

УДК 533.6

С.А. Орлов

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА В ЛЕСНЫХ МАССИВАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

В работе проводится математическое моделирование процессов распространения облака пылевых частиц различных размеров в лесных массивах. Исследуется влияние лесозащитных полос, их форм и расположений на движение пылевого облака в пространстве. Проводится серия численных экспериментов с целью сравнения эффективности некоторых вариантов лесозащитных полос. Показаны результаты параметрических исследований для различных значений размеров пылевых частиц и сделаны выводы об эффективности некоторых вариантов лесополос.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, аэродинамика, лесозащитные полосы.

В настоящее время аэродинамические процессы в лесных массивах и насаждениях практически не исследованы. Между тем различные насаждения деревьев и леса широко используют для защиты от переноса пыли, снега и вредных промышленных газов. Защитные лесные полосы вдоль железных дорог ограждают их от снежных и песчаных заносов, снижают скорость порывов ветров. Защитные лесные насаждения вдоль автомобильных дорог защищают их от снежных заносов. Вокруг городов и других населенных пунктов создаются массивы леса, широких или системы узких лесных полос. Они предохраняют населённые пункты от пыльных бурь, сильных ветров, выбросов промышленных объектов. В связи с этим становится актуальной задача моделирования распространения пылевого облака в условиях порывов ветра в лесных массивах и насаждениях различной формы.

Целью настоящей работы является исследование влияния лесных насаждений различных типов и форм посадки на процесс распространения пылевого облака в еловом лесном массиве посредством математического моделирования.

### Постановка задачи

Распространение ветра в лесном массиве описывается трехмерными уравнениями газовой динамики. Лес и его отдельные деревья моделируются пористой средой. Её влияние на движение воздуха учитывается функциями пористости  $\phi$  и силового взаимодействия  $F$ . В предположении малой массовой концентрации пыли в воздушной среде её влиянием на движение воздушных масс пренебрегается. В этих условиях распространение порыва ветра в лесном массиве описывается нестационарными трехмерными интегральными уравнениями, которые в объеме  $\Omega$  с поверхностью  $S$  с учетом пористости, записывающейся в виде (1) – (4):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_S \rho \phi (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) ds = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi \mathbf{U} d\Omega + \int_S \phi [p \mathbf{n} + (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) \rho \mathbf{U}] ds = \int_{\Omega} (-\mathbf{F} + p \cdot \text{grad } \phi) d\Omega; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \varphi \left( e + \frac{|U|^2}{2} \right) d\Omega + \int_S \rho \varphi (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) \left( e + \frac{|U|^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) ds = 0; \quad (3)$$

$$e = e(p, \rho), \quad (4)$$

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

Сила взаимодействия воздуха с пористой средой моделируется формулой Эргуна [1]:

$$\mathbf{F} = \frac{150\eta(1-\varphi)^2}{\varphi^3 d_i^2} \mathbf{U} + \frac{1,75(1-\varphi)}{\varphi^3 d_i} \rho \cdot |\mathbf{U}| \cdot \mathbf{U}. \quad (4)$$

Здесь  $\eta$  – динамическая вязкость воздуха,  $d_i$  – характерный размер частиц  $i$ -й среды. Последний вместе с функцией пористости выбирался с помощью экспериментальных данных [2 – 4]. При этом для каждого дерева в отдельности учитывались сопротивление кроны, ствола и крупных ветвей.

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

В указанных допущениях интегральные уравнения сохранения массы и количества движения пылевого облака имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \varphi \rho_S d\Omega + \int_{\Omega} \varphi \rho_S (\mathbf{U}_S \cdot \mathbf{n}) ds = - \int_{\Omega} K_p (1-\varphi) \rho_S |\mathbf{U}_S| d\Omega; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho_S \varphi \mathbf{U}_S d\Omega + \int_S \varphi (\mathbf{U}_S \cdot \mathbf{n}) \rho_S \mathbf{U}_S ds = \\ & \int_{\Omega} \frac{\rho_S}{m_S} \mathbf{f}_S d\Omega - \int_{\Omega} (1-\varphi) \rho_S |\mathbf{U}_S| \mathbf{U}_S d\Omega - \int_{\Omega} \rho_S \mathbf{g} \varphi d\Omega, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\rho_S$  – плотность пылевого облака,  $\mathbf{U}_S$  – вектор скорости частиц,  $m_S$  – масса одной частицы,  $\mathbf{f}_S = S_m C_R (\mathbf{U} - \mathbf{U}_S)$  – сила, с которой воздух действует на частицу,  $S_m$  – площадь Миделя частицы,  $C_R$  – коэффициент сопротивления,  $\mathbf{g}$  – ускорение силы тяжести.

### Серия вычислительных экспериментов

В работе моделируется распространение пылевого облака заданного объема при действующем порыве ветра в области длиной  $X$  метров, шириной  $Y$  метров и высотой  $Z$  метров, в которой имеется пористая преграда в виде лесозащитной полосы. Лесозащитная полоса состоит из нескольких рядов деревьев и имеет плоскости симметрии, что позволяет уменьшить моделируемую область только до од-

ного ряда деревьев лесополосы. В данной работе проводится моделирование в расчетной области длиной  $X = 200$  м, шириной  $Y = 5$  м и высотой  $Z = 50$  м.

$$\begin{cases} \rho_S|_{t=0} = 10^{-6} \text{ кг/м}^3, \text{ вне области пылевого облака,} \\ \rho_S|_{t=0} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3, \text{ в области пылевого облака,} \\ U_S|_{t=0} = 0 \text{ м/с,} \\ V_S|_{t=0} = 0 \text{ м/с,} \\ W_S|_{t=0} = 0 \text{ м/с;} \end{cases} \quad (7)$$

В ходе серии вычислительных экспериментов исследовалось распространение облака пылевых частиц размерами 0,1 мм; 0,2 мм; 0,5 мм; 0,7 мм; 1,0 мм с плотностью материала частиц  $2000 \text{ кг/м}^3$  в атмосфере воздуха плотностью  $1,29 \text{ кг/м}^3$ , давлением  $10^5 \text{ Па}$  и нулевой начальной скоростью во всем объеме. В качестве начальных условий для пылевого облака (7) принимается скорость частиц во всем пространстве равной нулю во всех направлениях. Пылевое облако с начальной скоростью, равной нулю, занимает объем от левой границы расчетной области на протяжении 20 метров, по высоте – от земли до высоты в 20 метров, и по всей ширине расчетной области.

$$\begin{aligned} U|_{x=0} &= U_0, \quad V|_{x=0} = 0, \quad W|_{x=0} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial x}\Big|_{x=X} &= 0, \quad \frac{\partial V}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial y}\Big|_{y=0} &= 0, \quad V|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial y}\Big|_{y=Y} &= 0, \quad V|_{y=Y} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y}\Big|_{y=Y} = 0; \\ U|_{z=0} &= 0, \quad V|_{z=0} = 0, \quad W|_{z=0} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial z}\Big|_{z=Z} &= 0, \quad \frac{\partial V}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В начальный момент времени на левой границе расчетной области начинает действовать порыв ветра скоростью 10 м/с, который вызывает движение частиц пыли. На плоскостях симметрии и нижней границе задаются условия непротекания, через верхнюю и правую границы газ проникает свободно (8).

$$\begin{aligned} U_S|_{x=0} &= U_0, \quad V_S|_{x=0} = 0, \quad W_S|_{x=0} = W_0; \\ \frac{\partial U_S}{\partial x}\Big|_{x=X} &= 0, \quad \frac{\partial V_S}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0, \quad \frac{\partial W_S}{\partial x}\Big|_{x=X} = 0; \\ \frac{\partial U_S}{\partial y}\Big|_{y=0} &= 0, \quad V_S|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial W_S}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0; \\ \frac{\partial U_S}{\partial y}\Big|_{y=Y} &= 0, \quad V_S|_{y=Y} = 0, \quad \frac{\partial W_S}{\partial y}\Big|_{y=Y} = 0; \\ \frac{\partial U_S}{\partial z}\Big|_{z=Z} &= 0, \quad \frac{\partial V_S}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0, \quad \frac{\partial W_S}{\partial z}\Big|_{z=Z} = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

В качестве граничных условий для частиц пыли (9) на левой границе расчётной области задаётся постоянная скорость  $U_0 = 10 \text{ м/с}$ , действующая на протяже-

нии всего расчёта с момента его начала, и начальная скорость оседания частиц  $W_0$ . На плоскостях симметрии задано условие непротекания таким образом, что частицы, достигающие переднюю ( $y = 0$  м) и заднюю ( $y = 5$  м) границы расчётной области, не покидают расчетную область. Через правую границу, а также через верхнюю границу расчетной области частицы могут свободно проникать без изменения скорости.

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

Для численного решения уравнений движения газа применяется метод Годунова [5], для решения уравнений движения частиц пыли применяется метод конечных объемов с противопоточной формой записи разностей на гранях.

Лесозащитная полоса представляется набором деревьев равной высоты, с конической формой кроны, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга с различными вариантами посадки деревьев. Лесополоса начинается в области 20 м от левой границы расчетной области.

Исследуются несколько вариантов лесополос:

1. Лесозащитная полоса с рядовой посадкой деревьев, при которой каждое дерево расположено строго за предыдущим без смещения по ширине расчетной области. Высота деревьев – 20 метров, крона деревьев начинается на высоте 4 метра, диаметр кроны – 5 метров. К особенностям данной лесополосы можно отнести отсутствие подлеска, что создает возможность «продувания» пространства под кронами деревьев.

2. Лесозащитная полоса с рядовой посадкой деревьев и подлеском, состоящим из кустарников и мелких деревьев высотой до 4 метров. Таким образом, имеющийся подлесок закрывает пространство под кронами деревьев и призван уменьшать скорость ветра, а также задержать возможное распространение пыли под кронами. На рис. 1 изображен фрагмент расчетной области, в котором находится непосредственно лесозащитная полоса. На данном рисунке видно расположение деревьев при рядовой посадке (1, а и б), на виде сверху (рис. 1, а) можно заметить плоскости симметрии, проходящие вдоль краев кроны деревьев.

3. Лесозащитная полоса с шахматной посадкой деревьев (рис. 1, б, в), при которой каждое дерево располагается со смещением по ширине на половину диаметра кроны таким образом, чтобы максимально закрыть свободное пространство рядом с предыдущим деревом. При этом такая рассадка становится более плотной, ряды деревьев находятся ближе друг к другу. Для данного варианта лесополосы моделируется отсутствие подлеска, однако в сравнении с вариантом 1 пространства под кронами деревьев становится меньше в связи с другим расположением стволов деревьев, что может дополнительно задержать распространение пыли под кронами деревьев.

4. Лесозащитная полоса с шахматной посадкой деревьев и подлеском, состоящим из кустарников и мелких деревьев высотой до 4 метров. Таким образом, как и во 2 варианте лесополосы, формируется пористое ограждение под кронами деревьев, которое призвано снижать скорость ветра и задерживать распространение пылевых частиц. На рис. 1, б, в изображен фрагмент данной расчетной области, в котором находится лесозащитная полоса. На виде сверху также можно увидеть плоскости симметрии, проходящие через центр каждого второго дерева. Также можно заметить более плотную по длине расчетной области посадку деревьев по сравнению с рядовой посадкой.

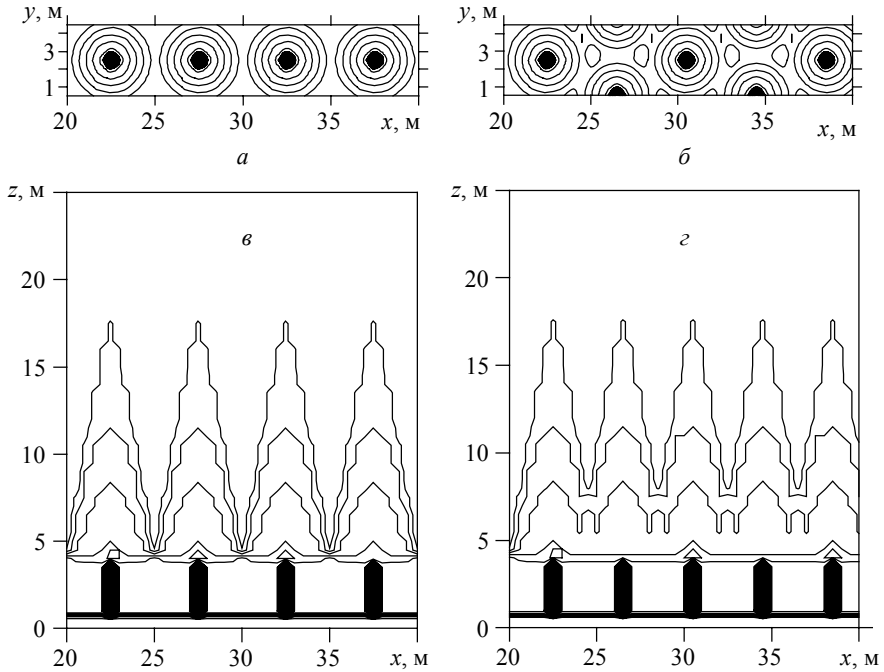


Рис. 1. Фрагменты лесозащитных полос с рядовой посадкой деревьев: *а* – вид сверху, *в* – вид сбоку; и с шахматной посадкой: *б* – вид сверху, *г* – вид сбоку

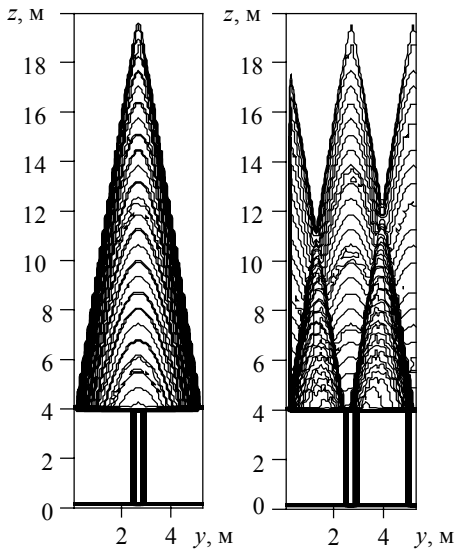


Рис. 2. Вид с торца расчетной области на лесозащитные полосы с рядовой (*а*) и шахматной (*б*) посадкой деревьев

Наиболее явные различия рядовой и шахматной посадок деревьев можно увидеть при рассмотрении вида с торца расчетной области, при котором заметно уменьшение свободного пространства для распространения пылевых частиц сквозь лесополосу. На рис. 2 изображен вид с торца расчетной области для различных вариантов посадки деревьев. На рис. 2, *а* для рядовой посадки деревьев видны большие свободные от крон деревьев области в верхней части. Через эти области пылевые частицы могут свободно проникать вдоль лесополосы и преодолевать преграду. В то же время на рис. 2 для шахматной посадки деревьев видно, что эти свободные области теперь закрыты, что может создать дополнительную преграду для пылевых частиц.

### Результаты расчетов

Результаты проведенных численных исследований позволили выявить некоторые закономерности для разных вариантов лесополос и разных размеров частиц. На рис. 3 представлены зависимости массовой доли частиц, находящихся в расчетной области от времени. На графиках видно, как масса частиц, находящихся в расчетной области, убывает, покидая её через правую границу, оседая на землю или оседая на кронах деревьев. На рисунке представлены зависимости для рядовой посадки 12 деревьев без подлеска (рис. 3, а) и с подлеском (рис. 3, б). Можно заметить, что массовая доля больших частиц (0,5 мм; 0,7 мм; 1,0 мм) покидает расчетную область раньше, чем частицы с мелкими размерами (0,1 мм; 0,2 мм).

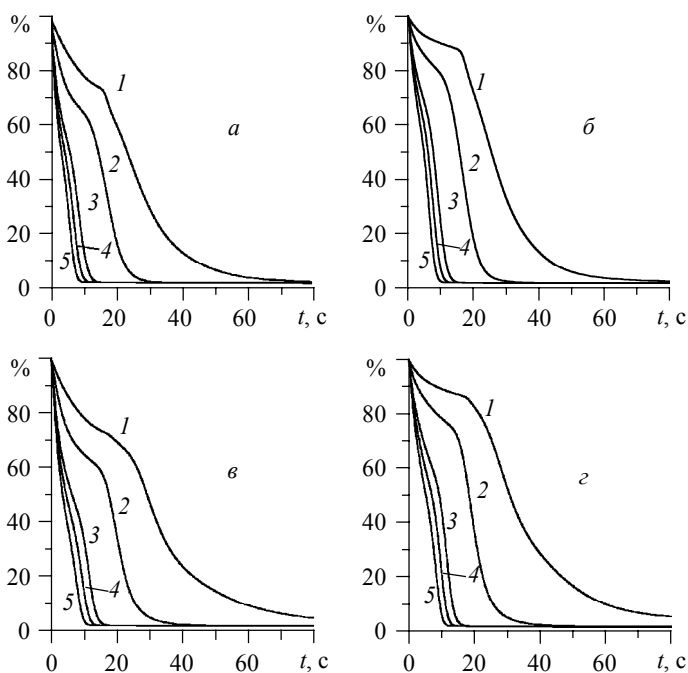


Рис. 3. Убывание массовой доли частиц разных размеров в объеме в лесополосе с рядовой посадкой деревьев: а – без подлеска, б – с подлеском; с шахматной посадкой деревьев: в – без подлеска, г – с подлеском (1 –  $d_s = 0,1$  мм; 2 –  $d_s = 0,2$  мм; 3 –  $d_s = 0,5$  мм; 4 –  $d_s = 0,7$  мм; 5 –  $d_s = 1,0$  мм)

Видно, что характер убывания массовой доли для всех частиц меняется, что говорит о разных механизмах убывания, так вначале частицы покидают расчетную область, оседая на землю, а затем оставшиеся частицы покидают расчетную область через правую границу. Для крупных частиц изменение характера зависимости слабо выражено, для мелких – в большей степени. При сравнении вариантов лесополос с подлеском и без него можно заметить, что при наличии подлеска в первые 20 секунд массовая доля мелких частиц размером 0,1 мм убывает незначительно, а затем характер зависимости резко изменяется, и масса частиц убывает быстрее. В то же время можно заметить, что время покидания расчетной области мелкими частицами при шахматной рассадке больше (рис. 3, в и 3, г). Так, при

прямой рассадке в момент времени  $t = 60$  с частицы размером  $0,1$  мм практически полностью покинули расчетную область, в то время как при шахматной рассадке еще остается около  $10\%$  массовой доли частиц в объеме. Это говорит о том, что по сравнению с рядовой посадкой шахматная позволяет дополнительно снижать скорость и увеличивать время прохождения лесополосы мелкими частицами.

На рис. 4 представлено распределение массы частиц разных размеров для рядовой посадки деревьев без подлеска в момент времени  $10$  с. Хорошо заметна особенность лесополосы без подлеска: пылевое облако под воздействием порыва ветра, достигая первого дерева, разделяется на верхнюю и нижнюю части, при этом часть облака находящаяся на средней высоте, проникает в область деревьев, теряет свою скорость и продолжает движение в пористой среде.

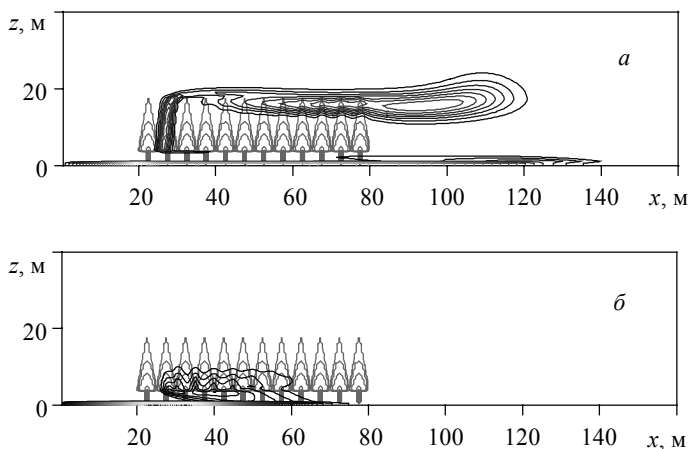


Рис. 4. Распределение массы частиц разных размеров в среднем сечении лесополосы с рядовой посадкой деревьев без подлеска в момент времени  $t = 10$  с:  $a - d_s = 0,1$  мм;  $б - d_s = 0,5$  мм

Частицы верхнего облака, находясь в восходящем потоке воздуха, поднимаются над деревьями и движутся над ними, частично оседая на кроны деревьев, при этом большая часть крупных частиц ( $0,5$  мм) поднимается недостаточно высоко и либо оседает на кронах деревьев, либо теряет скорость в пористой среде и оседает уже на землю под действием силы тяжести. В то же время мелкие частицы ( $0,1$  мм) в большом количестве преодолевают расстояние над кронами деревьев и оседают уже после лесозащитной полосы (рис. 4).

В это же время частицы нижней части облака, движущиеся в узком пространстве под кронами деревьев, распространяются на значительное расстояние. Так мелкие частицы нижнего облака пролетают область лесополосы быстрее, чем такие же частицы верхнего облака. По пути происходит оседание частиц, но в силу их небольшой массы они оседают в меньшей степени, нежели частицы более крупных размеров. Частицы нижнего пылевого облака размером  $0,5$  мм пролетают меньшее расстояние под кронами деревьев и оседают практически полностью в области лесополосы, почти не достигая её последнего дерева.

Как можно заметить из рис. 5, на котором изображено поле продольной компоненты скорости в момент времени  $10$  с, в области пористой среды частицы оседают практически без движения в продольном направлении.

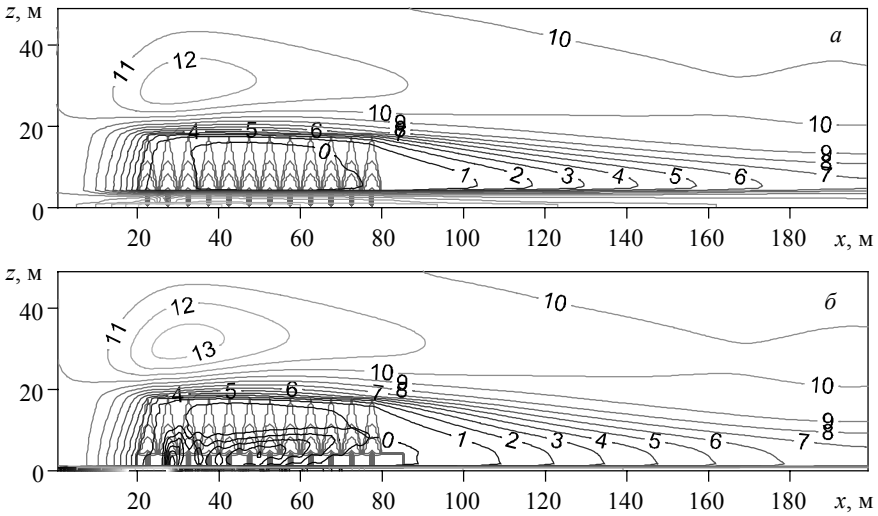


Рис. 5. Распределение продольной компоненты скорости частиц в пространстве в момент времени  $t = 10$  с для рядовой посадки: *а* – без подлеска, *б* – с подлеском

На рис. 5 хорошо заметна область сразу за последним деревом, где продольная компонента скорости еще небольшая, и частицы оседают практически вертикально вниз. И только на небольшом удалении от лесополосы они снова начинают двигаться по направлению ветра. В связи с отсутствием подлеска на рис. 5, *а* скорость в нижней части расчетной области практически не уменьшается, что, как отмечалось ранее, приводит к значительному распространению пылевых частиц под кронами деревьев.

В то же время при наличии подлеска в лесополосе распределение скоростей несколько отличается, что показано на рис. 5, *б*. Здесь также следует отметить зону сразу за последним деревом, где пористой преграды уже нет, но продольная компонента скорости еще мала, что приводит к большому оседанию частиц в этой зоне. В это же время при наличии подлеска отсутствует свободная зона под кронами деревьев, в результате чего частицы, попавшие в область леса, оседают на землю свободно и не сносятся ветром при приближении к земле.

Наличие подлеска, таким образом, препятствует пространству для нижней части облака, которая практически полностью попадает в пористую среду и оседает как на землю, так и на кроны деревьев. Продвижения частиц в этой области не наблюдается.

В то же время, наличие подлеска приводит к тому, что верхняя часть пылевого облака поднимается на большую высоту в связи с большими значениями скорости восходящего потока воздуха.

На рис. 6 изображено распределение массы частиц в срединном сечении лесополосы с рядовой посадкой деревьев и подлеском в моменты времени 10 с с момента начала порыва ветра. Характер распространения верхней части пылевого облака мало отличается от предыдущего варианта лесополосы без подлеска, однако практически отсутствует движение частиц под кронами деревьев. Здесь также крупные частицы проникают в область подлеска и крон деревьев, теряют свою скорость и оседают либо на землю, либо на кронах деревьев. Причем стоит отме-



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

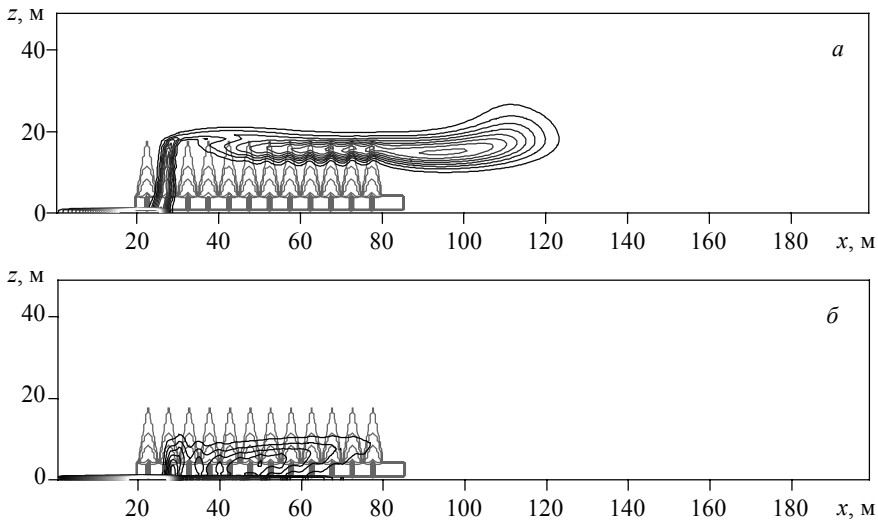


Рис. 6. Распределение массы частиц в срединном сечении лесополосы с рядовой посадкой деревьев и подлеском в момент времени  $t = 10$  с

Характер распространения верхнего пылевого облака при шахматной посадке деревьев меняется незначительно по сравнению с лесополосой с рядовой посадкой деревьев, поэтому аналогичные рисунки для шахматной посадки деревьев не приводятся. При этом, в связи с меньшим расстоянием, которое занимает лесополоса с шахматной рассадкой, верхнее облако мелких частиц оседает раньше, что приводит к немного отличному профилю оседания частиц, нежели в случае с рядовой посадкой деревьев.

На рис. 7 приведено распределение осевших на землю частиц по длине расчетной области с рядовой посадкой деревьев без подлеска и с шахматной посадкой деревьев без подлеска. Можно заметить, что большая часть частиц с размерами 0,5 мм; 0,7 мм; 1,0 мм оседает в самом начале расчетной области и максимум достигается в зоне, где начинается проникновение пылевого облака в область первого дерева. Здесь оседает большая часть частиц с относительно крупными размерами. Частицы же с размерами 0,1 мм и 0,2 мм, наоборот, оседают во второй части моделируемой области, что обуславливается их меньшим размером и, как следствие, возможностью пролететь большее расстояние вблизи поверхности земли, там, где нет крон, облетая стволы деревьев.

Характер зависимостей для разных вариантов посадок деревьев схож и отличается незначительно. Стоит отметить некоторый зубчатый характер зависимостей в области от 20 до 80 м. Это обуславливается наличием стволов деревьев в тех зонах, где наблюдается провал значения массы осевших частиц. Поскольку на рис. 7 представлена интегральная характеристика, масса осевших частиц по ширине моделируемой области, а частицы в процессе распространения облетают

стволы деревьев, не проникая внутрь их, то в сечениях, совпадающих со стволами деревьев, наблюдается резкое падение значения массы. С этим же фактом связаны небольшие пики перед стволами деревьев и, наоборот, уменьшение массы частиц после стволов, некоторая доля частиц не облетает стволы деревьев, а задерживается перед ними.

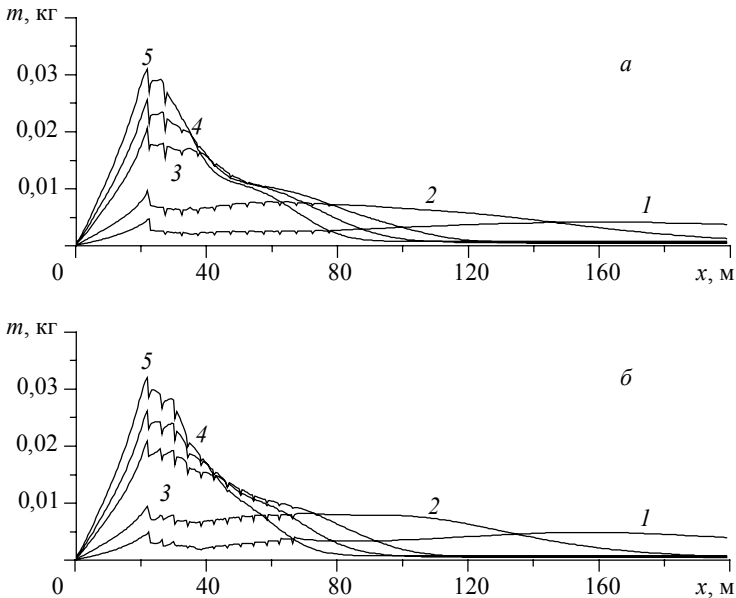


Рис. 7. Распределение осевших на землю частиц по длине расчетной области: *a* – с рядовой посадкой деревьев без подлеска; *б* – с шахматной посадкой деревьев без подлеска ( $1 - d_s = 0,1$  мм;  $2 - d_s = 0,2$  мм;  $3 - d_s = 0,5$  мм;  $4 - d_s = 0,7$  мм;  $5 - d_s = 1,0$  мм)

Несколько другая картина наблюдается на рис. 8, на котором представлены распределения осевших на землю частиц в лесополосах с подлеском соответственно с рядовой и шахматной посадкой деревьев. Чтобы не загромождать рисунки и из-за схожести зависимостей для мелких частиц (0,1 и 0,2 мм) и для крупных частиц (0,5 мм; 0,7 мм; 1,0 мм), здесь выделены зависимости только для частиц 0,1 и 0,5 мм.

Стоит отметить, что при наличии подлеска, как было показано выше, нижняя часть пылевого облака не пролетает достаточно далеко по лесополосе, а задерживается в области первых деревьев. Этот факт также находит подтверждение на данных графиках. Видно, что в области первых деревьев есть более выраженные пики осевшей массы частиц, особенно крупных. В то же время в области около 40 м значение резко падает, частицы практически не пролетают до этой зоны, а осевшая масса появляется в связи с оседанием частиц из верхних слоёв. Доля мелких частиц в этой зоне практически падает до нуля, что объясняется тем, что мелкие частицы верхнего пылевого облака достаточно лёгкие и пролетают в верхних слоях дальше, а частицы нижнего облака не достигают этой области. Далее в области 60 м наблюдается рост массы осевшей пыли, в особенности крупных частиц, что объясняется оседанием частиц из верхних слоёв. Впоследствии

масса оседающих крупных частиц практически падает до нуля, что говорит о том, что основная масса крупных частиц оседает в области леса и подлеска. Для мелких частиц имеется отличие: доля частиц, осевших на землю, возрастает после окончания лесополосы по причине начала оседания верхней части облака мелких частиц, которые в большей степени поднимаются над деревьями, сразу за лесополосой.

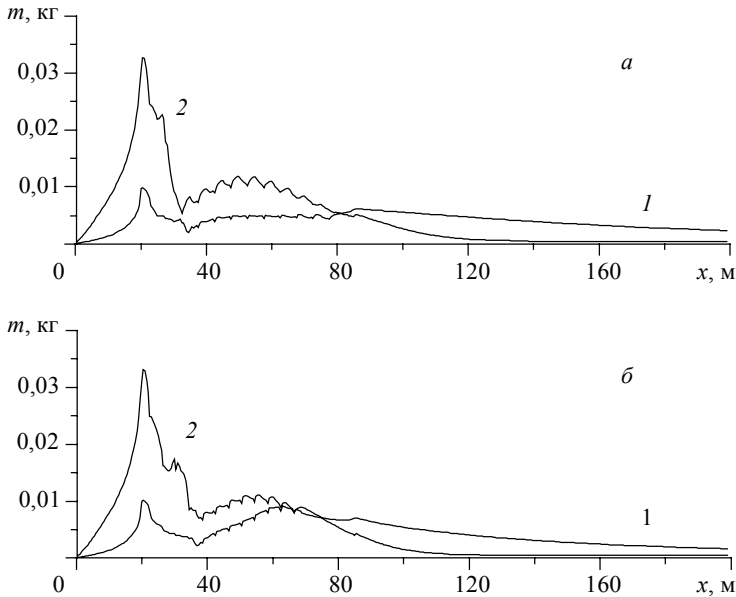


Рис. 8. Распределение осевших на землю частиц размером по длине расчетной области: *а* – с рядовой посадкой деревьев и подлеском; *б* – с шахматной посадкой деревьев и подлеском (1 –  $d_s = 0,1$  мм; 2 –  $d_s = 0,5$  мм)

Поскольку одной из основных характеристик лесозащитной полосы является массовая доля частиц, преодолевающих преграду в виде лесополосы, то в данном исследовании стоит привести сравнение массовой доли частиц, достигающих правую границу расчетной области с различными вариантами лесополосы. В табл. 1, где приведены эти значения для разных размеров частиц. Жирным шрифтом выделены значения наименьших долей частиц соответствующих размеров. Как видно из данной таблицы, наибольшую эффективность в плане защиты от пылевого облака имеет лесополоса с шахматной посадкой деревьев и подлеском. При этом стоит отметить, что снижение доли крупных частиц, преодолевающих лесозащитную полосу незначительно, в то время как доля мелких частиц снижается практически на 44 % при шахматной посадке и подлеске.

В связи со снижением доли частиц, достигающих правой границы расчетной области, возрастает доля частиц, оседающих на земле и кронах деревьев. Однако стоит отметить, что возрастает именно общая масса оседающих как на кронах, так и на земле частиц, в то время как доля оседающих на землю частиц снижается. В табл. 2 представлена массовая доля оседающих на землю частиц. Подчеркнутым шрифтом выделены наибольшие значения осевших частиц. Видно, что крупные

частицы свободно оседают в достаточно большом объеме и в отсутствие лесополосы, в то время как мелкие частицы имеют наибольшую осевшую массу при шахматной посадке деревьев и подлеске.

Таблица 1

Размер частиц	Доля частиц, достигших правой границы расчетной области, %				
	Без деревьев	Лес с рядовой рассадкой	Лес с рядовой рассадкой + подлесок	Лес с шахматной рассадкой	Лес с шахматной рассадкой + подлесок
0,1 мм	57,40	41,23	21,90	30,20	<b>13,24</b>
0,2 мм	10,00	8,88	7,12	6,43	<b>5,50</b>
0,5 мм	6,83	6,19	5,60	5,48	<b>4,99</b>
0,7 мм	6,71	6,10	5,52	5,39	<b>4,95</b>
1,0 мм	6,57	6,00	5,46	5,30	<b>4,89</b>

Таблица 2

Размер частиц	Доля осевших частиц, %				
	Без деревьев	Лес с рядовой рассадкой	Лес с рядовой рассадкой + подлесок	Лес с шахматной рассадкой	Лес с шахматной рассадкой + подлесок
0,1 мм	40,70	52,90	68,76	60,68	<b>72,32</b>
0,2 мм	<b>88,20</b>	84,21	81,62	85,86	81,84
0,5 мм	<b>91,46</b>	86,46	80,90	85,31	80,21
0,7 мм	<b>91,61</b>	86,92	81,26	85,66	80,30
1,0 мм	<b>91,79</b>	87,48	81,95	86,38	80,91

Доля частиц, не осевших на землю и не достигших правой границы расчетной области, остается на кронах деревьев. В табл. 3 приведены значения массовых долей частиц, оседающих на кронах деревьев и подлеске, для различных размеров частиц и вариантов посадки деревьев. Жирным шрифтом также выделены максимальные значения для различных размеров частиц. Видно, что наибольшее количество оседающих на кронах частиц – в лесополосе с шахматной посадкой деревьев и подлеском. Также можно заметить, что, как было отмечено раньше, наибольшая доля частиц, оседающих на кронах, приходится на частицы размером 0,5 мм.

Таблица 3

Размер частиц	Доля частиц, осевших на кронах, %				
	Без деревьев	Лес с рядовой рассадкой	Лес с рядовой рассадкой + подлесок	Лес с шахматной рассадкой	Лес с шахматной рассадкой + подлесок
0,1 мм	0,00	3,53	6,85	4,33	<b>8,94</b>
0,2 мм	0,00	5,11	9,46	5,90	<b>10,85</b>
0,5 мм	0,00	5,61	11,68	7,46	<b>13,04</b>
0,7 мм	0,00	5,27	11,51	7,22	<b>13,03</b>
1,0 мм	0,00	4,83	10,92	6,63	<b>12,50</b>

### Заключение

В результате проделанной работы было проведено численное моделирование процесса распространения пылевого облака в пространстве с лесозащитными полосами различных конфигураций, исследованы влияния различных типов лесных насаждений и форм посадки деревьев на процесс распространения пылевого облака частиц разных размеров (0,1 мм; 0,2 мм; 0,5 мм; 0,7 мм; 1,0 мм).

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по теплообменникам*: в 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 561 с.
2. *Алексеев В.И., Уткин А.И.* Таблицы массы фракций деревьев главнейших лесообразующих пород: сосны, ели, березы, осины // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: Наука, 1982. С. 237 – 240.
3. *Ковалев Ю.В.* Архитектура деревьев // Наука и жизнь. 1988. № 12.
4. *Третьякова В.А.* Дифференциация деревьев и рост культур основных лесообразующих пород Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2006.
5. *Годунов С.К., Забродин А.В., Крайко А.Н. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**ОРЛОВ Сергей Александрович** – аспирант кафедры прикладной аэромеханики физико-технического факультета Томского государственного университета. E-mail: orlov@ftf.tsu.ru

Статья принята в печать 24.05.2010 г.