены значения масс крон в единице объема. Так для ели найдено, что в одном кубическом метре содержится 0,542 кг хвои и ветвей. Для кедра аналогичное значение равно 0,494 кг.

В качестве математической модели для описания пылевого облака принимается модель сплошной среды, состоящей из частиц пыли. При этом учитываются силы, действующие на частицы со стороны воздуха, а так же размер частиц пыли и изменение количества движения частиц при столкновениях с элементами деревьев. Предполагается, что в таких столкновениях на деревьях выпадает масса пыли, пропорциональная поверхности этих элементов, пылевому потоку на них и некоторому коэффициенту захвата частиц  $K_p$ , который может изменяться от нуля до единицы. Одновременно полагается, что при столкновениях с элементами лесного массива частицы полностью теряют свое количество движения.

В указанных допущениях интегральные уравнения сохранения массы и количества движения пылевого облака имеют вид (15) – (16):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \xi \rho_s d\Omega + \int_{\Omega} \xi \rho_s (\vec{U}_s \cdot \vec{n}) ds = - \int_{\Omega} K_p (1 - \xi) \rho_s |\vec{U}_s| d\Omega, \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho_s \xi \vec{U}_s d\Omega + \int_s \xi (\vec{U}_s \cdot \vec{n}) \rho_s \vec{U}_s ds = \quad (16)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\rho_s}{m_s} \vec{f}_s d\Omega - \int_{\Omega} (1 - \xi) \rho_s |\vec{U}_s| \vec{U}_s d\Omega - \int_{\Omega} \rho_s \vec{g} \xi d\Omega,$$

где  $\rho_s$  – плотность пылевого облака,  $\vec{U}_s$  – вектор скорости частиц,  $m_s$  – масса одной частицы,  $\vec{f}_s = S_m C_R (\vec{U} - \vec{U}_s)$  – сила, с которой воздух действует на частицу,  $S_m$  – площадь Миделя частицы,  $C_R$  – коэффициент сопротивления,  $\vec{g}$  – ускорение силы тяжести,  $K_p$  – коэффициент осаждения частиц на кронах.

Коэффициент сопротивления  $C_R$  определяет силу взаимодействия частиц с потоком воздуха и находится по формуле:

$$C_R = \frac{24}{Re} (1 + 0,197 Re^{0,63} + 2,6 \cdot 10^{-4} Re^{1,38}) \quad (17)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса.

Решение систем интегральных уравнений проводится методом конечных объемов. Расчетная область представляется фиксированным набором равных конечных объемов не пересекающихся между собой так, что каждый узел расчетной сетки содержится в одном объеме. Значения компонент скорости движения газа, а так же параметры газа на гранях конечных объемов определяются с использованием распада разрыва. Для нахождения значений параметров газа в узлах сетки используется конечно-разностная схема второго порядка.

Для решения уравнений движения частиц пыли (15)-(16) так же применяется метод конечных объемов. На гранях используется противопоточная форма записи разностей скоростей.

В качестве начальных условий для параметров газа использовались нормальные условия в условиях отсутствия ветра:

$$\begin{aligned} p|_{t=0} &= 10^5 \text{ Па}; \quad \rho|_{t=0} = 1,29 \text{ кг} / \text{м}^3; \\ U|_{t=0} &= 0 \text{ м} / \text{с}; \quad V|_{t=0} = 0 \text{ м} / \text{с}; \quad W|_{t=0} = 0 \text{ м} / \text{с}. \end{aligned} \quad (18)$$

Пылевое облако с начальной скоростью, равной нулю, занимает объем от левой границы расчетной области на протяжении 20 метров, по высоте – от земли до высоты в 20 метров, и по всей ширине расчетной области. Начальные условия для пылевого облака записывались в виде:

$$\begin{aligned} \rho_s|_{t=0} &= 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{м}^3, \text{ в области пылевого облака}; \\ U_s|_{t=0} &= 0 \text{ м} / \text{с}; \quad V_s|_{t=0} = 0 \text{ м} / \text{с}; \quad W_s|_{t=0} = 0 \text{ м} / \text{с}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для решения уравнений газовой фазы принимались следующие граничные условия. В начальный момент времени на левой границе расчетной области начинает действовать порыв ветра скоростью 10 м/с, который вызывает движение частиц пыли. На плоскостях симметрии и нижней границе задаются условия непротекания, через верхнюю и правую границы газ проникает свободно (3.13).

$$\begin{aligned} U|_{x=0} &= U_0, \quad V|_{x=0} = 0, \quad W|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x}|_{x=X} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial x}|_{x=X} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial x}|_{x=X} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial y}|_{y=0} &= 0, \quad V|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial y}|_{y=Y} = 0, \quad V|_{y=Y} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}|_{y=Y} = 0; \\ U|_{z=0} &= 0, \quad V|_{z=0} = 0, \quad W|_{z=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial z}|_{z=Z} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial z}|_{z=Z} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z}|_{z=Z} = 0; \end{aligned} \quad (20)$$

В качестве граничных условий для частиц пыли (3.13) на левой границе расчётной области задаётся скорость  $U_0=10$  м/с, действующая на протяжении всего расчёта с момента его начала и начальная скорость

оседания частиц  $W_0$ , обусловленная действующей на частицы силой тяжести. На плоскостях симметрии задавалось условие непротекания. Через правую границу ( $x=X$ ), а так же через верхнюю границу расчётной области частицы могут свободно проникать без изменения скорости.

Частицы, достигшие нижней границы расчетной области, считаются осевшими и в дальнейшем движении пылевого облака не участвуют.

$$U_s|_{x=0} = U_0, V_s|_{x=0} = 0, W_s|_{x=0} = W_0; \quad \frac{\partial U_s}{\partial x}\bigg|_{x=X} = 0, \frac{\partial V_s}{\partial x}\bigg|_{x=X} = 0, \frac{\partial W_s}{\partial x}\bigg|_{x=X} = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial y}\bigg|_{y=0} = 0, V_s|_{y=0} = 0, \frac{\partial W_s}{\partial y}\bigg|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial U_s}{\partial y}\bigg|_{y=Y} = 0, V_s|_{y=Y} = 0, \frac{\partial W_s}{\partial y}\bigg|_{y=Y} = 0;$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial z}\bigg|_{z=Z} = 0, \frac{\partial V_s}{\partial z}\bigg|_{z=Z} = 0, \frac{\partial W_s}{\partial z}\bigg|_{z=Z} = 0;$$

Лесозащитная полоса представляется набором деревьев равной высоты, с конической формой кроны, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга с различными вариантами посадки деревьев (рядовая посадка, шахматная посадка, рядовая посадка с подлеском из кустарников и мелких деревьев, шахматная посадка с подлеском).

В §3.3 приводится анализ результатов моделирования.

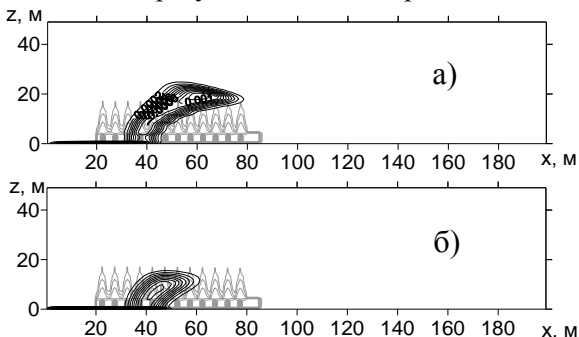


Рис. 3. Распределение массы частиц в срединном сечении лесополосы с рядовой посадкой деревьев и подлеском в момент времени  $t = 5$  секунд; а) частицы размером 0,1 мм, б) частицы размером 0,5 мм.

На рис. 3 изображено распределение массы частиц в срединном сечении лесополосы с рядовой посадкой деревьев и подлеском в моменты времени 5 секунд с момента начала порыва ветра. Следует отметить, что практически отсутствует движение частиц под кронами деревьев. Крупные частицы проникают в область подлеска и крон деревьев, теряют свою скорость и оседают либо на землю, либо на кронах деревьев. При этом наибольшая



часть задерживаемых частиц приходится на первые три дерева рассматриваемого участка лесополосы. Дальше по лесополосе частицы проникают уже в меньшей степени, и только мелкие частицы (0,1 мм) могут оказаться в дальних зонах лесополосы с подлеском в связи с тем, что поднимаются над ней и оседают сверху.

На рис 4 представлено распределение массы мелких частиц в еловой лесополосе с прямой посадкой из 12 деревьев с подлеском и без подлеска в момент времени 10 секунд с начала движения пылевого облака. На рисунке хорошо видно, что нижняя часть пылевого облака при отсутствии подлеска свободно проникает вдоль направления движения ветра, т.е. пространство под деревьями фактически «продувается». В то же время наличие подлеска практически предотвращает проникновение частиц нижней части пылевого облака в зону за лесополосой. Так же отметим наличие доли частиц, пролетевшей над лесозащитной полосой и продолжающей движение в области за последним деревом. Однако, в этой области распределение продольной компоненты скорости значительно ниже, нежели в левой части расчетной области, что ведет к фактически медленному осаждению пылевых частиц на поверхность земли.

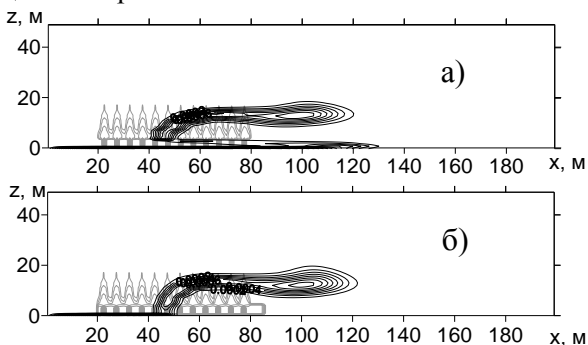


Рис. 4 Распределение массы частиц размером 0,1 мм в момент времени  $t = 10$  сек в срединном сечении еловой лесополосы с рядовой посадкой деревьев а) без подлеска; б) с подлеском

На рис. 5 приведено распределение осевших на землю частиц по длине расчетной области с рядовой посадкой деревьев без подлеска и с шахматной посадкой деревьев без подлеска. Можно заметить, что большая часть частиц с размерами 0,3 мм; 0,4 мм; 0,5 мм оседает в самом начале расчетной области, и максимум осевшей массы частиц достигается в зоне, где начинается проникновение пылевого облака в область первого дерева. Здесь оседает большая часть частиц с относительно крупными размерами. Частицы же с размерами 0,1 мм и 0,2 мм наоборот оседают во второй части

моделируемой области, что обуславливается их меньшим размером и, как следствие, возможностью пролететь большее расстояние вблизи поверхности земли, там, где нет крон, облетая стволы деревьев.

Характер зависимостей для разных вариантов посадок деревьев схож и отличия незначительны. Стоит отметить некоторый зубчатый характер зависимостей в области от 20 метров до 80 метров. Это обуславливается наличием стволов деревьев в тех зонах, где наблюдается провал значения массы осевших частиц. Поскольку на рисунке представлена интегральная характеристика, масса осевших частиц по ширине моделируемой области, а частицы процессе распространения облетают стволы деревьев, не проникая внутрь их, то в сечениях совпадающих со стволами деревьев наблюдается резкое падение значения массы. С этим же фактом связаны небольшие пики перед стволами деревьев и наоборот уменьшение массы частиц после стволов, некоторая доля частиц не облетает стволы деревьев, а задерживается перед ними.

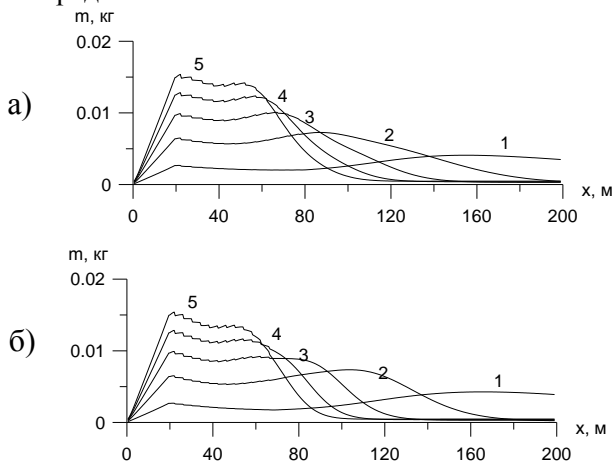


Рис. 5. Распределение осевших на землю частиц по длине расчетной области

а) – с рядовой посадкой деревьев без подлеска

б) – с шахматной посадкой деревьев без подлеска

(1 –  $d_s=0,1$  мм; 2 –  $d_s=0,2$  мм; 3 –  $d_s=0,3$  мм; 4 –  $d_s=0,4$  мм; 5 –  $d_s=0,5$  мм)

Несколько другая картина наблюдается на рис. 6, на которых представлены распределения осевших на землю частиц в лесополосах с подлеском, соответственно, с рядовой посадкой деревьев и с шахматной посадкой деревьев. С целью не загромождать рисунки и схожестью зависимостей для мелких частиц (0,1 мм и 0,2 мм) и для крупных частиц

(0,3 мм; 0,4 мм; 0,5 мм) здесь выделены зависимости только для частиц 0,1 мм и 0,5 мм.

Стоит отметить, что при наличии подлеска, как было показано выше, нижняя часть пылевого облака не пролетает достаточно далеко по лесополосе, а задерживается в области первых деревьев.

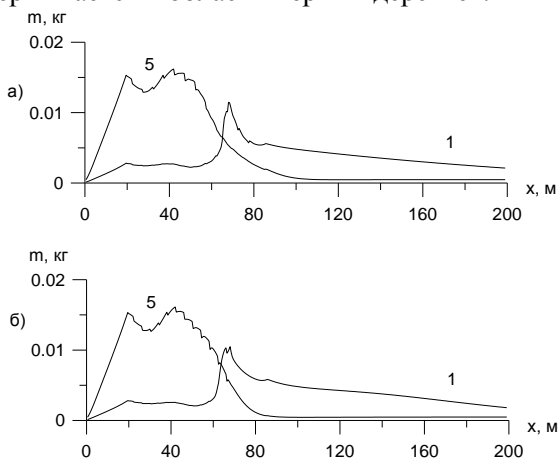


Рис. 6. Распределение осевших на землю частиц по длине расчетной области

- а) – с рядовой посадкой деревьев и подлеском  
б) – с шахматной посадкой деревьев и подлеском  
(1 –  $d_s=0,1$  мм; 2 –  $d_s=0,5$  мм)

Поскольку одной из основных характеристик лесозащитной полосы является массовая доля частиц, преодолевающих преграду в виде лесополосы, то в данном исследовании проведено сравнение массовой доли частиц достигающих правой границы расчетной области при различных вариантах расположения лесополос.

Выявлено, что наибольшей эффективностью в плане снижения доли частиц, достигающих конца расчетной области, обладает лесозащитная полоса с шахматной рассадкой деревьев, которая по сравнению с лесозащитной полосой с рядовой рассадкой позволяет уменьшить долю мелких частиц преодолевающих лесополосу на 10%. Наличие подлеска при разных вариантах посадки деревьев снижает долю пролетающих частиц мелкого размера на 20%, крупных - на 1,5%. Наличие лесополосы даже с менее густой рассадкой деревьев (рядовая рассадка) снижает долю пролетающих частиц размером 0,1 мм на 15% и почти не задерживает частицы более крупного размера. При этом, стоит отметить, что наилучшую

эффективность лесозащитная полоса имеет при защите от мелкой пыли (размером 0,1 мм).

**В четвертой главе** рассматривается движение газопылевого облака с учетом турбулентной вязкости в приближении пограничного слоя.

Турбулентная вязкость рассчитывалась с помощью известной однопараметрической модели А.Н. Секундова. Особенности её применения в лесных массивах учитывались с помощью введения длины перемешивания, учитывающей влияние лесных насаждений.

В качестве параметра пути смешения использована модель из (Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунич С.В. Турбулентность в растительном покрове. / Л.: Гидрометеиздат, 1982, 184 с):

$$L = \frac{\kappa z}{1 + 2,5z \sqrt{\frac{c_d s}{h}}} \quad (22)$$

где  $c_d = 0,03$ ,  $s$  – удельная плотность поверхности, характеризующая площадь поверхности элементов растительности, приходящуюся на единицу объема,  $h$  – высота растительности.

В §1.2 описаны данные по отдельным видам растительных покровов и сравнение их с результатами расчетов вертикальных профилей средней скорости ветра в лесу и над лесом, согласно которым расчеты по этой модели пути смешения приводят к наиболее близкому совпадению расчетных данных по двумерной модели с экспериментальными. В связи с этим, при трехмерном моделировании воздушных потоков в пространстве с проницаемой преградой и пограничным слоем была использована именно эта модель пути смешения.

С учетом сил сопротивления деревьев лесного массива и наличия вязкости в 4 главе решалась система уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{F}{\rho} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\varepsilon + \nu) \frac{\partial U}{\partial z} \right], \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{F}{\rho}, \\ \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{F}{\rho}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (23)$$

в которой силы вязкости учитывались в погранслоном приближении.

При моделировании рассматривалась прямоугольная область с расстояниями по трем направлениям  $X, Y, Z$ , шагом по пространству  $dx, dy, dz$ .

Начало координат поместим в левый ( $x=0$ ) нижний ( $y=0$ ) ближний ( $z=0$ ) угол. Граничные условия с учетом симметрии насаждений записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 U|_{x=0} = U_0(z), \quad V|_{x=0} = 0, \quad W|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0; \\
 \frac{\partial U}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0, \quad V|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial y}\Big|_{y=Y} = 0, \quad V|_{y=Y} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=Y} = 0; \\
 U|_{z=0} = 0, \quad V|_{z=0} = 0, \quad W|_{z=0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0;
 \end{aligned} \tag{24}$$

В качестве начальных условий предполагалось равномерное распределение нормального давления и плотности по всему объему  $P|_{t=0} = 10^5$  Па, начальная плотность воздуха  $\rho|_{t=0} = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>. Начальные профили  $U_0(z)$  на левой границе задавались по опытными данным для развитого турбулентного пограничного слоя в атмосфере. Профиль скоростей  $U_0(z)$  подбирался таким образом, чтобы в области над лесным массивом скорость была равна 10 м/с, а на высоте деревьев и ниже профиль соответствовал опытными данным.

Для турбулентной вязкости граничные условия записываются в следующем виде:

$$\varepsilon|_{x=0} = \varepsilon_0(z), \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\Big|_{y=Y} = 0; \quad \varepsilon|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0; \tag{25}$$

В качестве начальных профилей  $\varepsilon_0(z)$  задавались профили, полученные по опытными данным на основе обобщения экспериментальных данных о турбулентном пограничном слое в атмосфере.

В §4.2 приводятся результаты моделирования. Как и в третьей главе, лесной массив моделировался набором деревьев с четырьмя вариантами посадки: рядовая посадка без подлеска, при которой деревья располагаются строго друг за другом через одинаковые интервалы; шахматная без подлеска, при которой деревья располагаются более плотно, соответственно просвет под кронами деревьев гораздо меньше, чем в рядовой посадке; рядовая посадка с подлеском, при которой появляется подлесок из кустов и мелких деревьев, но основные деревья располагаются друг за другом; шахматная посадка с подлеском – наиболее соответствующий реальному распределению деревьев в лесозащитных полосах.

В ходе вычислительных экспериментов исследовалось распределение скорости воздушных потоков, проходящих через проницаемую преграду в виде лесного массива с учетом добавления к уравнениям вязкого члена.

Исследовалось влияние учёта пограничного на движение пылевых частиц различных размеров (от 0,1 мм до 0,5 мм).

В качестве характеристики, по которой будем оценивать полученные профили скорости, а так же сравнивать их с экспериментальными данными возьмем безразмерную высоту, как высоту  $z$ , отнесенную к высоте деревьев  $h$ , а так же безразмерную скорость, как скорость воздушного потока  $U$ , отнесённую к скорости воздушного потока на высоте макушек деревьев  $U_h$ .

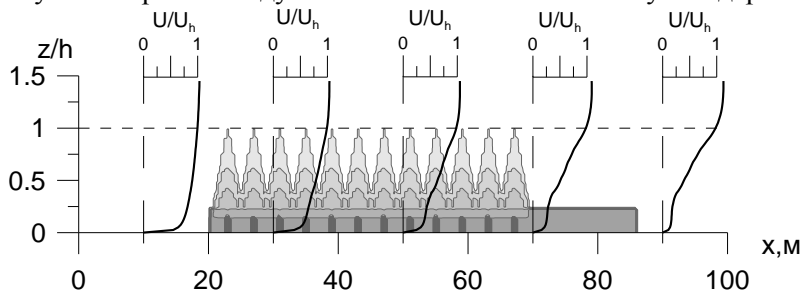


Рис. 7. Расчетная область с набором модельных деревьев и подлеском, профили безразмерной скорости в зависимости от безразмерной высоты, полученные в результате моделирования в разных сечениях.

Как можно увидеть на рисунке на профиль скорости в значительной степени влияет сила сопротивления крон деревьев, при прохождении через лесной массив, а так же наличие подлеска. Это влияние было рассмотрено ранее в третьей главе. Однако, на этом рисунке хорошо заметно снижение скорости в приземной области за подлеском, обусловленное учетом вязкого члена в уравнении движения. Скорость снижается, и профиль скорости в приземной области во всех рассмотренных случаях несколько сглаживается, что так же обуславливается вязким членом уравнения.

Данный профиль скорости достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными (Gayev Ye., Savory E., Toy N., Wind tunnel investigations of a complex canopy shear flow, Int. J. of Fluid Mech. Research., 2001, v.28, No.4, p.484-495.), описанными в первой главе.

В случае лесополосы без подлеска, распределение профилей скорости будет несколько отличаться, в связи с наличием свободной зоны между поверхностью земли и нижней частью крон. На рис. 8 представлено данное распределение профилей продольной скорости. Сплошной линией для каждого профиля отмечены профили скорости, полученные с учетом турбулентного пограничного слоя, пунктирной – без учета турбулентного пограничного слоя.

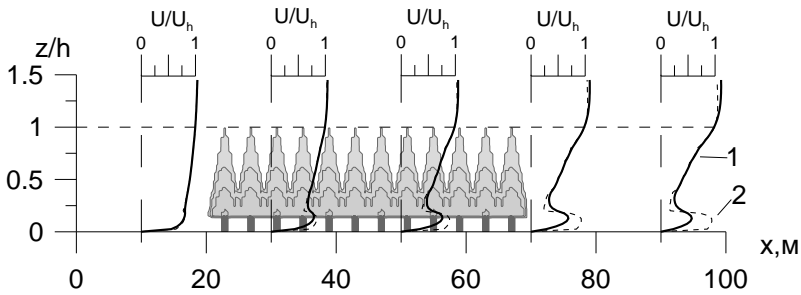


Рис. 8. Расчетная область с набором модельных деревьев без подлеска и профили безразмерной скорости, полученные в результате моделирования в разных сечениях. (1 – с учетом турбулентного пограничного слоя, 2 – без учета турбулентного пограничного слоя)

На данном рисунке так же хорошо видно влияние силы сопротивления крон деревьев, и более отчетливо заметно влияние вязкого члена в уравнении движения. В приземной части профиль скорости значительно сглажен, а продольная скорость в этой области снижается за счет турбулентного перемешивания.

Как можно заметить, в верхней части деревьев сплошная и пунктирная линии практически сливаются, что говорит о более сильном влиянии коэффициента сопротивления крон деревьев на задерживающую способность лесных массивов. В приземной же области, наибольшую роль как раз играет пограничный слой, и скорость снижается за счет вязкости при турбулентном перемешивании воздуха.

Так же несколько изменилась картина распределения осевших частиц на земле. Значительно увеличилась доля мелких частиц (размером 0,1 мм и 0,2 мм) оседающих в зоне сразу за лесополосой. Это связано со снижением скорости за счет турбулентного перемешивания в области нижнего пылевого облака. Доля же крупных частиц, оседающих на поверхности земли, изменилась очень мало, как и их распределение по лесополосе.

В результате работ, описанных в настоящей главе можно заключить, что благодаря внесению в модель коэффициента турбулентной вязкости, изменился профиль скорости ветра, скорректировалось значение скорости в приземной области.

Результаты моделирования сравнены с экспериментальными данными, выявлено хорошее совпадение результатов. Влияние пограничного слоя рассмотрено на примере распределения оседающих на поверхность земли частиц, выявлено изменение этого распределения.

**Пятая глава** посвящена моделированию распространения сильных акустических волн в лесных массивах. В последнее время активно происходит утилизация старых боеприпасов с истекшим сроком хранения, оставшихся со времен Советского Союза и снятых с вооружения. Нередко подрыв «отслуживших» свой срок боеприпасов производится вблизи населенной территории, что значительно влияет на здоровье жителей и наносит вред жилым и промышленным постройкам. Действенным способом по снижению такого влияния процессов утилизации боеприпасов на жилые постройки может быть размещение полигонов в лесном массиве или обустройство действующих полигонов специальными системами лесозащитных полос.

Распространение сильных акустических волн в лесных массивах моделируется системой уравнений газовой динамики. В условиях неоднородного распределения элементов лесных массивов распространение воздушной волны и течение газа, вызванное волной, имеет существенно пространственный характер.

В качестве начальных условий при решении уравнений (10)-(13) использовалась модель мгновенного взрыва, параметры которого подбирались с целью получения волны заданной формы и заданной интенсивности. Таким образом, в каждой точке  $N$  рассматриваемой области задавались начальные значения:

$$p(N,0) = \begin{cases} P_b & N \in G_b, \\ P_0 & N \in G_b^c, \end{cases} \quad (26)$$

$$\rho(N,0) = \begin{cases} \rho_b & N \in G_b, \\ \rho_0 & N \in G_b^c, \end{cases}$$

$$U(N,0) = 0; \quad V(N,0) = 0; \quad W(N,0) = 0$$

где  $G_b$  - область мгновенного взрыва;

$P_b, \rho_b$  - давление и плотность в области взрыва;

$P_0, \rho_0$  - давление и плотность атмосферы.

При расчетах волн взрыва на границах области ставились условия непротекания. При исследовании обтекания отдельных деревьев создавался поток с заданной скоростью. В этом случае на части границы, через которую поток втекал в расчетную область, задавались скорость и энтропия. На границе истечения потока из области задавалось давление.

Для расчетов на участке длиной 10 м формировалась плоская ударная волна с интенсивностью  $\Delta P = 150000 \text{ Па}$ .



На рисунке 9 приведены результаты расчетов давления в ударной волне вдоль линии, проходящей через центры елей на высоте 8 м в различные моменты времени. В конце расчета ударная волна прошла расстояние 720 м. Ее интенсивность уменьшалась до  $\Delta P = 1100 \text{ Па}$ .

Из анализа рис. 9 следует обратить внимание на появление в лесу волн разрежения, отсутствующих в расчетах без учета леса.

Большое затухание ударных волн в приведенных расчетах, по-видимому, можно объяснить малой энергией рассчитываемых ударных волн, которая быстро диссипируется при прохождении лесных массивов. Для более сильных ударных волн следует ожидать меньшего коэффициента затухания.

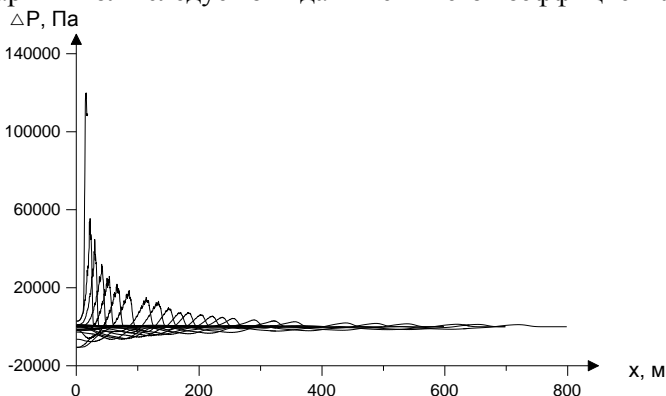


Рис. 9. Затухание ударной волны при прохождении лесного массива вдоль линии, проходящей через кроны елей.

Проведены расчеты распространения плоской воздушной ударной волны вдоль поверхности земли, на которой имеется лесозащитная полоса с высотой деревьев 14 метров, крона которых начинается на высоте 4 метра от земли. Предполагается, что деревья расположены плотными рядами в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, с рядовой посадкой деревьев. Между рядами деревьев в нижней части кроны имеется расстояние равное 0,5 метра. Выявлено, что в области кроны давление ниже, чем в ударной волне, распространяющейся над лесным массивом, однако волна сжатия в области кроны несколько длиннее, чем в свободном пространстве. Скорость газа в кроне меньше, чем в свободном пространстве над лесом, при этом в начале волны сжатия, распространяющейся в свободном пространстве, идет втекание газа в область кроны, а позади – истечение

В результате работ по настоящей главе оценено влияние лесозащитных полос на распространение ударных волн в пространстве. Выявлено, что наличие массива растительности на пути плоской ударной волны значительно снижает её интенсивность. В результате проведенных расчетов может быть рекомендовано использовать при утилизации боеприпасов районы, защищенные лесными массивами.

**В заключении** сформулированы основные научные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. На основе разработанной экспериментальной методики определения коэффициентов сопротивления крон деревьев получены зависимости коэффициентов сопротивления единицы массы кроны ели и кедровой сосны в зависимости от чисел Рейнольдса в диапазонах от 62 до 1381 для ели и от 53 до 935 для кедровой сосны. Показано, что для хвойных деревьев при больших скоростях наблюдается эффект «складывания» элементов крон, и коэффициент сопротивления крон стремится к коэффициенту сопротивления ветвей без хвои.
2. Построена трехмерная математическая модель движения воздушных масс с частицами различных размеров в пространстве с проницаемыми лесозащитными полосами различной конфигурации, массовыми и геометрическими характеристиками. При моделировании использованы собственные экспериментальные данные для оценки сил сопротивления крон деревьев.
3. Получены результаты движения пылевого облака в области с лесозащитной полосой. Оценены пылезадерживающие способности различных конфигураций лесных полос. Выявлено, что наибольшей эффективностью в плане снижения доли частиц, достигающих конца расчетной области, обладает лесозащитная полоса с шахматной рассадкой деревьев. Наличие подлеска при разных вариантах посадки деревьев снижает долю пролетающих частиц мелкого размера на 20%, крупных - на 1,5%.
4. Решена трехмерная задача моделирования распространения пылевого облака с учетом вязких сил, записанных в приближении пограничного слоя в лесной полосе. Выявлено, что в приземной области в лесозащитной полосе скорость ветра снижается за счет появления вязкого члена в уравнениях движения. Получены безразмерные профили скорости ветра в различных сечениях лесозащитной полосы. Результаты расчетов совпадают с известными ранее экспериментальными данными.

5. Выявлено, что в случае лесополосы с шахматной и рядовой посадками без подлеска значительное оседание мелких частиц (размером 0,1 и 0,2 мм) в зоне сразу за лесополосой связано со снижением скорости за счет вязких сил в области нижней части пылевого облака. Этим может объясняться известное явление, когда возле существующих лесных полос наблюдаются песчаные и снежные заносы.
6. С помощью построенной математической модели получены результаты по распространению сильных акустических волн в лесозащитных полосах. Показано, что наличие лесозащитных полос значительно снижает амплитуду этих волн. Рекомендовано использовать при утилизации боеприпасов районы, защищенные лесными массивами

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Орлов С.А. Распространение пылевого облака в лесных массивах различной формы // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – Томск, 2010 - №3 – С. 107-119**

**2. Орлов С.А., Шрагер Л.А. Исследование коэффициента сопротивления элементов кроны кедровой сосны. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – Томск, 2011 - №2 – С.103-110.**

3. Орлов С.А., Васенин И.М. Математическое моделирование распространения пылевого облака в лесном массиве // Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск: ТМЛ-Пресс, 2009 – с.345-347

4. Орлов С.А., Васенин И.М. Расчет распространения порыва ветра в лесном массиве, состоящем из отдельных деревьев // Сборник материалов IV Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск: ТМЛ-Пресс, 2008 – с.254-255

5. Орлов С.А., Васенин И.М. Влияние лесных насаждений на процесс распространения пылевого облака // Сборник материалов VI Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск: ТМЛ-Пресс, 2010 – с.185-188

