

На правах рукописи



**Мамучиев Инал Магометович**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ТЕПЛЫЕ И ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫЕ ТУМАНЫ**

25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

НАЛЬЧИК-2005

Работа выполнена в ГУ "Высокогорный геофизический институт"  
Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей  
среды

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
**Калов Хажбара Мамизович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Ашабоков Борис Азраталиевич**

доктор физико-математических наук  
**Закинян Роберт Гургенович**

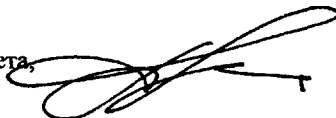
**Ведущая организация:** Таганрогский государственный  
радиотехнический университет, г. Таганрог

Защита состоится 1 июля 2005 года в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д.327.001.01 при ГУ "Высокогорный  
геофизический институт" Росгидромета по адресу: 360030, КБР,  
г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ "Высокогорный  
геофизический институт"

Автореферат разослан 31 мая 2005 г.

**Ученый секретарь**  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук



**Шаповалов А.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Анализ существующего положения физики образования и развития туманов и низких слоистых облаков в естественных условиях и при активном воздействии (АВ) с целью их рассеяния показывает, что в этой области имеется ряд нерешенных вопросов, которые требуют проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. В современных условиях роль численного моделирования в исследовании различных проблем физики туманов и облаков возрастает. Создание более эффективных методов активного воздействия на туманы требует исследования их образования и развития в естественных условиях и при активном воздействии. В связи с этим разработку методов математических расчетов и их применение для исследования изменения во времени концентрации частиц, водности и метеорологической дальности видимости (МДВ) в теплых и переохлажденных туманах при активном воздействии на них, являются актуальными задачами.

Математическое моделирование является важным инструментом исследования физических процессов активного воздействия на туманы при различных условиях. Использование методов математического моделирования позволяет исследовать роль отдельных факторов, изучать характеристики системы в тех случаях, когда проведение натуральных экспериментов затруднено или невозможно, а также моделировать методы активных воздействий и оценивать их эффективность.

Целью работы является численное моделирование активного воздействия на теплые и переохлажденные туманы различными средствами на основе детальных физико-математических моделей для совершенствования применяемых технологий АВ и разработки новых средств воздействия.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка моделей АВ, алгоритмов расчета и их реализация на ЭВМ;
- проведение численных экспериментов по рассеянию теплых туманов искусственными каплями воды различной дисперсности и концентрации;
- исследование АВ на туман тепловым и динамическим методами;
- моделирование АВ на переохлажденные туманы кристаллизующим реагентом;
- разработка рекомендаций по совершенствованию методов АВ на теплые и переохлажденные туманы.

Научная новизна работы. В работе впервые получены следующие результаты:

- исследовано взаимодействие искусственных капель воды с каплями тумана и получено, что АВ на теплый туман с концентрацией

капель  $9 \cdot 10^8 \text{ м}^3$  и радиусами 1-16 мкм неэффективно для искусственных капель радиусом 300 мкм, частично эффективно для 600 и 1000 мкм, эффективно для 1800 мкм капель при концентрациях  $10^3$ ,  $5 \cdot 10^3$  и  $10^4 \text{ м}^{-3}$ ;

— проведено исследование АВ на туман тепловым методом и получено, что применение водорода вместо керосина позволит повысить эффективность и экологичность этого метода;

— при исследовании АВ на туман динамическим методом получено, что для рассеяния мощных туманов необходимо применение устройств большой производительности  $m_n$  (не менее  $12000 \text{ м}^3/\text{мин}$ );

— при АВ на переохлажденный туман искусственными ледяными кристаллами определены время его рассеяния, конечный радиус ледяных кристаллов и МДВ в зависимости от концентрации искусственных кристаллов;

— на основе численных расчетов разработаны рекомендации по усовершенствованию различных методов рассеяния теплых и переохлажденных туманов и разработке новых средств воздействия.

Научная и практическая ценность. В диссертационной работе проведен комплекс теоретических исследований по проблеме рассеивания теплых и переохлажденных туманов с применением экологически чистых веществ, таких как вода, водород, жидкий азот и т.д. Полученные результаты при численном моделировании представляют интерес с точки зрения усовершенствования способов АВ на облака и туманы. В частности, при выборе составов реагентов для получения частиц с необходимыми размерами и концентрацией и др. Результаты расчетов необходимы для совершенствования технологий рассеяния туманов в аэро- и морских портах, на космодромах, автодорогах, лыжных трассах, для осаждения пыли, образующейся в карьерах и т.д.

Предмет защиты. На защиту выносятся следующие положения:

— результаты моделирования рассеяния теплых туманов искусственными водяными каплями различной дисперсности и концентрации;

— методика и результаты расчетов рассеяния теплых туманов тепловым методом с применением экологически безопасных веществ;

— результаты исследований по рассеянию туманов динамическим методом;

— численная модель роста искусственных кристаллов в переохлажденном тумане и результаты исследований на ее основе;

— рекомендации по усовершенствованию средств воздействия на туманы.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертации получены лично автором. Личный вклад автора заключается в разработке численных моделей рассеяния теплых туманов при АВ искусственными водяными каплями и переохлажденных туманов- ледяными кристаллами, проведении расчетов по тепловому и динамическому методам АВ на туман. Автором лично проведен анализ результатов исследований по рас-

сеянию теплых и переохлажденных туманов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-практической конференции "Гидрометеорологические прогнозы и гидрометеорологическая безопасность", посвященной 170-летию образования Гидрометеорологической службы России (Москва, 2004); V Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (весенняя сессия) (Кисловодск, 2004); совещании-семинаре "Совершенствование специализированного гидрометеорологического обеспечения транспортных отраслей" (Уфа, 2004); V Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (осенняя сессия) (Сочи, 2004); 50-й юбилейной научно-методической конференции СГУ "Университетская наука - региону" (Ставрополь, 2005).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 130 страницах печатного текста, включая 33 рисунка и 50 таблиц. Список литературы составляет 121 наименование.

Автор глубоко благодарен своему научному руководителю доктору физико-математических наук Калову Х.М. и доктору физико-математических наук Шаповалову А.В. за помощь и поддержку на всех этапах работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертационной работы, характеризуются теоретические и методологические основы, объект и предмет исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также апробация работы.

**Первая глава** носит обзорный характер.

**В разделе 1.1** приводится описание физики туманов различных типов, полученное в результате сравнительного анализа данных литературных источников разных авторов, внесших весомый вклад в развитие метеорологической науки в исследуемой области. Рассматриваются современные представления о термодинамических и микрофизических условиях образования тумана, а также процессы, происходящие в адвективных, радиационных и смешанных туманах.

Затрагиваются вопросы, связанные с суточным и годовым ходом их проявления, мощностью развития и МДВ в них.

**Раздел 1.2** посвящен описанию наиболее изученных на сегодняшний день методов АВ на теплые и переохлажденные туманы, проанализированы преимущества и недостатки рассматриваемых методов АВ на них.

Отмечено, что в основе всех известных методов АВ на облака и туманы лежит воздействие на:

- 1) неустойчивость фазового состояния воды,

- 2) коллоидную неустойчивость системы капель,
- 3) термическую устойчивость атмосферы.

Физическими принципами рассеяния для любых типов туманов являются:

- 1) осаждение тумана за счет укрупнения капель путем засева льдообразующими и гигроскопическими реагентами;
- 2) испарение тумана путем подогрева воздушной массы;
- 3) испарение тумана за счет динамического воздействия с целью создания нисходящих потоков ненасыщенного воздуха над верхней кромкой тумана.

В свою очередь вещества, применяемые для АВ на облака и туманы, разбиты на несколько групп:

- 1) кристаллизующие реагенты;
- 2) хладореагенты :  $N_2$ ,  $CO_2$ , пропан и др.;
- 3) водяные капли;
- 4) гигроскопические реагенты:  $NaCl$ ,  $CaCl_2$  и др.;
- 5) поверхностно-активные вещества.

Кроме того, нужно отметить, что указанные выше группы реагентов предназначены для использования в различных температурных условиях, причем водяные капли, гигроскопические реагенты и поверхностно-активные вещества применяются для рассеяния или предупреждения теплых туманов, а кристаллизующие и хладореагенты — для рассеяния переохлажденных туманов.

Наиболее практичным методом воздействия на теплые туманы в настоящее время считается тепловой метод с использованием турбореактивных двигателей (ТРД), который экономически выгоден лишь при его использовании в крупных аэропортах с большим количеством самолетовылетов. В отношении методов АВ на переохлажденные туманы большое предпочтение в научных кругах отдается кристаллизующему реагенту  $AgI$  и хладореагенту  $N_2$ .

**В разделе 1.3** проводится качественное рассмотрение влияния "коллективного эффекта" падающей системы капель высокой концентрации на рассеяние туманов.

Поскольку тема диссертационной работы связана с расчетами, в разделе 1.4 анализируются различные приближенные математические методы (метод последовательных приближений, Эйлера, Адамса, Рунге-Кутты, Милна, Крылова, Чаплыгина и др.) с различной степенью точности.

**В разделе 1.5** проводится обзор технических средств воздействия на облака и туманы, существующих на сегодняшний день.

Несмотря на некоторые успехи в области рассеяния туманов, существует много вопросов, которые требуют дальнейших теоретических исследований с применением методов математического моделирования.

**Во второй главе** представлена разработанная численная модель, описывающая метод рассеяния теплого тумана путем вымывания его частиц искусственными каплями воды различной дисперсности. Здесь

исследуется взаимодействие искусственных капель с радиусами 300, 600, 1000, 1800 мкм и капель тумана с размерами от 1 до 16 мкм.

Целью исследования в этой главе является оценка изменения концентрации, водности и МДВ в тумане во времени при проведении АВ искусственными каплями.

В разделе 2.1 подробно излагается постановка задачи и методика расчетов характеристик тумана при вымывании его частиц искусственными каплями.

Модель построена в предположении падения искусственных капель радиусом  $r_2$  сквозь туман, состоящий из микронных капель с функцией распределения по размерам  $f_1(r)$ .

Убыль мелких капель при коагуляции с искусственными каплями описывается выражением

$$\frac{\partial f_1(m)}{\partial t} = -f_1(m) \cdot \int_0^{\infty} K(m, m') \cdot f_2(m') dm', \quad (0)$$

где  $f_1(m)$  — функция распределения по массам капель тумана;  $f_2(m)$  — функция распределения по массам искусственных капель;  $K(t, t')$  — коэффициент коагуляции.

Задача исследования заключается в расчете изменения функции распределения капель тумана во времени при заданных концентрациях искусственных капель и капель тумана.

Считается, что частицы тумана состоят из трех фракций с заранее заданными концентрациями.

Введение градаций по размерам мелких и крупных капель приводит к следующей системе уравнений:

$$\frac{\partial f_1^i}{\partial t} = -f_1^i \cdot \sum_j K(i, j) \cdot f_2^j \cdot \Delta m_j, \quad (2)$$

$$f_1^i \equiv f_1(m_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$f_2^j \equiv f_2(m_j), \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$K(i, j) \equiv K(m_i, m_j).$$

где  $f_1^i$  — функция распределения капель тумана.

Уравнение (2) решалось методом Рунге-Кутты, обеспечивающим требуемый порядок точности вычислений.

В расчетах использованы табличные данные коэффициента слияния и скорости падения искусственных капель. Уравнение (2) позво-

ляет вычислить изменение функции распределения мелких капель тумана за счет процесса захвата искусственными каплями.

Зная  $f_1'$ , можно определить концентрацию мелких капель:

$$n_1 = \sum_i f_1' \cdot \Delta m_i, \quad (3)$$

где  $\Delta m_i$  — интервал массы частиц тумана, соответствующий интервалу радиусов от  $r_i$  до  $r_i + dr_i$ .

Метеорологическая дальность видимости рассчитывалась по формуле Траберта:

$$L = \frac{b}{n_1 \cdot r_1^2 + n_2 \cdot r_2^2}, \quad (4)$$

где  $b$  — безразмерный коэффициент;  $n_1$  и  $n_2$  — концентрации капель тумана и искусственных капель, соответственно;  $r_1$  и  $r_2$  — их радиусы.

Расход воды при активном воздействии на туман оценивается следующим образом. Считается, что засев искусственными каплями осуществляется в верхнем слое тумана толщиной  $\Delta h = 1$  м над площадками  $S_{\min} = 25000 \text{ м}^2$  (50 м x 500 м) и  $S_{\max} = 100000 \text{ м}^2$  (100 м x 1000 м).

Расход воды в единицу времени на  $1 \text{ м}^3$  составляет:

$$q_2 = m_2 \cdot n_2, \quad (5)$$

где  $m_2$  — масса искусственной капли воды.

Для всего объема требуется:

$$M = q_2 \cdot V \cdot t, \quad (6)$$

где  $V = S \cdot \Delta h$  — объем засеваемого слоя тумана;  $\Delta h$  — слой засева;  $S$  — площадь засева;  $t$  — время воздействия.

В разделе 2.2 приводятся результаты численных экспериментов, где использовались следующие исходные параметры:

для искусственных капель -  $r_2 = 300, 600, 1000, 1800 \text{ мкм}$ ;

$$n_2 = 10^3, 5 \cdot 10^3, 10^4 \text{ м}^{-3};$$

для капель тумана -  $r_1 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 14, 15, 16 \text{ мкм}$ ;

$$n_1 = 9 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}.$$

Расчеты проведены для интервала времени 120 с. Рассчитано 48 вариантов АВ искусственными каплями на туман. Ниже представлены расчетные данные одного из этих вариантов:

Исходные данные для искусственных капель:

$n_2$ - концентрация ( $\text{м}^{-3}$ )	5000
$q_2$ - водность ( $\text{г}/\text{м}^3$ )	20,9
$r_2$ - радиус ( $\text{мкм}$ )	1000
$v_2$ - скорость падения ( $\text{м}/\text{с}$ )	6,49

Исходные данные для капель тумана:

$n_1$ - концентрация ( $\text{м}^{-3}$ )	$9 \cdot 10^8$
$q_1$ - водность ( $\text{г}/\text{м}^3$ )	12,51
$r_1$ - радиус ( $\text{мкм}$ )	14, 15, 16

Таблица 1 - Изменение характеристик тумана со временем при коагуляции с искусственными каплями

Время, t (сек)	Концентрация, $n_1$ ( $\text{м}^{-3}$ )	Водность, $q_1$ ( $\text{г}/\text{м}^3$ )	МДВ, L (м)
0	$9 \cdot 10^8$	12,51	3,1
5	$5,7 \cdot 10^8$	7,95	3,96
10	$3,62 \cdot 10^8$	5,04	6,25
15	$2,29 \cdot 10^8$	3,195	12,1
20	$1,46 \cdot 10^8$	2,025	17,3
25	$0,92 \cdot 10^8$	1,278	30,3
30	$5,84 \cdot 10^7$	0,812	47,8
35	$3,71 \cdot 10^7$	0,514	75,4
40	$2,35 \cdot 10^7$	0,326	119
45	$1,49 \cdot 10^7$	0,206	188
50	$0,95 \cdot 10^7$	0,131	297
55	$5,99 \cdot 10^6$	0,083	468
60	$3,8 \cdot 10^6$	0,053	738
65	$2,41 \cdot 10^6$	0,033	1167
70	$1,53 \cdot 10^6$	0,021	1833
75	$0,97 \cdot 10^6$	0,013	2900
80	$6,14 \cdot 10^5$	0,0085	4567
85	$3,89 \cdot 10^5$	0,0054	7200
90	$2,47 \cdot 10^5$	0,0034	11333
95	$1,57 \cdot 10^5$	0,0022	17889
100	$1,0 \cdot 10^5$	0,0014	22950
105	$6,29 \cdot 10^4$	0,0009	44667
110	$4,0 \cdot 10^4$	0,0006	70333
115	$2,53 \cdot 10^4$	0,0004	111000
120	$1,6 \cdot 10^4$	0,0002	175556

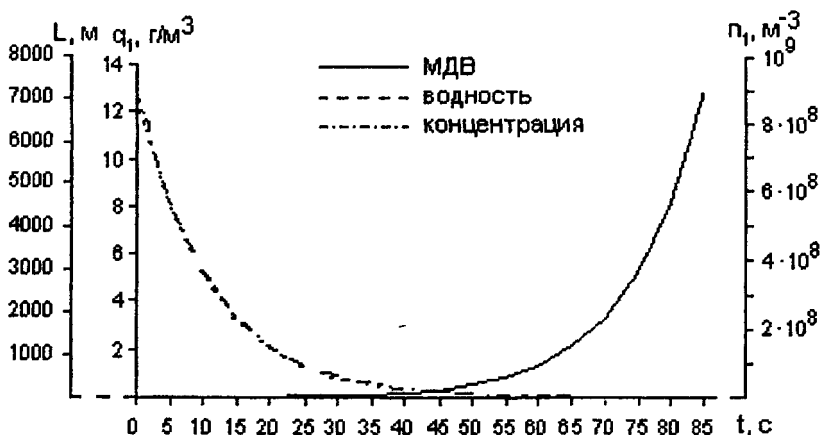


Рис. 1 – Зависимость параметров тумана от времени при АВ

Из табл. 1 и рис. 1 видно как быстро (за 85 с) убывают концентрация капель тумана (до  $3,89 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$ ) и его водность (до  $q_1 = 0,0054 \text{ г/м}^3$ ) при АВ. Одновременно идет рост МДВ с 3,1 м до 7200 м. За 60 с МДВ достигает значения 738 м, что является очень высоким показателем в плане оперативности воздействия. При этом расход воды составляет:  $M_{\text{мин}} = 26 \text{ т}$  и  $M_{\text{мах}} = 105 \text{ т}$ .

Далее в разделе 2.3 затрагиваются различные технические устройства для создания искусственных капель воды и возможность использования для рассеяния теплых туманов и низких слоистых облаков самолетов отечественного производства, способных заправляться водой во время полета над водоемом (озеро и т.д.)- В качестве импульсно-струйных устройств для рассеивания тумана приводятся технические характеристики переносного лафетного ствола ПЛС-20П и аэродромного пожарного автомобиля АА-60(7310)-160.01.

В разделе 2.4 представлена методика расчетов рассеяния тумана тепловым методом, аналогичная приведенной в работах Л.Г. Качурина. Данный этап работы предполагает оценку возможности прогрева теплого тумана над ВПП с применением бензина, керосина, ацетилен и водорода при отсутствии ветра и при его наличии.

В случае равномерного прогрева объема тумана  $V$  над ВПП площадью  $100 \times 1000 \text{ м}^2$  до высоты  $h = 100 \text{ м}$  с целью увеличения МДВ при штиле для прогрева всего объема на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  необходимо количество тепла (табл.2):

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (7)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $c_p$  -удельная теплоемкость воздуха.

При этом расход горючего вещества  $P$  на весь подогреваемый объем воздуха определялся по формуле

$$P = \frac{Q}{\alpha}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — теплотворная способность вещества.

Результаты расчетов для различных веществ представлены в табл. 2.

Таблица 2 — Расход горючего вещества при штילевых условиях

Вещество	$\alpha$ , МДж/кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$Q$ , ГДж	$\Delta T$ , °С	Расход, $P$ , кг
Бензин	44 – 47	10 <sup>7</sup>	12,6	1	280
Керосин	44 – 46				280
Ацетилен	48,1				263
Водород	120				105

При наличии ветра с постоянной скоростью  $v = 1$  м/с перпендикулярно ВПП для равномерного прогрева на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  полосы тумана длиной  $l$  до высоты  $h$  потребуется в 1 с количество тепла

$$\frac{dQ}{dt} = l \cdot h \cdot v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T. \quad (9)$$

Расход горючего вещества рассчитывался по формуле:

$$P = \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{1}{\alpha}. \quad (10)$$

Результаты расчетов для различных веществ представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Расход горючего вещества при ветре с  $v = 1$  м/с

Вещество	$\alpha$ , МДж/кг	$l$ , м	$h$ , м	$dQ/dt$ , МДж/с	$\Delta T$ , °С	Расход, $P$ , кг/с
Бензин	44 – 47	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	126	1	2,8
Керосин	44 – 46					2,8
Ацетилен	48,1					2,6
Водород	120					1,1

С увеличением скорости ветра расход горючего вещества увеличится. Из результатов расчетов следует, что водород обладает наибольшей теплотворной способностью. Создание и применение безопасной водородной технологии АВ по рассеянию теплого тумана позволит сократить расход горючего почти в 3 раза по сравнению с другими веществами.

В разделе 2.5 исследуется рассеяние тумана динамическим методом. В данном методе рассеивание тумана происходит за счет опускания и одновременного вовлечения ненасыщенного воздуха из верхних слоев в нижние с помощью системы устройств (компрессоры, вентиляторы и т.д.), выкачивающих воздух (туман) из просветляемой зоны.

Скорость опускания верхней границы тумана определяется формулой:

$$w_T = \frac{m_n \cdot N_K}{S}, \quad (11)$$

где  $m_n$  — производительность одного устройства;  $N_K$  — их количество,  $S$  — площадь рассеяния.

Результаты расчетов, полученные по формуле (11), приведены в табл. 4.

Таблица 4 - Изменение скорости опускания верхней границы тумана

Производительность устройства, $m_n$ ( $м^3/мин$ )	Число устройств, $N_K$	Скорость опускания верхней границы тумана, $W_T(М/МНН)$
6000	15	0,9
	20	1,2
	25	1,5
	30	1,8
	35	2,1
	40	2,4
12000	15	1,8
	20	2,4
	25	3,0
	30	3,6
	35	4,2
	40	4,8

В результате расчетных оценок получено, что увеличение числа устройств на пять единиц приводит к увеличению скорости опускания верхней границы тумана на 0,3 м/мин (при  $m_n = 6000 \text{ м}^3/мин$ ) и на 0,6 м/мин (при  $m_n = 12000 \text{ м}^3/мин$ ) над ВПП.

Таким образом, оперативное рассеяние туманов динамическим методом эффективно при использовании выкачивающих воздух устройств мощностью  $m_n \geq 12000 \text{ м}^3/мин$ .

В третьей главе представлена разработанная автором численная модель описывающая метод рассеяния переохлажденных туманов кристаллизующим реагентом.

Цель исследования в настоящей главе диссертации заключается в оценке времени рассеяния тумана, конечного размера ледяных кристал -

лов и МДВ в тумане в зависимости от концентрации кристаллов при АВ кристаллизующим реагентом.

Описывается методика расчетов характеристик тумана при АВ льдообразующими реагентами, рассматриваются моно- и полидисперсные туманы. Рассеяние переохлажденных туманов достаточно эффективно осуществляется при внесении в них сравнительно небольшого числа искусственных ледяных кристаллов.

Физика АВ при этом заключается в том, что вследствие разности парциального давления насыщенного водяного пара над водой и льдом происходит перегонка пара с капель на кристаллы. Если концентрация ледяных кристаллов существенно меньше, чем капель, то перераспределение взвешенной в воздухе воды с большего числа частиц на меньшее приводит к резкому увеличению дальности видимости.

Формулы для скорости испарения капель и сублимационного роста ледяных кристаллов имеют вид:

$$\frac{dr_e}{dt} = D \frac{\rho_{ex}}{\rho_e} \frac{1}{r_e} \frac{\mu}{M} \frac{E_e}{P} (f - 1),$$

$$\frac{dr_l}{dt} = D \frac{\rho_{ex}}{\rho_l} \frac{1}{r_l} \frac{\mu}{M} \frac{E_e}{P} \left( f - \frac{E_l}{E_e} \right), \quad (13)$$

где  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии пара;  $\rho_{ex}$ ,  $P$  - плотность и давление воздуха;  $\rho_v$ ,  $\rho_l$  - плотность воды и льда;  $\mu$ ,  $M$  - молярные массы водяного пара и воздуха;  $E_v$ ,  $E_l$  - давление насыщенного водяного пара при температуре тумана над водой и льдом;  $f$  - относительная влажность воздуха.

В уравнениях (12) и (13) кроме  $r_v$  и  $r_l$  от времени зависит также и относительная влажность  $f$ . Для определения ее используется уравнение баланса парообразной и сконденсировавшейся влаги в тумане:

$$\frac{4}{3} \pi r_v^3 \rho_v n_v + \frac{4}{3} \pi r_l^3 \rho_l n_l + \frac{\mu}{M} \frac{f E_e}{P} \rho_{ex} =$$

$$= \frac{4}{3} \pi r_{0v}^3 \rho_v n_v + \frac{4}{3} \pi r_{0l}^3 \rho_l n_l + \frac{\mu}{M} \frac{f_0 E_e}{P} \rho_{ex}, \quad (14)$$

где параметры  $r_{0v}$ ,  $r_{0l}$ ,  $f_0$  соответствуют моменту начала воздействия ( $t = 0$ ).

Совместное численное решение уравнений (12), (13), (14) и (4) требует высокой точности вычислений и подбора временных шагов.

В главе приводятся также результаты расчетов,- которые получены при следующих значениях термодинамических и микрофизических параметров:

Температура воздуха (тумана):  $-5; -10^{\circ}\text{C}$ .  
 Атмосферное давление: 950; 1000 мб.  
 Средний радиус капель тумана: 4; 5; 10 мкм.  
 Радиус искусственных ледяных кристаллов: 2; 5; 10; 20 мкм.  
 Водность тумана: 0,2; 0,3; 0,6; 0,9 г/м<sup>3</sup>.

Рассчитано 12 вариантов АВ на туман искусственными ледяными кристаллами. В каждом расчете при разных концентрациях искусственных ледяных частиц определены следующие параметры: время наступления просветления, радиус, до которого вырастут ледяные частицы и дальность видимости, которая при этом установится.

Здесь приведены результаты расчетов для монодисперсного (табл. 5, рис.2) и полидисперсного туманов (табл. 6, рис.3):

Исходные данные для рассеяния монодисперсного тумана:

Температура воздуха (тумана):  $t_a = -5^{\circ}\text{C}$   
 Давление воздуха:  $P = 1000 \text{ мб}$   
 Водность тумана:  $q_1 = 0,2 \text{ г/м}^3$   
 Средний радиус капель тумана:  $r_{\text{ср}} = 5 \text{ мкм}$   
 Концентрация капель тумана:  $n_1 = 3,82 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$   
 Дальность видимости до воздействия:  $L_0 = 65 \text{ м}$   
 Радиус искусственных кристаллов:  $r_0 = 2 \text{ мкм}$

Таблица 5 - Результаты расчетов по рассеянию монодисперсного тумана

Концентрация ледяных частиц, $n_l (\text{м}^{-3})$	Время просветления, $t_{\text{пр}} (\text{мин})$	Конечный радиус кристаллов, $r_l (\text{мкм})$	МДВ, L (м)
$10^4$	60,8	168	2190
$5 \cdot 10^4$	22,4	102	1189
$10^5$	14,0	81	950
$2 \cdot 10^5$	9,0	64	746
$3 \cdot 10^5$	6,8	56	654
$4 \cdot 10^5$	5,6	51	596
$5 \cdot 10^5$	4,9	48	547
$6 \cdot 10^5$	4,4	45	513
$7 \cdot 10^5$	4,1	43	476
$10^6$	3,1	38	429

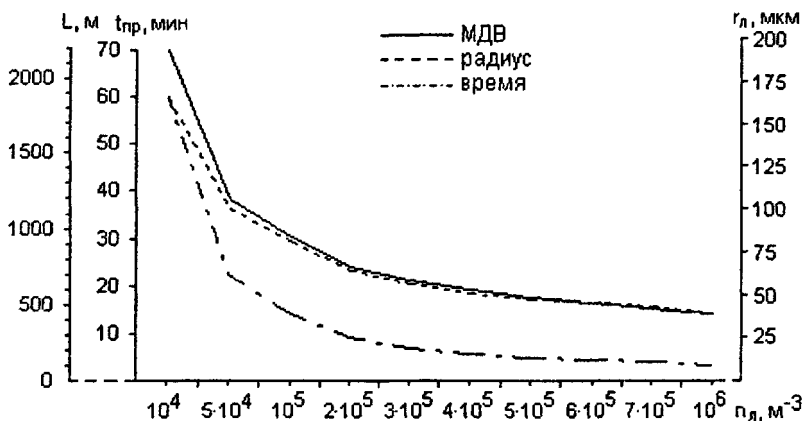


Рисунок 2 – Зависимость  $t_{пр}$ ,  $r_л$  и  $L$  от концентрации искусственных кристаллов

При введении в туман ледяных кристаллов с концентрацией  $2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}$  МДВ увеличивается на 679 м (табл. 5, рис. 2).

Исходные данные для рассеяния полидисперсного тумана:

Температура воздуха (тумана):	$t_b = -5^\circ\text{C}$
Давление воздуха:	$P = 1000 \text{ мб}$
Водность тумана:	$q_1 = 0,3 \text{ г/м}^3$
Средний радиус капель тумана:	$r_{1cp} = 5 \text{ мкм}$
Концентрация капель тумана:	$n_1 = 5,73 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$
Дальность видимости до воздействия:	$L_0 = 43 \text{ м}$
Радиус искусственных кристаллов:	$r_0 = 2 \text{ мкм}$

Таблица 6 - Результаты расчетов по рассеянию полидисперсного тумана

Концентрация ледяных частиц, $n_л (\text{м}^{-3})$	Время просветления, $t_{пр} (\text{мин})$	Конечный радиус кристаллов, $r_л (\text{мкм})$	МДВ, $L (\text{м})$
$10^4$	90,5	204	1485
$5 \cdot 10^4$	36,6	129	748
$10^5$	24,4	105	564
$2 \cdot 10^5$	16,1	84	435
$3 \cdot 10^5$	13	75	368
$4 \cdot 10^5$	10,7	68	336
$5 \cdot 10^5$	9,9	64	304
$6 \cdot 10^5$	8,5	60	290
$7 \cdot 10^5$	7,8	57	274
$10^6$	6,9	51	236

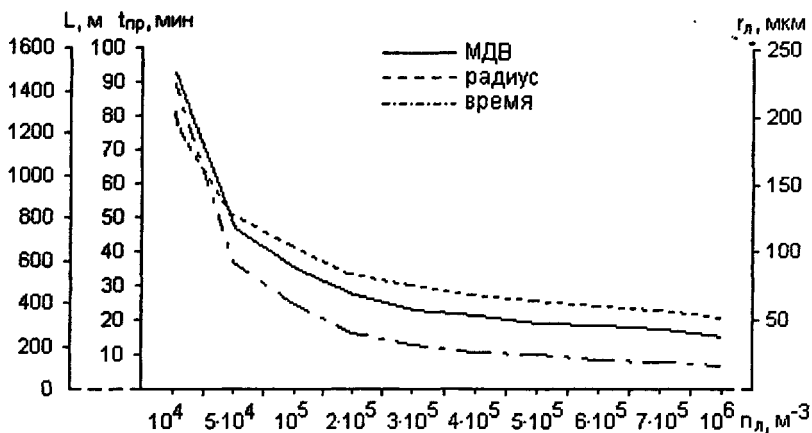


Рисунок 3 - Зависимость  $t_{\text{пр}}$ ,  $r_d$  и  $L$  от концентрации искусственных кристаллов

За 16 минут при заданной концентрации капель тумана МДВ увеличивается на 392 м (с 43 до 435 м) (табл. 6, рис. 3).

В заключении приводятся основные выводы, полученные при численном моделировании АВ на туманы, и даются рекомендации по использованию результатов исследований диссертационной работы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

В настоящей диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Усовершенствован алгоритм расчета рассеяния тумана искусственными водяными каплями с применением детальных микрофизических интегро-дифференциальных уравнений и экспериментальных значений коэффициента слияния частиц.

2. Выполнены численные расчеты вымывания капель тумана диаметром 1 — 16 мкм искусственными водяными каплями радиусом 300, 600, 1000 и 1800 мкм. При этом получено, что:

2.1. Рассеяние тумана искусственными каплями радиусом 300 мкм с концентрациями  $10^3 - 10^4 \text{ м}^{-3}$  не вызывает существенного увеличения метеорологической дальности видимости (МДВ) для капель тумана размерами 1-16 мкм.

2.2. В случае АВ на туман каплями радиусом 600 мкм с концентрацией  $10^3 \text{ м}^{-3}$  увеличение МДВ составляет порядка 22 м. При их концентрации  $5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$  - 181 м. Для капель с концентрацией  $10^4 \text{ м}^{-3}$  МДВ увеличивается на 1032 м за 120 с. Расход воды в последнем случае составляет 27 т для площади  $25 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ .

2.3. Для капель размером 1000 мкм и концентрацией  $10^3 \text{ м}^{-3}$  рост МДВ составляет 109 м. При концентрациях крупных капель от  $5 \cdot 10^3$  до  $10^4 \text{ м}^{-3}$  МДВ достигает высоких значений за короткое время (15 - 45 с) с расходом воды 21 т для площади  $25 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ .

2.4. Воздействие каплями радиусом 1800 мкм вызывает значительное увеличение МДВ при концентрациях искусственных капель  $10^3 - 10^4 \text{ м}^{-3}$ . Значение МДВ увеличивается на 500 м и более за 10 - 30 с.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что процесс вымывания искусственными каплями частиц тумана при определенном соотношении их размеров достаточно эффективен.

Данный метод может использоваться также для очищения воздуха от различных микропримесей.

3. Проведены расчетные оценки воздействия на теплый туман с помощью высококалорийных источников тепловой энергии. Получено, что в случае равномерного прогрева тумана объемом  $10^7 \text{ м}^3$  на ГС для полного его рассеяния потребуется расход бензина или керосина - 280 кг ( $0,028 \text{ г/м}^3$ ), ацетилен - 263 кг ( $0,026 \text{ г/м}^3$ ), водорода - 105 кг ( $0,012 \text{ г/м}^3$ ). При этом, чем выше температура воздуха и ниже скорость ветра, тем меньше будет расход горючего материала. Создание и применение нетрадиционной и безопасной водородной технологии рассеяния тумана позволит сократить расход горючего в 2,7 раза по сравнению с традиционным методом с применением керосина и повысить экологичность и оперативность данного метода.

4. Исследован процесс АВ на туман динамическим методом с использованием устройств различной производительности ( $m_n$ ). Получено, что при размещении на площади  $10^5 \text{ м}^2$  устройств рост их числа на 5 единиц приводит к увеличению скорости опускания верхней границы пелены-тумана на 0,3 м/мин (при  $t_n$  равном  $6000 \text{ м}^3/\text{мин}$ ) и на 0,6 м/мин (при  $m_n$  равном  $12000 \text{ м}^3/\text{мин}$ ). Увеличение производительности устройств может сократить время рассеивания тумана за счет увеличения скорости опускания верхней границы тумана и повысить оперативность применения динамического метода воздействия.

5. Выполнены расчеты по воздействию на переохлажденный туман искусственными кристаллами. Получено, что время просветления переохлажденных туманов существенным образом зависит от концентрации вносимых искусственных кристаллов и может составлять от единиц до десятков минут. При концентрациях кристаллов  $3 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}$  и более время рассеивания составляет в среднем 5 — 7 мин, при этом МДВ увеличивается на 500 и более метров. Получено, что для создания зон просветления в тумане мощностью 200 - 300 м необходимо вносить реагент в концентрации  $10^6 \text{ м}^{-3}$ . При этом оценочное время наступления просветления составляет 3 — 5 минут в зависимости от водности тумана и его дисперсности. Скорость просветления тумана зависит от среднего размера капель: с увеличением радиуса время их испарения увеличивается. При понижении температуры или давления воздуха МДВ увеличивается на единицы и десятки, редко на сотни метров.

Результаты теоретического исследования изменения характеристик теплых и переохлажденных туманов при активном воздействии позволяют совершенствовать методы и технические средства АВ на них.

Основные материалы диссертации опубликованы в  
следующих работах:

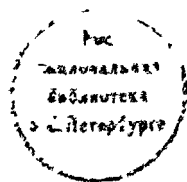
1. Калов Х.М., Мамучиев И.М. О рассеивании тумана с использованием импульсно-струйных устройств // Журнал "Метеоспектр", 2005.- Вып.1.-С.5-8.
2. Калов Х.М., Мамучиев И.М. Рассеяние туманов и низких слоистых облаков на автодорогах и пристанях с помощью импульсно-струйных устройств // Тезисы докладов на совещании-семинаре "Совершенствование специализированного гидрометеорологического обеспечения транспортных отраслей", Уфа.-2004.-С.50-51.
3. Мамучиев И.М., Пискунова Е.Г., Шаповалов А.В. Применение искусственных водяных капель для рассеяния теплых туманов: численный эксперимент // Материалы 50-й юбилейной научно-методической конференции СГУ "Университетская наука - региону", Ставрополь, 2005.-С.90-93.
4. Мамучиев И.М., Созаева Л.Т., Шаповалов А.В. Расчетные оценки рассеяния теплых туманов искусственными водяными каплями // Обозрение прикладной и промышленной математики.-2004.-Т.П.- Вып.4.-С. 876.
5. Пискунова Е.Г., Мамучиев И.М., Шаповалов А.В. Некоторые результаты расчетов вымывания микропримесей из атмосферы туманами и осадками // Материалы 50-й юбилейной научно-методической конференции СГУ "Университетская наука - региону", Ставрополь, 2005.-С.99-100.
6. Шаповалов А.В., Мамучиев И.М. К вопросу о применении кристаллизующего реагента для рассеяния переохлажденных туманов // Известия Кабардино-Балкарского Научного Центра Российской Академии Наук, 2004.-Вып.2(12).-С. 65 - 68.
7. Шаповалов А.В., Мамучиев И.М. Расчетные оценки рассеяния переохлажденных туманов кристаллизующим реагентом // Обозрение прикладной и промышленной математики.-2004.-Т.11.-Вып.3.-С. 682 - 683.

ЛР № 040940 от 04.02.1999

Формат 84x1087<sub>32</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Тайме».  
Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 17

360000, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37"а".  
Издательство КБНЦ РАН  
Тел. (8662) 42-65-42

09 ИЮЛ 2005



1690