

Т.В. Ярославцева

Оптимизация плотности осадка аэрозоля методом волны*Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

Рассматривается модель оптимального управления процессом последовательного формирования осадка аэрозолей на массиве полей путем выбора соответствующих размеров аэрозольных частиц и мощностей источников. Предложен численный метод нахождения оптимальных параметров обработки, основанный на сведении исходной оптимизационной задачи к последовательности одномерных задач. Проведено численное моделирование оптимальных расходов препарата и размеров аэрозольных частиц.

Введение

Одним из наиболее перспективных способов применения средств защиты растений является их использование в виде аэрозолей. Применение аэрозольных препаратов производится путем создания облака частиц определенного размера, сносимого затем боковым ветром на обрабатываемое поле. При этом имеется возможность управления рядом параметров, позволяющих оптимизировать расход препарата, уменьшить вынос аэрозоля за пределы поля и т.д. [1–4].

При обработке заданного участка частицами оптимального диаметра нередко происходит вынос значительной массы аэрозолей за его пределы, что может вызвать нежелательные последствия для окружающей среды. Однако использование аэрозольных частиц большего диаметра для уменьшения этого выноса приводит к заметному перерасходу препарата и превышению заданного уровня плотности осадка. Поэтому представляется целесообразным при наличии расположенных друг за другом по ходу аэрозольного облака нескольких полей рассмотреть задачу обработки их совокупности в целом, определив диаметры частиц и расходы препарата для обработки каждого поля отдельно. Это позволит сократить вынос аэрозоля и добиться более равномерной плотности осадка препарата на всем массиве полей Ω .

Постановка задачи

Пусть движение аэрозольного источника происходит перпендикулярно направлению ветра. Введем прямоугольную систему координат (x, y, z) следующим образом: ось OX ориентируем вдоль направления ветра, ось OZ – вертикально вверх. В качестве целевой функции примем суммарный расход аэрозольного препарата, являющийся одним из наиболее употребимых критериев, и рассмотрим задачу минимизации следующей функции:

$$\Phi = \sum_{i=1}^R Q_i \rightarrow \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{d}} \quad (1)$$

при ограничениях

$$P(\mathbf{x}, \mathbf{Q}, \mathbf{d}) = \sum_{i=1}^R Q_i w_g(d_i) I_i(\mathbf{x}, d_i) \geq P_0; \quad (2)$$

$$Q_i \geq 0, i = \overline{1, R}, (x, y, 0) \in \Omega, \quad (3)$$

где R – число полей, подлежащих обработке; Q_i – расход препарата на 1 м пути при проходе источника аэрозолей вдоль i -го поля; d_i – диаметр частиц; $\mathbf{Q} = (Q_1, \dots, Q_R)$; $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_R)$; $P(\mathbf{x})$ – плотность осадка аэрозоля в точке \mathbf{x} ; P_0 – требуемый уровень плотности осадка препарата; $w_g(d)$ – скорость седиментации аэрозольных частиц; $I_i(\mathbf{x}, d_i)$ – импульс концентрации, нормированный на единичный линейный расход препарата при движении аэрозольного генератора вдоль i -го поля:

$$I_i(\mathbf{x}, d_i) = \int_0^T c_i(t, \mathbf{x}, d_i) dt,$$

$c(t, \mathbf{x}, d)$ – концентрации в воздухе аэрозольного вещества; T – время прохождения аэрозольного облака над обрабатываемым массивом.

Для описания поля концентрации воспользуемся следующим уравнением [3–5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial t} + u(z) \frac{\partial c_i}{\partial x} - w_g(d_i) \frac{\partial c_i}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial z} v(z) \frac{\partial c_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial c_i}{\partial y} + Q_i f_i(t, \mathbf{x}) \end{aligned} \quad (4)$$

с граничными и начальными условиями

$$\begin{aligned} \left(v \frac{\partial c_i}{\partial z} + (w_g - \beta) c_i \right) \Big|_{z=0} = 0, c_i \Big|_{z=H} = 0, \\ c_i \Big|_{t=0} = 0, i = \overline{1, R}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $u(z)$ – скорость ветра в направлении оси OX ; k_y , $v(z)$ – коэффициенты турбулентной диффузии вдоль осей OY , OZ соответственно; β – коэффициент, характеризующий взаимодействие примеси с подстилающей

поверхностью; $f_i(t, \mathbf{x})$ – функции, описывающие расположение нормированных источников аэрозоля.

Метод решения

Рассмотрим случай массива полей, последовательно расположенных друг за другом, имеющих достаточную протяженность и одинаковую глубину ω . Пусть максимум импульса концентрации достигается внутри каждого поля. В условиях, типичных для проведения аэрозольных обработок полей с достаточной глубиной, это предположение является вполне приемлемым. Тогда с учетом сделанных предположений ограничение (2) можно упростить. Оно эквивалентно следующему набору условий:

$$\sum_{i=1}^R Q_i J_i(x_k, d_i) = P_0, \quad k = \bar{1}, \bar{R}, \quad (6)$$

где

$$J_i(x_k, d_i) = w_g(d_i) I_i(x_k, d_i),$$

точка x_k находится на задней кромке k -го поля.

Соотношения (6) позволяют при фиксированной дисперсности рекуррентно рассчитать оптимальные значения расходов препарата по следующим формулам:

$$Q_1(d_1) = P_0 / [J_1(x_1, d_1)],$$

$$Q_k(d_1, \dots, d_k) = \frac{P_0 - \sum_{i=1}^{k-1} Q_i(d_1, \dots, d_i) J_i(x_k, d_i)}{J_k(x_k, d_k)}, \quad (7)$$

$$k = \bar{2}, \bar{R}.$$

Если подставить соотношения (7) в целевую функцию (1), то в результате приходим к довольно громоздкой задаче нелинейного программирования для отыскания оптимального вектора \mathbf{d} [6]. Однако можно предложить более простой метод нахождения оптимальных диаметров путем сведения исходной задачи к последовательности R одномерных. Он основан на том, что предыдущие обработки создают лишь фоновую плотность осадка для последующих, а также на линейности критерия (1) относительно расходов Q_i , $i = \bar{1}, \bar{R}$.

При любых допустимых (Q_i, d_i) , $i = \bar{1}, \bar{R} - 1$, из последнего соотношения (7) и критерия (1) вытекает, что оптимальный размер частиц при обработке R -го участка определяется из условия максимума функции $J_R(x_R, d_R)$ по d_R . Аналогично, последовательно используя соотношения (7), можно показать, что размеры частиц, соответствующие предыдущим обработ-

кам, определяются через последующие. В результате получаем алгоритм для их вычисления.

Таким образом, задача нахождения оптимальных параметров обработки сводится к выполнению следующих операций:

– решение последовательности одномерных задач минимизации для определения оптимальных d_m , $m = R, R - 1, \dots, 1$;

– вычисление в обратном направлении с помощью рекуррентных соотношений (7) оптимальных расходов Q_m , $m = \bar{1}, \bar{R}$.

Численные эксперименты

Рассмотрим численные примеры нахождения оптимальных параметров обработок для условий устойчивого состояния приземного слоя атмосферы. Для горизонтально-однородной подстилающей поверхности и невысокой растительности профили метеорологических элементов опишем в рамках теории подобия Монина – Обухова следующими параметризационными формулами [7, 8]:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} + \beta_u \frac{z - z_0}{L}; \quad v(z) = \frac{\kappa u^* z}{1 + \beta_u \frac{z}{L}}, \quad (8)$$

где u^* – динамическая скорость; $\kappa = 0,35$ – постоянная Кармана; L – масштаб длины Монина – Обухова; z_0 – высота шероховатости; $\beta_u = 4,7$.

Для вычисления скорости гравитационного осаждения аэрозольных частиц будем использовать формулу Стокса [2]:

$$w_g(d) = g\rho d^2 / (18\mu),$$

где μ – динамическая вязкость воздуха; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность частиц. Так как по предположению скорость ветра направлена перпендикулярно линии движения генератора, то достаточно ограничиться рассмотрением двухмерного стационарного уравнения переноса примеси с непрерывным линейным источником [2].

Расчеты проводились при следующих значениях входных параметров:

$$u^* = 0,08 \text{ м/с}, \quad L = 7,8 \text{ м}, \quad z_0 = 0,05 \text{ м},$$

$$h = 0,5 \text{ м}, \quad P_0 = 1 \text{ мкг/м}^2.$$

Результаты численных экспериментов приведены в табл. 1 и 2. Они отражают качественные представления о распределении оптимальных расходов и размеров

Таблица 1

Распределение оптимальных расходов препарата для каждого поля и суммарного расхода при аэрозольной обработке сельхозмассивов частицами одного оптимального диаметра

Глубина поля, км	Диаметр частиц, мкм	Расход, г/м					Суммарный расход, г/м
		Номер поля					
		1	2	3	4	5	
0,25	35	0,041	0,025	0,025	0,024	0,024	0,141
0,5	25	0,109	0,06	0,055	0,053	0,052	0,33
0,75	19	0,184	0,089	0,079	0,074	0,071	0,498
1	19	0,235	0,123	0,11	0,104	0,1	0,672

Таблица 2

**Распределение оптимальных расходов препарата
и диаметров аэрозольных частиц**

Глубина поля, км	Диаметр частиц, мкм					Суммарный расход, г/м
	Расход, г/м					
	Номер поля					
	1	2	3	4	5	
0,25	$\frac{31}{0,048}$	$\frac{32}{0,024}$	$\frac{33}{0,022}$	$\frac{37}{0,02}$	$\frac{39}{0,02}$	0,136
0,5	$\frac{21}{0,129}$	$\frac{24}{0,052}$	$\frac{25}{0,048}$	$\frac{27}{0,045}$	$\frac{31}{0,045}$	0,32
0,75	$\frac{19}{0,183}$	$\frac{19}{0,089}$	$\frac{20}{0,077}$	$\frac{22}{0,071}$	$\frac{26}{0,069}$	0,491
1	$\frac{19}{0,235}$	$\frac{19}{0,123}$	$\frac{19}{0,11}$	$\frac{19}{0,1}$	$\frac{22}{0,09}$	0,672

аэрозольных частиц по мере движения аэрозольного генератора в глубь массива полей. Для полученных решений характерно скачкообразное изменение мощности генератора после прохода вдоль первого поля. Нарастание же диаметров частиц происходит в основном более плавно. Обработка частицами одного оптимального диаметра d для всех проходов в ряде ситуаций является технически целесообразной, поскольку приводит к незначительному перерасходу препарата.

На рис. 1, *a* представлены результаты расчета плотности осадка для массива, состоящего из пяти полей с одинаковой глубиной по 500 м, полученной при его обработке частицами оптимального диаметра $d = 25$ мкм. На рис. 1, *б* изображена кривая плотности осадка препарата, полученная при обработке того же массива полей частицами оптимального для каждого прохода генератора диаметрами, представленными в табл. 2.

Анализ результатов показывает, что проведение аэрозольной обработки массива полей частицами оптимального для каждого поля диаметра с соответствующими расходами препарата позволяет добиться более равномерной плотности осадка на всем массиве полей, а также несколько уменьшить вынос аэрозоля и суммарный расход препарата (см. табл. 2). Следует также отметить, что последовательная обработка нескольких полей может привести к сокращению расхода более чем в два раза по сравнению с обработкой всего массива одним проходом генератора частицами соответствующего оптимального размера.

Полученные выводы носят, разумеется, предварительный характер, поскольку рассматриваемая в статье оптимизационная модель не содержит ряда дополнительных ограничений, связанных с метеорологическим режимом, технологическими особенностями, возможностями дорог и др. Поэтому выбор окончательного варианта обработки сельхозмассива следует

T.V. Jaroslavtseva. Optimization of an aerosol deposition density using the «wave» method.

The model of the optimum control by the process of aerosol deposits formation on the field massive using a choice of the corresponding aerosol particle sizes and the source powers is considered. The numerical method of the optimum parameters for data processing based on the conversion of the initial optimization task into a number of one-dimension tasks has been developed. The numerical modeling of the relation between optimum preparation and aerosol particle size has been done.

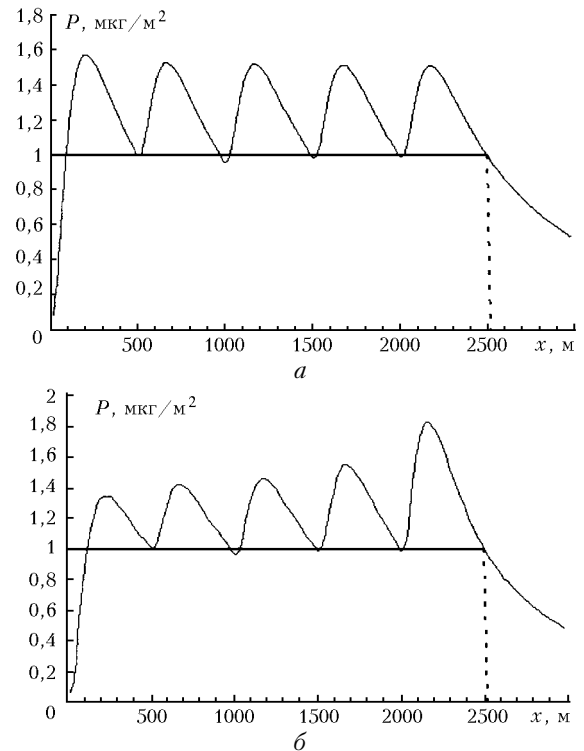


Рис. 1. Плотность осадка при обработке последовательности полей глубиной 500 м частицами: *a* – оптимального диаметра, общего для всех проходов аэрозольного генератора; *б* – оптимального диаметра для каждого поля

проводить с учетом всей совокупности условий, существенно влияющих на эффективность ее проведения.

1. Ковальский А.А., Куценогий К.П., Сахаров В.М., Макаров В.И. Применение аэрозолей для борьбы с вредными насекомыми. Новосибирск: Наука, 1978. 148 с.
2. Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов В.М. Пестицидные аэрозоли. М.: Наука, 1982. 287 с.
3. Куценогий К.П. Теоретические основы оптимизации применения инсектицидных аэрозолей // Химия в сельском хозяйстве. 1981. № 10. С. 12–18.
4. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
5. Абраменко В.В., Алоян А.Е., Анкилов А.Н. и др. Численное моделирование распространения аэрозолей в пограничном слое атмосферы над растительностью. Препр. / ВЦ СО АН СССР. (Новосибирск). 1985. № 584. 19 с.
6. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 519 с.
7. Казаков А.Л., Лазриев Г.Л. О параметризации приземного слоя атмосферы и деятельного слоя почвы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1978. Т. 14. № 3. С. 257–265.
8. Businger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bredley F.F. Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. № 2. P. 181–189.