

*М.Г. Лебедев, В.В. Ситник*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С МАССИВОМ РАСТИТЕЛЬНОСТИ\***

### **1 Введение**

При решении многих практических проблем приходится иметь дело с исследованием процесса взаимодействия волновых (акустических, взрывных, ударных) фронтов с различного рода препятствиями. В последнее время возрос интерес к растительным массивам в качестве таких препятствий. Рассматриваемая проблема актуальна в таких областях как климатическое моделирование, моделирование лесных пожаров, прикладная биология.

Большое практическое значение имеют задачи защиты от техногенного шума. Исследуется вопрос о способах снижения шума посредством высадки полос деревьев вдоль крупных автомагистралей и железных дорог. Существовавший несколько последних лет крупный европейский проект EURONOISE привел к созданию нового европейского стандарта в экологии шума. В рамках проекта исследовалась проблема распространения звука через лесные массивы с учетом метеорологических условий [1, 2].

Еще одно интересное приложение связано с изучением аспектов падения Тунгусского тела, которое продолжает привлекать внимание исследователей (см., например, [3]). В этом случае воздействие ударной волны на лесной массив, привело к вывалу леса на достаточно большой площади.

С течением времени изменения претерпевали как подходы к моделированию процесса взаимодействия волновых фронтов возмущений с препятствиями, так и сами модели растительных массивов. Методы теоретического моделирования этого процесса можно разделить на три основные группы.

### **2 Геометрическая акустика и простые модели растительных массивов**

Первая группа методов основана на идеях геометрической акустики, предложенных еще в 50-е годы XX века Дж. Келлером [4]. Наряду с падающими и отраженными лучами, рассматриваемыми в классической

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 01-01-00116).

геометрической акустике, он ввел в рассмотрение понятие дифрагированных лучей, соотношения на которых получены посредством асимптотической оценки точных решений задач дифракции на препятствиях простой формы. На основе данного подхода изучалась проблема взаимодействия акустических волн с барьерами различной толщины [5]. Позже появилась более сложная геометрическая теория дифракции акустического сигнала на препятствии клинообразной либо трапециевидной формы [6]. Экспериментальное тестирование этих теорий было проведено на полигоне Salisbury Plain Министерства обороны Великобритании; его результаты описаны в [7]. Основное преимущество геометрических теорий дифракции состоит в том, что они дают возможность рассчитать характеристики дифрагированного сигнала на основании относительно простых формул. Главные недостатки этих методов — невысокая точность и применимость лишь к относительно простым ситуациям. Затруднительными представляются попытки учитывать ветер в атмосфере или попытки исследовать дифракцию звука на препятствиях сложной формы и конечных размеров, а также препятствий, частично пропускающих звук.

Одной из первых публикаций в области лесной акустики, появившихся в этот период, можно считать [8]. В этой работе описаны результаты нескольких месяцев полевой работы в джунглях Панамы. Исследования касались в основном таких аспектов, как определение потерь при передаче акустических сигналов через джунгли, выяснение спектральных характеристик фонового лесного шума, оценка ошибок определения местоположения источника сигнала. В работе обсуждается модель рассеивания акустической энергии в растительности на основе подхода классической геометрической акустики, приводятся полуэмпирические законы затухания сигналов при распространении в массивах растительности различной густоты, собран материал о влиянии погодных условий на процесс распространения сигнала. В последующих работах, например [9], описываются результаты дальнейших практических исследований в этой области. Там же отмечены аномалии в характере затухания акустических сигналов и ставится вопрос о причинах абсорбции звука при прохождении через растительность.

Две другие группы методов используют численное моделирование изучаемых процессов, причем можно выделить моделирование на основе волнового (линейного) уравнения и моделирование на основе полных (нелинейных) уравнений газовой динамики — уравнений Эйлера или Навье-Стокса [10].

### 3 Моделирование на основе волнового уравнения, развитие моделей лесных массивов

До недавнего времени основным инструментом при решении многих задач акустики выступало волновое уравнение. Оно получается линеаризацией уравнений Эйлера, описывающих течение сжимаемой среды, в предположении малости акустических возмущений по сравнению с параметрами невозмущенной среды. На основе волнового уравнения решались задачи распространения акустических волн в расслоенной атмосфере при наличии ветра над импедансной подстилающей поверхностью и дифракции на экранах различных форм [11]. Однако в последнее время при решении сложных задач использование данного подхода не дает ощутимых преимуществ по многим показателям по сравнению с подходом, основанным на использовании точных уравнений газовой динамики.

Для данного подхода при имитации растительных массивов характерно использование моделей дифракции звука на случайно расположенных рассеивателях и периодических решетках. На этом этапе характерно использование комбинированного подхода к моделированию рассеивания звука в растительных массивах с выделением рефракции сигнала на стволах растений и кроне и учетом влияния подстилающей поверхности.

В работе [12], использующей данный подход, особый упор делается на исследование спектральных характеристик прохождения сигнала сквозь растительность. Строится трехуровневая модель растительного массива, в которой уделяется внимание импедансным характеристикам подстилающей поверхности, особо учитывается влияние опавшей листвы, а сами деревья представлены в виде периодического массива рассеивателей цилиндрической формы с конечным импедансом. При рассмотрении импедансных характеристик подстилающей поверхности также используются некоторые эмпирические предположения, что было вызвано необходимостью уменьшить большое число параметров модели.

Благодаря сложной структуре этой и аналогичных моделей, отчасти удалось решить имевшиеся проблемы. Однако в силу ряда ограничений, как это отмечено в [13], данные модели растительных массивов подходят для расчетов прохождения сигнала через крону, однако плохо соотносятся с результатами наблюдений при моделировании прохождения сигнала над поверхностью леса или вблизи его полога. Кроме того, в рамках этих моделей весьма сложно учитывать рельеф местности и погодные изменения при долгосрочных прогнозах.

Одной из работ, послужившей поводом для создания более сложных и полных моделей, стала статья [14]. В статье, основываясь на лабораторных измерениях, предложено несколько иное объяснение механизма поглощения акустической энергии при прохождении сигнала через растительность. Отмечается, что следует принимать во внимание не только

рассеивание сигнала, но также учитывать резонансные характеристики стволов, веток и иголок и принимать во внимание термовязкую абсорбцию звука слоем воздуха вокруг иголок.

#### **4 Моделирование на основе уравнений Эйлера, турбулентные модели растительности**

В настоящее время для решения задач акустики активно используются методы газовой динамики. Они применяются для задач, когда использование волнового уравнения невозможно из-за значительных изменений параметров среды, например, при решении задач, связанных с распространением возмущений большой интенсивности. Помимо этого, использование данного подхода позволяет исследовать более подробные модели с учетом климатических условий и рельефа местности. За полную модель приходится платить большей вычислительной сложностью и значительными объемами результатов расчетов. Но, особенно, в последнее время по мере возрастания мощности и доступности вычислительной техники и появления развитых средств наглядного представления информации, значение указанных отрицательных факторов уже не так существенно.

Примером использования этого подхода может служить работа [10], в которой рассмотрено распространение плоского акустического импульса над акустически жесткой подстилающей поверхностью и его взаимодействие с препятствием в виде прямоугольного барьера, перед которым мог располагаться прямоугольный ров. Нестационарная система уравнений Эйлера решалась методом Маккормака; полученный результат хорошо согласуется с экспериментальными данными. Другими примерами данного подхода могут служить работы [1, 13]. Достаточно просто обобщить модель на случай двумерных препятствий различной формы, учесть влияние рельефа местности и погодных условий.

Первоначально строились достаточно подробные турбулентные модели, учитывающие изменения ветра и температуры внутри кроны деревьев. Например, в [13] используется одномерная стационарная турбулентная модель второго порядка точности, замкнутая рядом дополнительных уравнений.

Поскольку сложные модели требуют знания большого числа характеристик, естественным шагом стало упрощение моделей. В частности, в [15] на основе обработки экспериментальных данных, путем введения некоторых параметров растительных массивов, таких как удельная плотность поверхности растительности и коэффициент аэродинамического сопротивления, осуществляется переход от турбулентной модели к системе уравнений Эйлера с введенными массовыми силами в объеме, занимаемом лесом. На основе этой модели там же в [15] строятся профили

ветра внутри и над растительным массивом, а в [16] осуществляется расчет прохождения облака поллотантов через лесной массив. Результаты работы [15] использованы при моделировании лесных пожаров в [17] и позже при исследовании накопления поллотантов растительным массивом. Результаты расчетов по этой модели неплохо согласуются с наблюдениями; именно эта модель выбрана в качестве основной для проведения наших исследований.

Аналогичные модели используются в работах [1, 2, 18]. В этих работах делается упор на исследование влияния погодных условий на процесс распространения звука через массивы растительности, особенно при долгосрочных прогнозах.

В данной работе проводится исследование взаимодействия ударной волны и нелинейного акустического импульсного сигнала с лесным массивом на основе уравнений Эйлера для идеального газа. Влияние массива растительности моделируется при помощи массовых сил.

## 5 Постановка задачи

### 5.1 Модель

Будем решать систему уравнений Эйлера в прямоугольной области  $\Omega = \{(x, y) | x \in [0, X_{\max}], y \in [0, Y_{\max}]\}$ , заполненной однородной воздушной средой, со свободными боковыми и верхней границами и с жесткой нижней (рис. 1). Жесткость нижней границы позволит в дальнейшем упростить анализ результатов, исключив эффекты, возникающие в случае импедансной границы.

В качестве массива будем рассматривать прямоугольный барьер заданной высоты  $H_0$  и протяженности  $L$ .

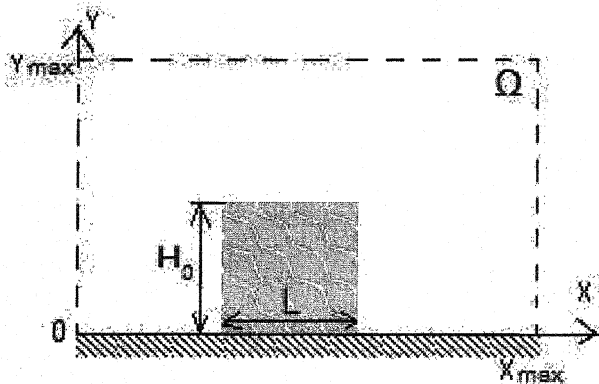


Рис. 1. Расчетная область

В соответствии с моделью леса, предложенной в [15], слой воздуха в пределах участка, занимаемого лесом, представляется сплошной средой, в которой задаются массовые силы сопротивления:

$$\vec{F} = -\rho c_d S \vec{v} \vec{v}, \quad (1)$$

где  $c_d$  — коэффициент аэродинамического сопротивления,  $S$  — удельная плотность поверхности элементов растительности (листьев и ветвей), приходящихся на единицу объема [15, 17],  $\vec{v}$  — скорость газа. Вне области, занятой растительным массивом,  $\vec{F} = 0$ .

Таким образом, исходная система уравнений Эйлера для идеального газа с введенными силами сопротивления имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) &= 0 \\ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \times \operatorname{rot}(\vec{v}) &= -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(p) + \frac{\vec{F}}{\rho}, \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \operatorname{div}([e + p] \vec{v}) &= \vec{F} \vec{v} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $p$ ,  $\rho$ ,  $\vec{v}$  — соответственно давление, плотность, скорость газа;

$e = \rho \left( \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{|\vec{v}|^2}{2} \right)$  — удельная внутренняя энергия газа,  $\gamma$  — показатель адиабаты.

При расчетах показатель адиабаты газа был принят равным  $\gamma = 1.4$ . Решение задачи проводится в безразмерных переменных. В качестве характерного размера выбрана высота лесного массива  $H_0$ . Размерный коэффициент  $S$  отнесен к  $H_0^{-1}$ . Проекция скорости, плотность и давление отнесены соответственно к скорости звука в невозмущенной среде  $c_0$ , плотности в невозмущенной среде  $\rho_0$  и  $\rho_0 c_0^2$ . Соответственно, в начальный момент времени значения скорости, плотности и давления в невозмущенной среде были равны  $\vec{v} = 0$ ,  $\rho = 1$ ,  $p = \frac{1}{\gamma}$ .

## 5.2 Исследуемые виды лесных массивов

В самом простом случае аэродинамические характеристики  $c_d$  и  $S$  считаются равными и неизменными во всей области, занимаемой лесным

массивом. В работах [15, 17] приведены их значения для некоторых видов древостоя (см. таблицу 1).

Таблица 1. Характеристики древостоя

Тип древостоя	$H_0$ , м	$S$ , $\text{м}^{-1}$	$c_d$
Мелколиственный лес	8 – 11	1.2	0.02
Сосна	16	1.2	0.03
Кукуруза	2 – 3	3 – 6	0.17
Бобовые культуры	1.2	7	0.05

Большой интерес представляют случаи неравномерного распределения параметров в лесном массиве. Аэродинамические свойства реальных лесных массивов можно достаточно хорошо отразить [15], задав зависимость параметра  $S$  от высоты.

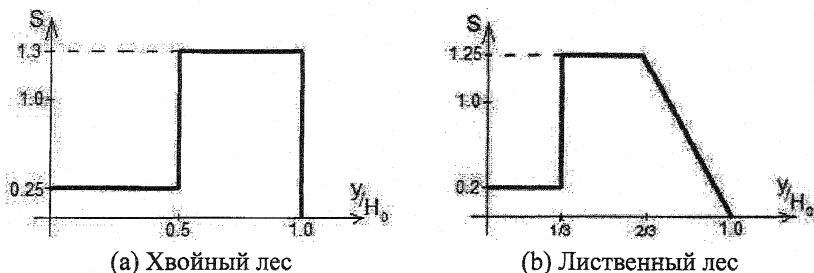


Рис. 2. Зависимость  $S$  от высоты

При моделировании хвойного (соснового) леса были приняты следующие параметры: коэффициент аэродинамического сопротивления  $c_d = 0.028$ , график зависимости  $S$  от высоты приведен на рисунке 2а. Обращает на себя внимание резкий скачок параметра  $S$ , начиная с половины высоты массива растительности.

В случае лиственного массива  $c_d = 0.030$ , график зависимости  $S$  от высоты приведен на рис. 2б. Главное отличие от случая соснового леса – линейное убывание  $S$  до 0, начиная с некоторой высоты.

### 5.3 Виды возмущений

В начальный момент времени возмущение задавалось одним из двух способов: в виде ударной волны с известной скоростью фронта  $D$  и

в виде нелинейного акустического импульсного сигнала с плоским фронтом.

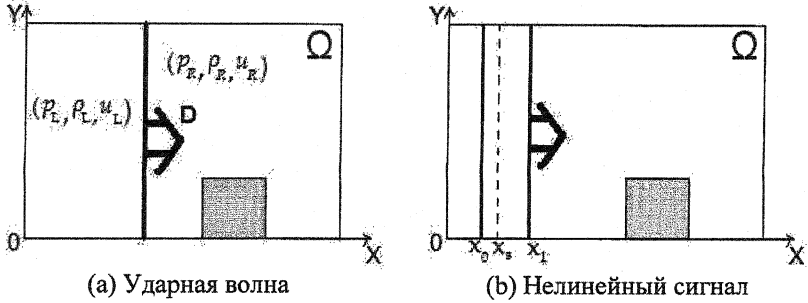


Рис. 3. Задание начального возмущения

### 5.3.1 Ударная волна

Начальное возмущение этого вида формировалось путем задания соответствующего распределения параметров газа  $(p, \rho, \vec{v})$  в левой и правой подобластях области  $\Omega$  (рис. 3а).

В правой подобласти задавались параметры невозмущенной среды: давление, плотность, горизонтальная компонента скорости —  $(p_R = 1/\gamma, \rho_R = 1, u_R = 0)$ .

В левой подобласти параметры определялись из условий Ренкина-Гюгонио таким образом, чтобы фронт возникшей ударной волны двигался вправо со скоростью  $D$ . В данном случае указанные условия принимают вид:

$$u_L = \frac{2}{\gamma + 1} \left( D - \frac{1}{D} \right); \quad \rho_L = \frac{D}{D - u_L}; \quad p_L = D u_L + \frac{1}{\gamma}. \quad (3)$$

### 5.3.2 Нелинейный сигнал

Этот вид начального возмущения характерен для сферического взрыва на достаточном удалении от источника, когда передний фронт можно считать плоским [10, 19]. В начальный момент времени координата переднего фронта  $x_1$ , заднего —  $x_0$  (рис. 3б).



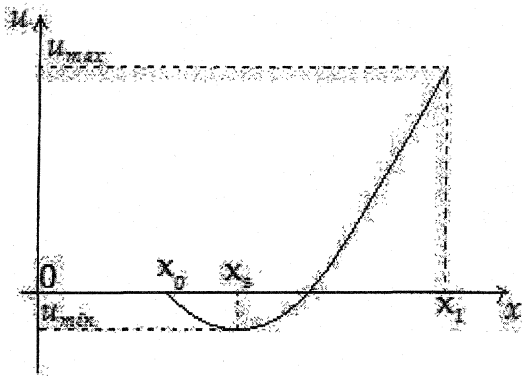


Рис. 4. Профиль скорости начального нелинейного импульсного сигнала

Так же как и в [10], задавалось распределение горизонтальной компоненты скорости  $u$  в виде части параболы  $u = A(x - x_0)(x - b)$  на отрезке  $[x_0, x_1]$  (рис. 4). Значение скорости  $u$  на переднем фронте задавалось равным  $u_{\max}$ , на заднем фронте  $u = 0$ . Также можно было задавать положение минимума  $x_s$ . Коэффициенты  $A$ ,  $b$  рассчитывались соответствующим образом.

Плотность и давление рассчитывались по формулам для простой бегущей волны в политропном газе [19]:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_0} \right)^{\frac{2}{\gamma - 1}}; \quad p = p_0 \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_0} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (4)$$

## 6 Результаты моделирования

Численное решение было получено при помощи численного метода С.К. Годунова [21, 22], отестированного на задаче о сверхзвуковом обтекании тела с угловой точкой (см. статью [20] в настоящем сборнике). Текущая реализация метода написана на языке C++. Использование технологий параллельного программирования сделало возможным проводить расчеты на многопроцессорных вычислительных системах (см. §3 в [20]).

Возмущения задавались у левой границы области до начала растительного массива. Расчеты проводились для лесостоев различной протяженности. Расчеты для массивов протяженностью 1, 2, 4, 10 и 15 проводились на равномерной по каждому направлению прямоугольной сетке

размерами  $300 \times 80$ . На единицу длины ( $H_0$ ) по оси  $x$  приходилось 10 расчетных ячеек, по оси  $y$  — 20 расчетных ячеек. Массивы начинались на расстоянии 10 от левой границы области.

Для лесостоев протяженности 300 использовались сетки размерами  $3050 \times 100$  ячеек. На единицы длин по осям  $x$  и  $y$  приходилось по 10 расчетных ячеек. Массивы начинались на расстоянии 5 от левой границы области.

### 6.1 Распространение нелинейного сигнала

В качестве параметров нелинейного акустического импульсного сигнала в начальный момент времени выбирались  $x_0 = 0.2$  — положение заднего фронта,  $x_s = 0.5$  — положение минимума,  $x_1 = 0.2$  — положение переднего фронта. Моделировались ситуации для разных начальных значений скорости на переднем фронте  $u_{\max} = 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0$ . Оказалось, что, в целом, характер поведения возмущения практически не отличается для разных значений  $u_{\max}$  и для разных типов и протяженностей массивов.

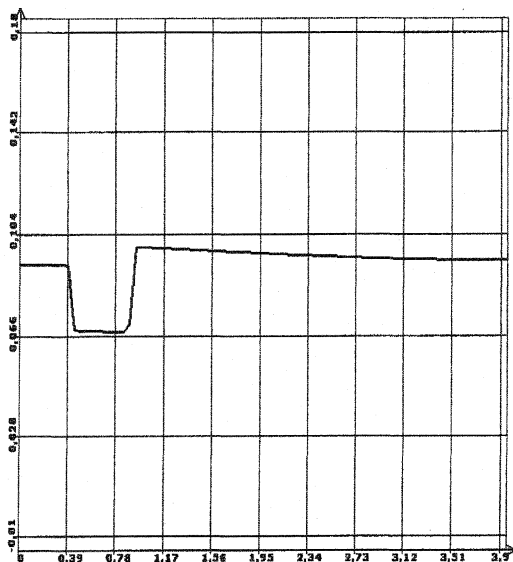


Рис. 5. Проекция скорости  $u$  для слоя  $x = 12.5$   
Случай  $u_{\max} = 0.5$  (передний фронт находится на  $x = 20.0$ )

Представление о характере поведения горизонтальной компоненты скорости  $u$  для случая хвойного лесостоя дает рис. 5. На нем изображено распределение  $u$  по высоте на слое  $x = 12.5$  в момент времени, когда передний фронт импульса находится на расстоянии  $x = 20.0$ . По горизонтальной оси отложена высота над уровнем земли, единице соответствует  $H_0$ . Протяженность растительного массива в этом случае равнялась  $L = 10$ . Интенсивность импульса определялась начальным значением  $u_{\max} = 0.5$ . На графике заметен резкий скачок скорости при  $y = 1.0$ .

Для случая лиственного массива график горизонтальной компоненты скорости выглядит аналогично, только возрастание графика при  $y = 1.0$  происходит более плавно. В обоих случаях распределения  $u$  вблизи поверхности земли ( $y \in [0, 1]$ ) хорошо согласуются с распределениями коэффициента  $S$ . Происходит своеобразное инвертирование: там, где значение  $S$  больше — значение  $u$  меньше, и наоборот.

Распределения вертикальных компонент скорости  $v$  отличаются незначительно.

Незначительные качественные и количественные различия в сходные моменты времени в поведении возмущения при прохождении через массивы двух разных типов подтвердились и дальнейшими расчетами.

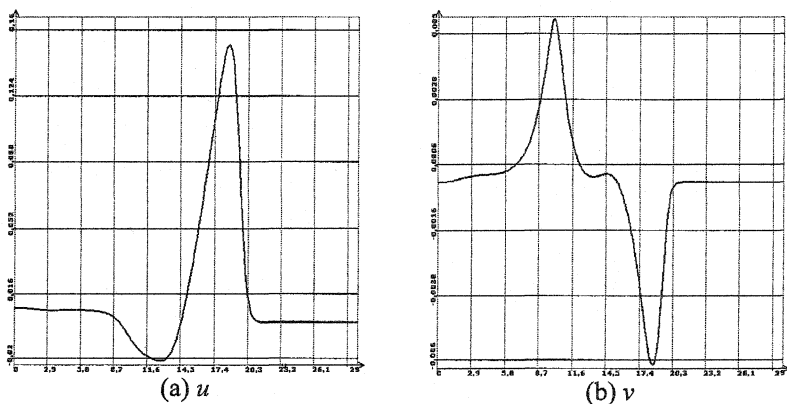


Рис. 6. Проекция скорости  $u$  и  $v$  для слоя  $y = 1.0$ . Хвойный лес  
Случай  $u_{\max} = 0.5$

На рис. 6 изображены распределения компонент скорости вдоль верхней границы лесного массива на слое  $y = 1.0$  для случая  $u_{\max} = 0.5$  в один и тот же момент времени. Профиль вертикальной компоненты скорости  $u$  сохраняет первоначальную форму нелинейного импульса. Про-

филь вертикальной компоненты скорости  $v$  иллюстрирует присутствие зоны нисходящих течений у переднего фронта импульса и зоны восходящих течений у заднего фронта.

Для различных начальных значений  $u_{\max}$  практически не наблюдались качественные различия, количественные объяснимы различной начальной интенсивностью сигналов.

Для процессов распространения сигналов с различными начальными значениями  $u_{\max}$  в лесных массивах различного типа и протяженности можно выявить общие этапы.

### 6.1.1 Основные этапы взаимодействия

В качестве модельной ситуации выберем случай хвойного массива протяженности  $L=10$  с началом в  $x=10$ ; начальное значение  $u_{\max}=1.5$ , соответствующее ему значение  $u_{\min}=-0.0625$ .

Следует отметить, что наиболее заметным изменениям подвергается вертикальная компонента скорости  $v$ . Характер поведения горизонтальной компоненты скорости  $u$  и значения плотности  $\rho$  и давления  $p$  при распространении сигнала меняется не столь интенсивно. Ниже представлены поверхности значений и изолинии для  $v$  в различные моменты времени. Изображения поверхностей значений давлений в области в различные моменты времени могут использоваться для определения свойств переднего фронта импульса.

#### Начало взаимодействия

При проникновении импульса через переднюю границу лесного массива образуются две пары потоков. На рис. 7а изображены изолинии для вертикальной компоненты скорости  $u$  передней границы лесного массива. Горизонтальная ось соответствует направлению распространения импульса  $x$ , вертикальная — высоте над уровнем земли  $y$ . Левая граница леса расположена при  $x=10$ , вертикальная —  $y=1$ . Фронт импульса проник внутрь массива на незначительную глубину. Первая пара: *восходящий/нисходящий* (сверху вниз) потоки — образуется слева от кромки лесного массива вне пределов растительности (см. рис. 7а). Потоки возникают в зонах с меньшим импедансом: *восходящий* — над верхней границей массива, *нисходящий* — в зоне подлеска. Антисимметричная вторая пара (именуемая дальше "внутренняя"): *нисходящий/восходящий* — образуется справа от кромки, внутри массива. При этом оба потока возникают в зоне с большим импедансом, соответствующей гуще крон. Появление пар потоков согласуется с результатами экспериментов, приведенными в работе [15].

Значения горизонтальной компоненты скорости, давления и плотности соответствуют случаю распространения импульса в области, не занятой растительностью. Передний фронт импульса пока не искривлен (см. рис. 7b). На объемном изображении распределения давления  $p$  в расчетной области ось  $x$  соответствует высоте над поверхностью земли, ось  $y$ , направленная справа-налево — горизонтальной координате, ось  $z$  — значению давления  $p$ .

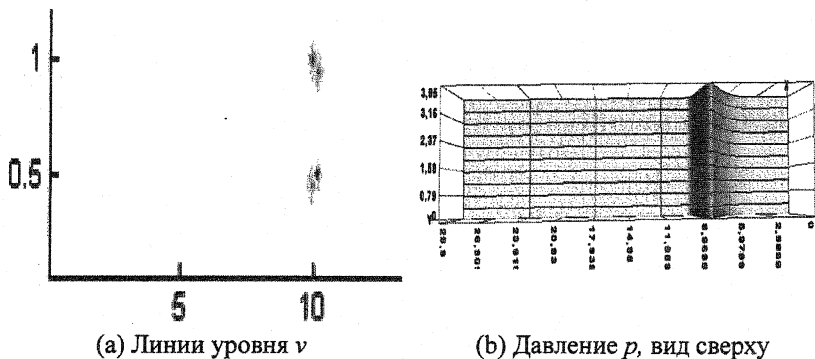


Рис. 7. Начало взаимодействия импульса  $u_{\max} = 1.5$  с лесом

### Распространение возмущения в толще массива

На рис. 8a, b показан начальный этап распространения возмущения по массиву растительности. Как видно из рис. 8a, передняя пара потоков закрепляется на переднем торце массива и дальше не движется. Положение фронта  $x = 10.1$ . При этом размеры зон *восходящего/нисходящего* потоков продолжают увеличиваться.

"Внутренняя" пара отрывается от границы массива и вместе с фронтом продолжает перемещаться по массиву растительности (рис. 8b). Положение фронта  $x = 12.0$ .

На данном этапе у графиков горизонтальной скорости  $u$  и плотности  $\rho$  становятся заметны прогибы в области кроны (см. рис. 5); появляется отраженная волна незначительной интенсивности, которая практически сразу сглаживается. Искривление переднего фронта импульса на этом этапе все еще незначительное.

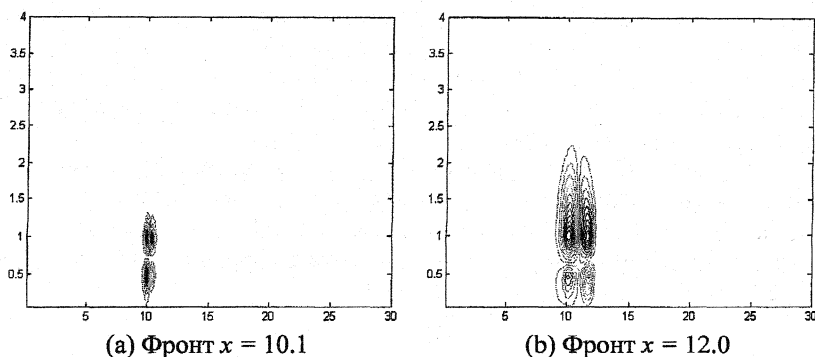


Рис. 8. Импульс  $u_{\max} = 1.5$  внутри лесного массива. Линии уровня  $v$

### Ослабление нижних потоков

В ходе дальнейшего распространения фронта происходит ослабление нижних потоков в парах. Размеры зоны верхних потоков в парах продолжают увеличиваться (рис. 9 и 10). По мере продвижения импульса через лесной массив изначально не очень сильные нижние потоки в парах исчезают. На рис. 10а, 10б и 10с нижние потоки практически не видны. На этом этапе у поверхности земли проявляется изгиб фронта импульса при  $x = 13.0$  (рис. 10д). Характер изменений  $u$  и  $\rho$  не меняется.

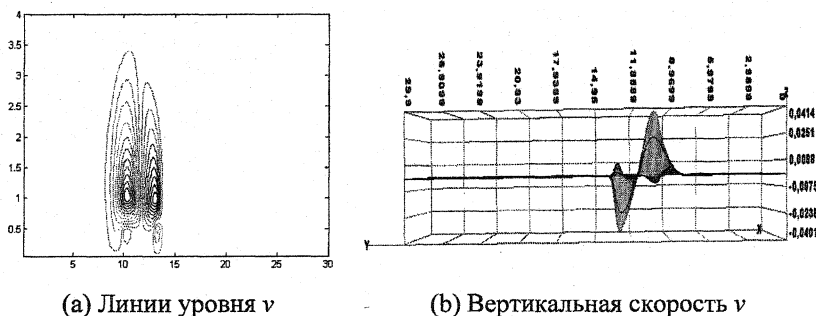


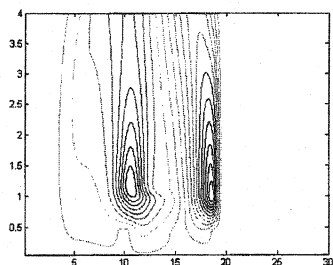
Рис. 9. Ослабление импульса  $u_{\max} = 1.5$  внутри лесного массива.  
Фронт  $x = 13.0$

### Взаимодействие с дальней границей

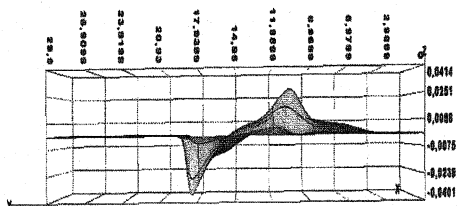
На подходе к дальней границе нижние потоки в парах исчезают. Увеличивается размер зоны восходящего потока у передней границы, скорость потока при этом падает. При переходе импульсом дальней границы лесного массива (рис. 11) вновь происходит появление зоны восхо-

дящих течений в дальней паре потоков. Верхний (нисходящий) поток в дальней паре застревает на дальней границе (рис. 11а, б). В дальнейшем, по аналогии с потоком у передней границы массива, модуль скорости нисходящего потока на дальней границе уменьшается, размер зоны нисходящих течений увеличивается.

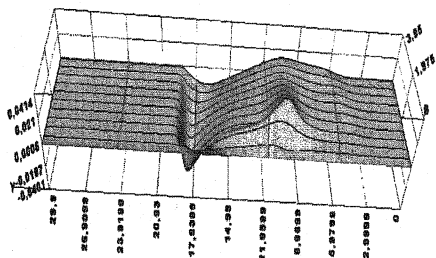
На этом этапе передний фронт импульса достаточно сильно изогнут. Горизонтальная компонента скорости и плотность начинают восстанавливать плоский профиль у поверхности земли, прогиб в области крон исчезает. Как будет показано ниже, для случая ударной волны восстановление происходит не всегда.



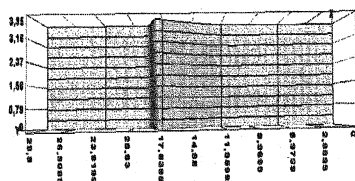
(а) Линии уровня  $v$



(б) Вертикальная скорость  $v$

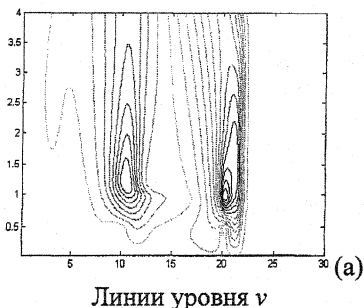


(с) Вертикальная скорость  $v$ , другой ракурс

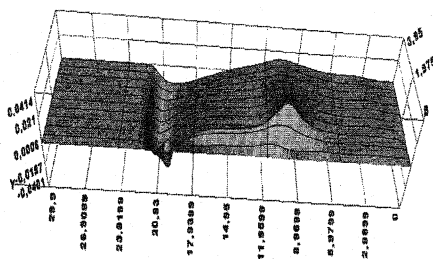


(д) Давление  $p$

Рис. 10. Ослабление импульса  $u_{\max} = 1.5$  внутри лесного массива.  
Фронт  $x = 19.0$



(a) Линии уровня  $v$

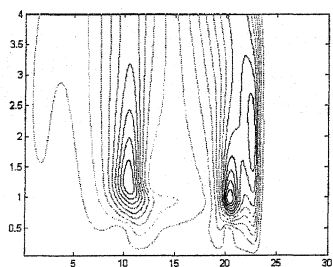


(b) Вертикальная скорость  $v$

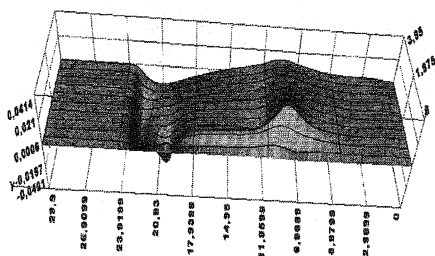
Рис. 11. Взаимодействие импульса  $u_{\max} = 1.5$  с дальней границей леса

### Распространение за пределами массива

Продолжает увеличиваться размер зоны нисходящего течения на дальней границе. Со временем это приводит к тому, что появившийся восходящий (нижний) поток исчезает. Зона нисходящего потока "отражается" от нижней границы области. Происходит разделение этой зоны. Одна часть остается "висеть" у дальней границы массива. Другая часть начинает двигаться вверх и, увлекаемая импульсом, вправо (рис. 12). Положение фронта  $x = 23.5$ . За счет этого начинается восстановление прямолинейного вида фронта возмущения. Скорость движения фронта при этом уменьшается. Характер изменения плотности и горизонтальной компоненты скорости не меняется.



(a) Линии уровня  $v$



(b) Вертикальная скорость  $v$

Рис. 12. Распространение импульса  $u_{\max} = 1.5$  после массива

### Остаточная картина

Еще некоторое время у передней границы массива держится восходящий поток, у дальней — нисходящий. В дальнейшем зоны восходящего и нисходящего потоков расплываются, значения всех параметров в области выравниваются. Происходит возвращение к первоначальной невозмущенной конфигурации.



### 6.1.2 Расщепление потока

У всех моделируемых ситуаций можно было выделить рассмотренные выше этапы. В этом подразделе рассмотрена ситуация, проявляющаяся лишь в ряде случаев.

В предыдущем подразделе говорилось, что при прохождении импульса через лесной массив восходящий поток внутренней пары сначала исчезает, а затем вновь возникает на дальней границе леса. Если же восходящий поток не успевает исчезнуть до границы лесного массива, его поведение определяется скоростью фронта ударной волны.

Если скорость фронта незначительна, область восходящего течения задерживается на границе лесного массива и расплывается. Это наблюдалось при моделировании взаимодействия импульса с начальной скоростью фронта  $u_{\max} = 0.5$  с растительным барьером протяженности  $L = 1$ . Если скорость фронта значительная, на дальней границе происходит расщепление и нижнего — восходящего, и верхнего — нисходящего потоков пары. Эта ситуация наблюдалась при моделировании взаимодействия импульса с начальной скоростью фронта  $u_{\max} = 2.0$  с растительным барьером протяженности  $L = 1$ . На рис. 13 представлены графики вертикальной компоненты скорости  $v$  в момент прохождения дальней границы массива для последовательных моментов времени.

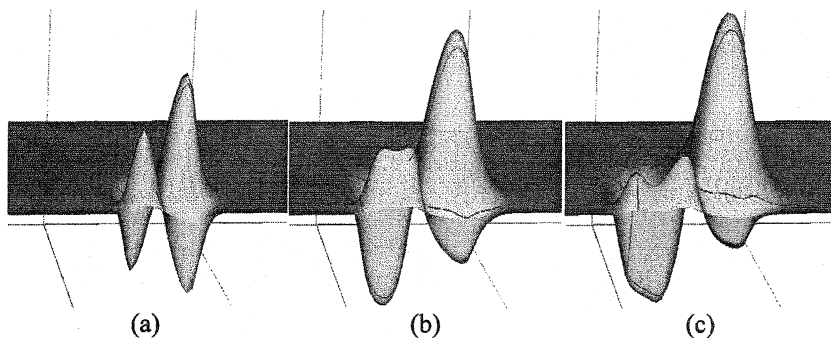


Рис. 13. Расщепление потоков ( $u_{\max} = 2.0$ )

### 6.2 Распространение ударной волны

В качестве параметра ударной волны в начальный момент времени задавалась скорость ее фронта  $D$ . Все остальные параметры подбирались согласно выражениям (3). Моделировались ситуации для разных значений  $D = 1.5, 2.0, 3.0$ . Как и в случае нелинейного импульса, оказалось, что характер поведения возмущения практически не отличается для разных значений  $D$  и для разных типов и протяженностей массивов. При моделировании было принято допущение о неразрушаемости лесного массива при

прихождении ударной волны. (Однако модель и методика расчета позволяют, как нам представляется, учитывать разрушаемость лесного массива.) Для процессов распространения ударной волны с различной скоростью фронта  $D$  в лесных массивах различного типа и протяженности можно выявить общие этапы.

### 6.2.1 Основные этапы взаимодействия

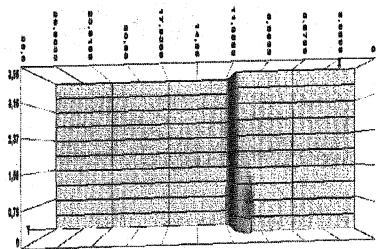
Проследим основные этапы распространения ударной волны сквозь лесной массив. В качестве модельной ситуации выберем случай хвойного массива протяженности  $L = 10$ ; значение  $D = 3.0$ . Наибольший интерес для рассмотрения представляют вертикальная компонента скорости и давление. Плотность и горизонтальная компонента скорости, в целом, ведут себя похожим образом.

#### Начало взаимодействия

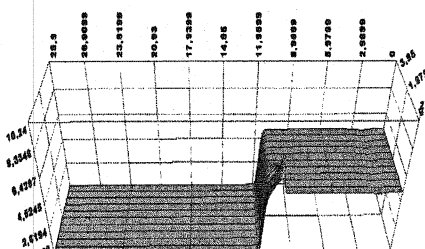
При проникновении ударной волны через переднюю границу лесного массива (положение фронта  $x = 11.9$ ), как и в случае нелинейного сигнала, образуются две пары потоков. Первая пара: *восходящий/нисходящий* (сверху вниз) потоки — образуется слева от кромки лесного массива, вне пределов растительности (рис. 14с). Потоки возникают в зонах с меньшим импедансом: *восходящий* — над верхней границей массива, *нисходящий* — в зоне подлеска. Антисимметричная вторая пара (именуемая дальше "внутренняя"): *нисходящий / восходящий* — образуется справа от кромки внутри массива. При этом оба потока возникают в зоне с большим импедансом, соответствующей гуще крон.

На графиках давления  $p$  (рис. 14а, б) заметно начало формирования головной ударной волны.

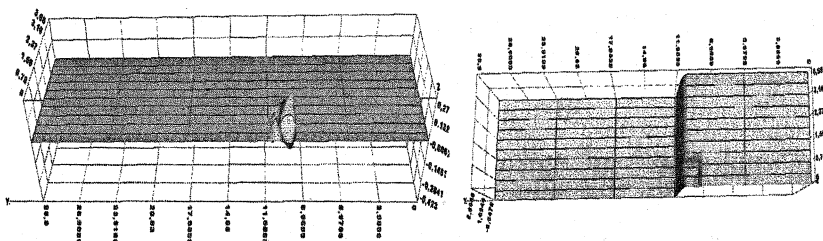
На графиках горизонтальной компоненты скорости  $u$  заметен формирующийся прогиб в области, занятой кроной деревьев (рис. 14д). Плотность ведет себя аналогичным образом.



(а) Давление  $p$



(б) Давление  $p$ , другой ракурс



(с) Вертикальная скорость  $v$

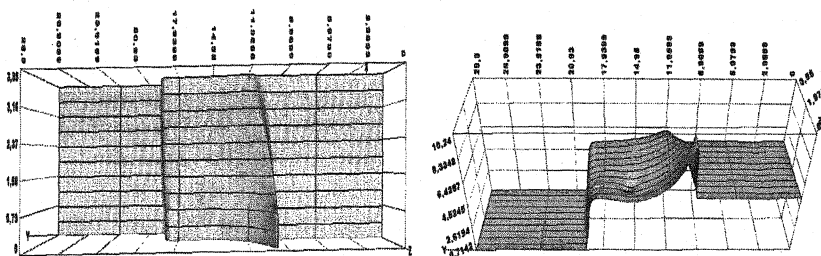
(d) Горизонтальная скорость  $u$

Рис. 14. Начало взаимодействия ударной волны с лесом

### Распространение возмущения в толще массива

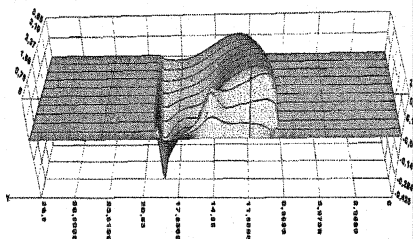
Рис. 15 иллюстрирует процесс распространения возмущения по массиву растительности. Положение фронта  $x = 19.0$ . В ходе дальнейшего распространения фронт обгоняет пару потоков, распространяющуюся со скоростью среды за ударной волной (рис. 15с). Происходит формирование области ("пятна") пониженного давления над нисходящим потоком "внутренней" пары (рис. 15а, б), которое в дальнейшем распространяется по растительному массиву со скоростью набегающей среды. Становится заметна головная ударная волна и искривление фронта возмущения (рис. 15а).

Появление "пятна" сказывается и на других параметрах состояния газа (рис. 15d).

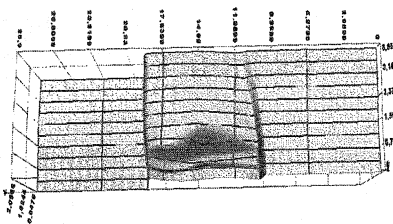


(а) Давление  $p$

(б) Давление  $p$ , другой ракурс



(с) Вертикальная скорость  $v$

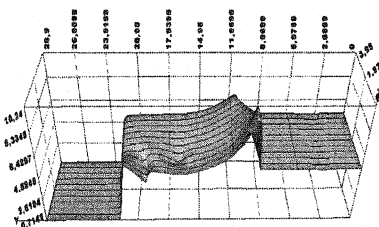


(d) Горизонтальная скорость  $u$

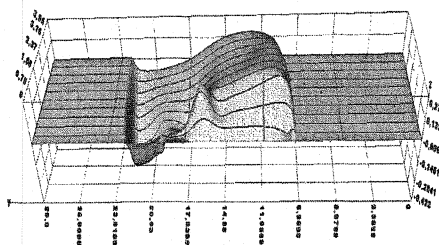
Рис. 15. Распространение ударной волны внутри лесного массива

### Взаимодействие с дальней границей

При взаимодействии фронта падающей ударной волны с дальней границей лесостоя формируется волна разрежения (рис. 16а). Положение фронта  $x = 23.0$ . "Пятно" давления продолжает распространяться в сторону дальней границы массива. Фронт ударной волны значительно искривлен. Наблюдаемая ситуация аналогична случаю нелинейного сигнала: возникает нижний поток в дальней паре, который вскоре разрушается. Верхний поток закрепляется на дальней границе лесного массива. От него начинает отделяться еще один нисходящий поток (рис. 16б).



(а) Давление  $p$



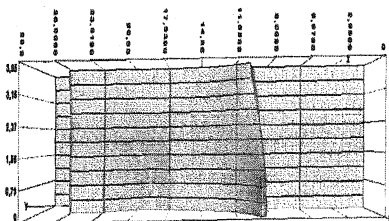
(б) Вертикальная компонента скорости  $v$

Рис. 16. Взаимодействие ударной волны с дальней границей леса

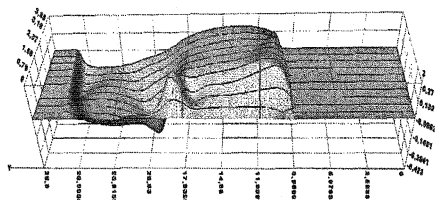
### Распространение за пределами массива

Как и в случае нелинейного сигнала, происходит "отражение" недавно отделившегося нисходящего потока от нижней границы области и

его увлечение фронтом падающей ударной волны (рис. 17b). Пятно давления достигает дальней границы массива. Происходит восстановление плоского характера фронта ударной волны (рис. 17a). Положение фронта  $x = 26.0$ . Скорость движения фронта при этом уменьшается. Характер изменения плотности и горизонтальной компоненты скорости не меняется.



(a) Давление  $p$

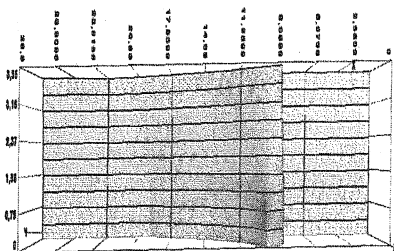


(b) Вертикальная компонента скорости  $v$

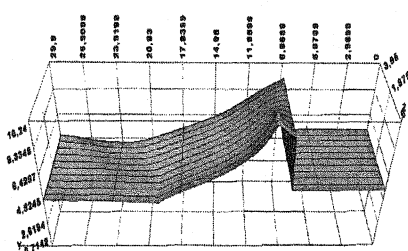
Рис.17. Распространение ударной волны за дальней границей леса

### Остаточная картина

С течением времени происходит установление течения. Картина течения будет аналогична возникающей при обтекании тела сверхзвуковым потоком, но головная ударная волна отойдет на значительно меньшее расстояние от границы массива, чем от торца твердого тела (рис. 18a). Интересно, что горизонтальная компонента скорости сохраняет конфигурацию с провалом в зоне крон лесостоя и в следе за массивом (рис. 18d).



(a) Давление  $p$



(b) Давление  $p$ , другой ракурс

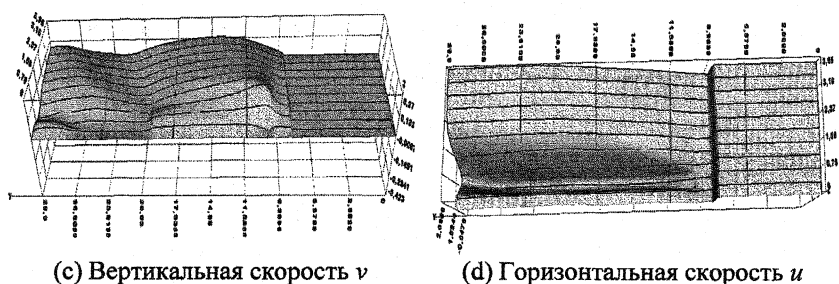


Рис. 18. Остаточная картина

## 7 Заключение

Проводилось моделирование процесса взаимодействия акустического импульса в виде ударной волны и нелинейного акустического импульсного сигнала лесным массивом на основе уравнений Эйлера для идеального газа. Влияние массива растительности учитывалось введением массовых сил в объеме, занимаемом лесостоем. Для упрощения анализа полученных результатов расчеты проводились для случая жесткой нижней границы.

В ходе моделирования распространения возмущений обнаружено следующее.

На характер процесса распространения сигналов оказывает влияние, прежде всего, тип возмущения, а не его интенсивность или тип и протяженность растительного массива.

При взаимодействии передних фронтов возмущений с границами массива, т.е. при переходе из области с одним импедансом в область с другим импедансом происходит порождение двух пар восходящих / нисходящих потоков. В дальнейшем пара, появившаяся внутри лесного массива, распространяется к дальней его границе со скоростью потока за передним фронтом возмущения. Обычно нижняя часть пары очень быстро распадается. По достижении фронтом дальней границы происходит вторичное порождение нижней части пары. Однако размеры области и интенсивность потока не велики, и он распадается еще быстрее.

В случае импульсного сигнала можно считать, что скорость среды за передним фронтом возмущения равна скорости самого фронта. А значит, пара потоков распространяется со скоростью самого фронта. Для случая ударной волны это, вообще говоря, не так, что приводит к усложнению характера течений. Фронт, взаимодействуя с дальней границей, порождает пару потоков. При этом порожденная внутри лесного массива

и переносимая течением за ударной волной пара потоков не успевает совсем исчезнуть.

При прохождении сигнала через лесной массив его передний фронт искривляется, однако потом происходит восстановление плоской формы фронта. Передний фронт ударной волны также восстанавливается, но процесс восстановления протекает медленнее.

В случае нелинейного сигнала с течением времени происходит возвращение к первоначальной невозмущенной конфигурации. В случае ударной волны с течением времени происходит установление течения. Картина течения аналогична возникающей при обтекании тела сверхзвуковым потоком. Особенность этой картины состоит в том, что головная ударная волна отходит на значительно меньшее расстояние от границы массива, нежели от торца твердого тела.

В данную работу не вошло более детальное описание процесса затухания возмущения. Проблему затухания возмущений в лесных массивах предполагается более подробно осветить в последующих работах. Также следует отметить, что выбранная модель и методика расчетов позволяют исследовать и более сложные модели лесных массивов с учетом их разрушаемости.

## Литература

1. Heimann D. Influence of meteorological parameters on outdoor noise propagation // Euronoise Naples, paper ID: 113-IP, 2003
2. Heimann D. Meteorological aspects in modeling noise propagation outdoors // Euronoise Naples, paper ID: 213-IP, 2003
3. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.Н. Аэродинамика болидов, М.: Наука. Физматлит, 1995. 240с.
4. Keller J.B. A geometrical theory of diffraction // Proc. Symp. Appl. Math., 8, Calculus of Variation and its Application, Mc. Graw Hill: New York, 1958, pp. 27-52.
5. Maekawa Z. Noise reduction by screens // Appl. Acoust. 1968. V. 1. P. 157-173.
6. Pierce A.D. Diffraction of sound around corners and over wide barriers // J. Acoust. Soc. Am. 1974. V. 55. P. 941-955.
7. Saunders D.J., Ford R.D. A study of the reduction of explosive impulses by finite size barriers // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 94. P. 2859-2875.

8. Eyring C.F. Jungle acoustic // J. Acoust. Soc. Am. 1946. V. 18. P. 267-277.
9. Embleton T.F.W. Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods // J. Acoust. Soc. Am. 1963. V. 35. P. 1119-1125.
10. Кондратьев В.И., Крюков Ю.С. Численный расчет дифракции нелинейного акустического импульсного сигнала на прямоугольном выступе // Акуст. Ж. 2000. Т. 46. № 2. С. 220 – 227
11. Courtier-Arnoux S. Modelisation parabolique tri-dimensionnelle de la propagation acoustique en milieu exterieur d'un champ convecteur, d'une topographie au sol d'obstacles eventuels // J. Physique. 1990. 51, P. 1209-1212.
12. Price M.A., Attenborough K., Heap N.W. Sound attenuation through trees: measurements and models // J. Acoust. Soc. Am. 1988. 84. P. 1836-1844.
13. Tunick A. Coupling meteorology to acoustics in forest // U.S. Army Research Laboratory, Adelphi, MD 20783-1197, 2002.
14. Burns S.H. The absorption of sound by pine trees // J. Acoust. Soc. Am. 1979 V. 65. P. 658-661.
15. Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунич С.В. Турбулентность в растительном покрове, Л.: Гидрометеиздат, 1978. 183 с.
16. Бояршинов М.Г. Оценка последствий переноса газового облака над лесным массивом // Известия РАН, Механика жидкости и газа. 2000. № 4. С. 79 – 87.
17. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. М.: Наука, 1992. 408 с.
18. Larom D., Garstang M., Payne K, Raspert R., Lindeque M. The influence of surface atmospheric conditions on the range and area reached by animal vocalizations // J. Exp. Biology. 1997 V. 200. P. 421-431.
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
20. Лебедев М.Г., Ситник В.В. К расчету течений сжимаемого газа с бесконечными градиентами скорости и давления // Прикладная математика и информатика № 20, М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2005, с.40-57.
21. С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н.Крайко, Г.П.Прокопов. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
22. Андрианов А.Н., Базаров С.К., Ефимкин К.Н. Решение двумерных задач газовой динамики методом Годунова на параллельных ЭВМ с помощью языка НОРМА // Препринт ИПИМ им. М.В. Келдыша РАН № 9, 1997.