

Численные эксперименты по рассеянию теплых туманов искусственными каплями

Х.М. Калов, А.В. Шаповалов, Р.Х. Калов, А.А. Черкесов

Высокогорный геофизический институт, Нальчик

Аннотация: Проведены уточненные расчеты по исследованию возможности рассеяния туманов искусственными каплями. Модель описывает падение капель радиусом r_2 сквозь туман, состоящий из капель радиусом r_1 , концентрация которых равна n_1 . Используются детальные уравнения гравитационной коагуляции с учетом гидродинамического взаимодействия капель. Исследованы временные характеристики рассеяния тумана (увеличение дальности видимости) в зависимости от размеров искусственных капель и их концентрации. Определены размер искусственных капель и их концентрация, при которых достигается максимальный эффект по рассеянию тумана.

Ключевые слова: рассеяние теплых туманов, метеорологическая дальность видимости, концентрация капель тумана, водность тумана, искусственное воздействие на туман.

Введение

Для рассеяния теплых туманов используются различные методы: непосредственное сжигание топлива в тумане; электрическое нагревание тумана; введение в туман потоков или струй теплого и сухого воздуха; использование лучистой энергии для непосредственного испарения гидрометеоров в тумане; с помощью взрывов высокотеплотворных веществ и др. [1 – 3]. В настоящей работе для рассеяния теплых туманов используются искусственно разбрызгиваемые водяные капли. Используемая модель описывает падение искусственных водяных капель радиусом r_2 сквозь туман, состоящий из капелек радиусом r_1 , концентрация которых равна n_1 . Используются детальные уравнения гравитационной коагуляции с учетом гидродинамического взаимодействия искусственных капель с капельками тумана. Рассчитаны временные характеристики рассеяния тумана (увеличение дальности видимости) в зависимости от размеров искусственных капель и их концентрации. При анализе результатов исследований применялись, в том числе, технологии численного моделирования, предложенные в работе [4].

Методика и результаты численных экспериментов

В исследованиях по рассеянию теплых туманов путём разбрызгивания воды, проводившихся многими авторами и с разными подходами к этой проблеме, были получены неоднозначные результаты. В частности, качественный анализ искусственного воздействия на туман в камере туманов каплями воды размером 100-200 мкм был сделан Демоном [5, 6]. Израэль и Кастен, воздействуя на рассеивающийся туман каплями воды размером более 1000 мкм, получили относительное улучшение метеорологической дальности видимости (МДВ) до 17%. При воздействии на «равновесный» туман с видимостью около 2 м, поддерживаемой непрерывной работой распылителей в камере, было получено улучшение МДВ на 22% [7].

В работе Шишкина [8] дается приближенная оценка процесса рассеивания тумана со средним радиусом капель 5 мкм и их концентрацией 10^8 м^{-3} при внесении в него искусственных капель воды радиусом 50 мкм и 100 мкм. Согласно исследованиям Шишкина, распыление воды для рассеяния тумана не может дать нужного эффекта.

При проведении расчетов в [8] не учитывались такие важные аспекты как гидродинамическое взаимодействие капель при их движении и коэффициент захвата, что не могло не отразиться на конечных результатах.

Целью данной работы являлось более детальное исследование процесса рассеяния тумана при внесении в него искусственных капель воды.

В действительности, даже с учетом всех неучтенных в [8] физических параметров в области мелких частиц тумана, согласно нашим расчетам, активное воздействие почти не дает положительного эффекта. В то же время при определенных размерах искусственных капель ($r_2 = 600 \text{ мкм}$, 1000 мкм , 1800 мкм) и их концентрациях получается значительный

эффект при рассеянии тумана, особенно в области размеров капель тумана от 8 до 16 мкм.

В работе представлены некоторые результаты численных расчетов по оценке скорости вымывания частиц тумана искусственными водяными каплями.

Расчеты проводились для капель тумана трех фракций с радиусами в диапазоне 1-16 мкм при заданной их концентрации и влажности тумана. При этом оценивалось изменение концентрации, влажности и МДВ в тумане с течением времени $t = 120$ с при внесении в него искусственных капель воды размерами 300, 600, 1000, 1800 мкм и концентрациями $10^3 - 10^4$ м⁻³. Причем, для каждого размера искусственных капель исследовался процесс рассеивания тумана при всех указанных концентрациях поочередно, т.е. падение искусственных капель, например, с $r_2 = 300$ мкм в тумане рассматривалось сначала для $n_2 = 10^3$ м⁻³, затем при $n_2 = 5 \cdot 10^3$ м⁻³ и далее при $n_2 = 10^4$ м⁻³.

В данной работе формализована задача распыления воды с помощью специального оборудования. В отличие от ранее выполненных работ других авторов (например [8]), здесь учтены коэффициенты слияния капель и использованы детальные уравнения коагуляции.

Модель построена в предположении падения искусственных капель радиусом r_2 и концентрацией n_2 сквозь туман, состоящий из капель радиусом r_1 , концентрация которых равна n_1 .

Число столкновений, которое испытывает за время dt искусственная капля радиусом r_2 , падающая сквозь туман с частицами радиусом r_1 , имеет вид [5]

$$dN_{12} = K(r_1, r_2)n_1dt, \quad (1)$$

где $K(r_1, r_2)$ - коэффициент коагуляции, зависящий от размера капель; $K(r_1, r_2)$ - число капель радиусом r_1 , которые в течение 1 с сталкиваются с

искусственной каплей радиусом r_2 , т.е. поток капель радиусом r_1 на искусственную каплю радиусом r_2 .

С учетом гидродинамического взаимодействия $K(r_1, r_2)$ определяется соотношением [9]:

$$K(r_1, r_2) = \pi \cdot (r_1 + r_2)^2 \cdot |V_1 - V_2| \cdot E(r_1, r_2) , \quad (2)$$

где $E(r_1, r_2) = r_0^2 (r_1 + r_2)^2$ - коэффициент захвата; V - скорость седиментации капель тумана радиусом r_1 ; V_2 - скорость седиментации искусственных капель радиусом r_2 .

Изменение концентрации капель тумана происходит за счет вымывания их искусственными каплями, т.е. за счет убыли мелких капель при коагуляции с искусственными каплями и последующим выпадением в виде осадков.

Убыль мелких капель рассчитывается по следующей формуле [10]:

$$\frac{\partial f_1(m)}{\partial t} = -f_1(m) \cdot \int_0^{\infty} K(m, m') \cdot f_2(m') dm' , \quad (3)$$

где $f_1(m)$ - функция распределения по массам капель тумана; $f_2(m)$ - функция распределения по массам искусственных капель.

В модели сделаны допущения, что ростом искусственных капель (т.е. изменением их радиуса) можно пренебречь и, что капли тумана имеют пренебрежимо малую скорость падения (т.е. $V_1 = 0$).

Скорость падения искусственных капель V_2 и коэффициенты захвата $E(r_1, r_2)$ рассчитывались по аппроксимационным формулам [11, 12].

С учетом сделанных выше предположений интегро-дифференциальное уравнение (3) можно записать в дискретной форме:

$$\frac{\Delta f_1^i}{\Delta t} = -f_1^i \cdot \sum_j K(i, j) \cdot f_2^j \cdot \Delta m_j , \quad (4)$$

где f_1^i - дискретный аналог функции распределения капель тумана; f_2^j - дискретный аналог функции распределения искусственных капель.

Для решения (4) применяются численные методы высокого порядка точности [13].

При расчетах были использованы таблицы для коэффициентов захвата для искусственных капель и табличные данные скорости их падения.

Уравнение (4) позволяет вычислить функцию распределения капель тумана за счет захвата искусственными каплями. Через f_1^i определялась концентрация мелких капель:

$$n_1 = \sum_i f_1^i \cdot \Delta m_i, \quad (5)$$

где Δm_i - интервал массы частиц тумана, соответствующий изменению радиуса частиц от r_1 до $r_1 + dr_1$.

Водность капель тумана определялась по формуле

$$q_1 = \sum_i m_i \cdot f_1^i \cdot \Delta m_i. \quad (6)$$

МДВ при рассеивании тумана рассчитывалась по формуле [14]

$$L = \frac{b}{n_1 \cdot r_1^2 + n_2 \cdot r_2^2}, \quad (7)$$

где b – безразмерный коэффициент, равный 0,62; n_1 и n_2 – концентрации капель тумана и искусственных капель, соответственно; r_1 и r_2 – их радиусы.

Второе слагаемое в знаменателе выражения (7) исключается, так как искусственные капли выпадают на землю. Таким образом,

$$L = \frac{b}{n_1 \cdot (\bar{r})^2}, \quad (8)$$

где \bar{r} – средний радиус капель тумана.

На основе изложенной выше методики и представленных алгоритмов были выполнены расчеты по рассеянию тумана с различными характеристиками при активном воздействии на него искусственными каплями воды.

В таблице №1 приводятся некоторые из полученных результатов, в частности, для искусственных капель радиусом 600 мкм с $n_2 = 10^4 \text{ м}^{-3}$ и радиусом 1000 мкм с концентрацией $n_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$.

Таблица № 1

Изменение характеристик тумана со временем при коагуляции с искусственными каплями

Исходные данные до воздействия	Изменение характеристик тумана после воздействия			
	Время $t, \text{ с}$	Концентрация $n_1, \text{ м}^{-3}$	Водность $q_1, \text{ г/м}^3$	МДВ $L, \text{ м}$
1	2	3	4	5
для искусственных капель: $n_2 = 10^4 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 9,04 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 600 \text{ мкм}$, $V_2 = 4,64 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 0,0406 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 1, 2, 3 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	0,0406	151
	10	9,32E+08	0,0364	167
	20	8,71E+08	0,0326	184
	30	8,15E+08	0,0293	203
	40	7,64E+08	0,0263	224
	50	7,18E+08	0,0237	246
	60	6,76E+08	0,0213	269
	70	6,38E+08	0,0193	295
	80	6,03E+08	0,0174	322
	90	5,70E+08	0,0158	351
	100	5,41E+08	0,0143	383
	110	5,14E+08	0,0130	416
120	4,89E+08	0,0118	451	
для искусственных капель: $n_2 = 10^4 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 9,04 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 600 \text{ мкм}$, $V_2 = 4,64 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 0,523 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 4, 5, 6 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	0,523	25,3
	10	7,48E+08	0,387	34,1
	20	5,61E+08	0,286	45,9
	30	4,20E+08	0,212	61,8
	40	3,16E+08	0,157	83,0
	50	2,37E+08	0,116	111
	60	1,78E+08	0,0863	150
	70	1,34E+08	0,0641	200
	80	1,01E+08	0,0477	268
	90	7,63E+07	0,0355	359
	100	5,76E+07	0,0264	480
	110	4,35E+07	0,0197	641
120	3,29E+07	0,0147	855	

Продолжение таблицы № 1

1	2	3	4	5
для искусственных капель: $n_2 = 10^4 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 9,04 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 600 \text{ мкм}$, $V_2 = 4,64 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 3,01 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 8, 9, 10 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	3,01	7,78
	10	6,71E+08	2,01	11,6
	20	4,51E+08	1,35	17,3
	30	3,03E+08	0,904	25,8
	40	2,03E+08	0,606	38,5
	50	1,37E+08	0,406	57,4
	60	9,18E+07	0,272	85,5
	70	6,16E+07	0,182	127
	80	4,14E+07	0,122	190
	90	2,78E+07	0,082	283
	100	1,87E+07	0,0550	422
	110	1,26E+07	0,0369	629
	120	8,44E+06	0,0247	937
для искусственных капель: $n_2 = 10^4 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 9,04 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 600 \text{ мкм}$, $V_2 = 4,64 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 13,9 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 14, 15, 16 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	13,9	2,79
	10	6,40E+08	8,92	4,36
	20	4,10E+08	5,70	6,81
	30	2,62E+08	3,65	10,6
	40	1,68E+08	2,33	16,6
	50	1,07E+08	1,49	26,0
	60	6,88E+07	0,955	40,6
	70	4,40E+07	0,611	63,5
	80	2,82E+07	0,391	99,2
	90	1,80E+07	0,250	155
	100	1,16E+07	0,160	242
	110	7,40E+06	0,102	378
	120	4,74E+06	0,0655	591

Продолжение таблицы № 1

1	2	3	4	5
для искусственных капель: $n_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 20,9 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 1000 \text{ мкм}$, $V_2 = 6,49 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 0,0406 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 1, 2, 3 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	0,0406	151
	10	8,72E+08	0,0317	188
	20	7,70E+08	0,0250	230
	30	6,88E+08	0,0200	278
	40	6,21E+08	0,0163	332
	50	5,67E+08	0,0133	392
	60	5,21E+08	0,0111	457
	70	4,83E+08	0,00931	527
	80	4,51E+08	0,00791	602
	90	4,23E+08	0,00678	682
	100	4,00E+08	0,00587	765
	110	3,80E+08	0,00512	852
	120	3,62E+08	0,00451	941
для искусственных капель: $n_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 20,9 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 1000 \text{ мкм}$, $V_2 = 6,49 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 0,523 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 4, 5, 6 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	0,523	25,3
	10	5,51E+08	0,279	46,9
	20	3,05E+08	0,150	86,5
	30	1,70E+08	0,0809	159
	40	9,55E+07	0,0439	289
	50	5,39E+07	0,0240	524
	60	3,06E+07	0,0132	943
	70	1,75E+07	0,00726	1690
	80	1,00E+07	0,00404	3010
	90	5,77E+06	0,00226	5320
	100	3,35E+06	0,00127	9360
	110	1,95E+06	0,000717	16400
	120	1,14E+06	0,000408	28500

Продолжение таблицы № 1

1	2	3	4	5
для искусственных капель: $n_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 20,9 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 1000 \text{ мкм}$, $V_2 = 6,49 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 3,01 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 8, 9, 10 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	3,01	7,78
	10	4,44E+08	1,33	17,6
	20	1,97E+08	0,586	39,7
	30	8,75E+07	0,259	89,8
	40	3,89E+07	0,115	203
	50	1,73E+07	0,0507	457
	60	7,69E+06	0,0224	1030
	70	3,42E+06	0,00994	2330
	80	1,52E+06	0,00440	5240
	90	6,79E+05	0,00195	11800
	100	3,02E+05	0,00087	26600
	110	1,35E+05	0,00038	59800
120	6,01E+04	0,00017	135000	
для искусственных капель: $n_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$, $q_2 = 20,9 \text{ г/м}^3$, $r_2 = 1000 \text{ мкм}$, $V_2 = 6,49 \text{ м/с}$, для капель тумана: $n_1 = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q_1 = 13,9 \text{ г/м}^3$, $r_1 = 14, 15, 16 \text{ мкм}$	0	1,00E+09	13,9	2,79
	10	4,02E+08	5,60	6,94
	20	1,62E+08	2,25	17,3
	30	6,49E+07	0,902	43,0
	40	2,61E+07	0,362	107
	50	1,05E+07	0,145	267
	60	4,22E+06	0,0584	664
	70	1,70E+06	0,0235	1650
	80	6,82E+05	0,00942	4110
	90	2,74E+05	0,00378	10200
	100	1,10E+05	0,00152	25500
	110	4,44E+04	0,00061	63300
120	1,78E+04	0,00025	158000	

Расход воды для очистки полосы $1000 \times 100 \text{ м}^2$ при радиусе капель в 1000 мкм может составить около 120 тонн при разбрызгивании струи вверх на максимальную высоту.

Выводы. В результате проведенного численного исследования получено следующее:

С уменьшением концентрации капель тумана водность убывает, а МДВ в нем растет, причем этот процесс наиболее ярко проявляется при

воздействии крупными искусственными каплями рассматриваемого диапазона ($r = 600 - 1800$ мкм).

Рассеяние теплого тумана с помощью искусственных капель радиусом 300 мкм при указанных выше концентрациях малоэффективно. Изменение МДВ при этом составляет всего 24 м за 120 с.

Для искусственных капель радиусом 600 мкм при их концентрациях 10^4 м^{-3} наблюдается увеличение МДВ до 300 м и более за то же время.

Заметное увеличение МДВ отмечено для искусственных капель радиусом 1000 мкм при падении в тумане с размерами капель в диапазоне от 8 мкм до 16 мкм.

Значительный эффект получается в случае воздействия на туман во всем исследуемом диапазоне размеров его капель искусственными каплями радиусом 1800 мкм при рассматриваемых концентрациях $10^3 - 10^4 \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что эффект просветления достигается за время 20-60 с после воздействия в зависимости от размеров частиц тумана и от концентрации вносимых в туман капель.

Результаты, полученные в работе, дают основание для проработки возможностей создания специальных высокопроизводительных генераторов, вырабатывающих монодисперсные (или с узким спектром) капли с целью рассеивания туманов.

Кроме того, данный метод воздействия на теплые туманы характеризуется высокой оперативностью вмешательства, экологически безопасен и не требует больших затрат.

Литература

1. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы. Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т», 2010. 220 с.

2. Pu J., Yu B., Jiang A., Li Z., Zhou Sh., Wei Y., Wang W. Experimentation study on fog dissipation by jet engine devices // 8th WMO Sei. Conf. on Weath. Modif.-Casablanca.-Marocco.-2003.-PP.393-396.

3. Möller D., Wieprecht W., Hosmeister J., Kalass D., Elbing F., Ubricht M. Fog dissipation by nucleation scavenging using ice particle blasting // 8th WMO Sei. Conf. on Weath. Modif.-Marocco.-2003.-PP.389-392.

4. Шаповалов В.А. Информационная технология трехмерного представления данных измерений и численного моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: ivdon.ru/en/magazine/archive/N2y2018/4994

5. Исследование коагуляционных процессов воздействия // Труды ЦАО. Камеры туманов. 1978. Вып. 131. С. 76-82.

6. Demon L. Evolution, par coalescence provoquee, des aerosols et des brouillards. "Genue chimique", 1955. 74(4). P. 97-105.

7. Israel H., Kasten F. Die Sichtweite im Nebel und Möglichkeiten ihrer künstlichen Beeinflussung. "Forschungsberichte des Wirtschafts und Verkehrsministeriums", Nordrhein-Westfallen, 1959. №640. pp. 1-78.

8. Берлянд М.Е., Воронцов П.А., Красиков П.Н. и др. Туманы. [Под ред. Никандрова В.Я. Глав. упр. гидрометеоролог. службы при Совете Министров СССР. Глав. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова]. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 388 с.

9. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака. Строение и физика образования. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.

10. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков [Под ред. И.П. Мазина, Б.Н. Сергеева]. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 186 с.

11. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 642 с.

12. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 333 с.
13. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.
14. Бекряев В.И. Практикум по физическим основам воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 144 с.

References

1. Kalov Kh.M., Kalov R.Kh. Fizicheskiye osnovy, metody i sredstva aktivnykh vozdeystviy na grozo-gradovyye oblaka i tumany [Physical bases, methods and means of active influences on thunderstorm-hail clouds and fogs]. Nal'chik: OOO «Poligrafservis i T», 2010. 220 p.
 2. Pu J., Yu B., Jiang A., Li Z., Zhou Sh., Wei Y., Wang W. 8th WMO Sei. Conf. on Weath. Modif. Casablanca. Marocco. 2003. PP.393-396.
 3. Möller D., Wieprecht W., Hosmeister J., Kalass D., Elbing F., Ubricht M. 8th WMO Sei. Conf. on Weath. Modif. Marocco. 2003. PP.389-392.
 4. Shapovalov V.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2018. №2. URL: ivdon.ru/en/magazine/archive/N2y2018/4994
 5. Issledovaniye koagulyatsionnykh protsessov vozdeystviya. Trudy TSAO. Kamery tumanov. 1978. Vyp. 131. PP. 76-82.
 6. Demon L. Evolution, par coalescence provoquee, des aerosols et des brouillards. "Genue chimique", 1955. 74(4). P. 97-105.
 7. Israel H., Kasten F. Die Sichtweite im Nebel und Möglichkeiten ihrer künstlichen Beeinflussung. "Forschungsberichte des Wirtschafts und Verkehrsministeriums", Nordrhein-Westfallen, 1959. №640. pp. 1-78.
 8. Berlyand M.Ye., Vorontsov P.A., Krasikov P.N. i dr. Tumany [Fogs]. (Pod red. Nikandrova V.Ya. Glav. upr. gidrometeorolog. sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Glav. geofiz. observatoriya im. A.I. Voyeykova). L.: Gidrometeoizdat, 1961. 388 p.
-



9. Mazin I.P., Shmeter S.M. Oblaka. Stroyeniye i fizika obrazovaniya [Clouds. Structure and physics of formation]. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 280 p.

10. Kogan E.L., Mazin I.P., Sergeyev B.N. i dr. Chislennoye modelirovaniye oblakov [Numerical modeling of clouds]. M.: Gidrometeoizdat, 1984. 186 p.

11. Matveyev L.T. Osnovy obshchey meteorologii. Fizika atmosfery [Fundamentals of General meteorology. Atmospheric physics]. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 642 p.

12. Khrgian A.Kh. Fizika atmosfery [Atmospheric physics]. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 333 p.

13. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennyye metody. [Numerical methods]. M.: Nauka, 1987. 600 p.

14. Bekryayev V.I. Praktikum po fizicheskim osnovam vozdeystviya na atmosferynye protsessy [Workshop on physical bases of influence on atmospheric processes]. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 144 p.