

УДК 532.529

**РАСЧЕТ ВЕТРОВОГО ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ ГРУНТА
С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ АЭРОДРОМА**

Лазарев И.С., адъюнкт, Терентьев В.В., курсант, III курс
Научный руководитель: Кочетова Ж.Ю., д.г.н., доцент
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
г. Воронеж

Исследование экологической ситуации на территориях, прилегающих к аэродрому государственной авиации во время его реконструкции, выявило аномально высокий уровень загрязнения почв на сравнительно больших расстояниях от строительных площадок [1–3]. Особенность проводимых строительных работ на аэродромах – перемещение и перемешивание с большой глубины огромного количества грунтов, которые подвергались на протяжении десятков лет интенсивному загрязнению нефтепродуктами, тяжелыми металлами и другими приоритетными загрязнителями авиационной деятельности [3]. Ветровая эрозия почв является вторым после водной фильтрации фактором распространения загрязнителей. Существующие математические модели для оценки пространственного переноса частиц загрязненного грунта атмосферным воздухом сложны и не применяются на практике из-за необходимости учета большого числа факторов.

Цель работы – адаптация известных математических и эмпирических моделей для описания полного цикла ветровой эрозии, включающего отрыв частиц от толщи грунта под действием ветра с критическими скоростями; подъем частиц в атмосферу на высоту их горизонтального переноса; седиментацию частиц из потока воздуха на различном расстоянии от источника.

Для прогноза выдувания частиц почв на предельную высоту использовали модель Гендугова В.М. и Глазунова Г.П. [4], которая на сегодняшний день в несколько упрощенном виде успешно применяется для исследования ветровой эрозии хвостохранилища Кара-Балтинского гидрометаллургического завода в республике Кыргызстан [5].

Седиментацию частиц из потока воздуха на расстоянии от источника S_i (м) со скоростью U_{ci} рассчитывали по известному уравнению Стокса [6]. На четвертом этапе оценивается вероятность химического загрязнения почв P_i на различном удалении от источника пыления с учетом концентрации тяжелых металлов в отдельных фракциях частиц с радиусами r_i и розы ветров.

Гранулометрический состав поверхностного слоя почвы определяли по стандартной методике. Для этого отбирали методом конверта со сторонами 30 м пять проб грунта, перемешенного в результате изъятия 60-тонной под-

земной цистерны и снятия старого дорожного покрытия на территории склада ГСМ аэродрома. Установлены следующие диаметры частиц и их среднее для пяти проб массовое содержание в грунте: >1 мм (12,8 %); 1–0,5 мм (10,6 %); 0,5–0,1 мм (29,1 %); 0,1–0,05 мм (23,3 %), 0,05–0,025 мм (18,4 %), <0,025 мм (5,8 %).

На первом этапе рассматривается явление ветровой эрозии, вызванное обычным ветром, то есть сравнительно однородным вихревым потоком, средняя скорость которого слабо зависит от высоты в основной его толще, но быстро убывает с высотой в приземной его части, пограничном слое [4]. Критическую скорость выдувания частиц из почвы/грунта можно рассчитать по уравнению:

$$U_{кр} = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{r_i \rho_n g}{\rho_v}}, \quad (1)$$

где r_i – радиус почвенной частицы (м); g – ускорение силы тяжести ($9,8 \text{ м/с}^2$); ρ_n и ρ_v – плотности почвенной частицы и воздуха (2660 и $1,16 \text{ кг/м}^3$).

Результаты расчетов критических скоростей выдувания почвенных частиц с различными радиусами представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры воздушного переноса почвенных частиц с различными радиусами

Радиусы почвенных частиц, мм	1,5	0,875	0,375	0,187	0,088	0,075	0,050	0,025
Критическая скорость выдувания частиц $U_{икр}$, м/с	13,8	10,7	7,0	4,9	3,4	3,1	2,5	1,80

Помимо размера частиц, на критическую скорость влияние оказывают тип почв, влажность, плотность почвенного покрова, комковатость почв (из-за различия сил сцепления между частицами) и наличие растительного покрова и других преград (шероховатость поверхности). Для прогноза худшего сценария экологического загрязнения почв в данной работе эти аспекты не учитывали.

После воздействия на частицы критической скорости ветра, они начинают двигаться: совершают колебательные движения, перекатываются или скользят по поверхности, совершают скачки высотой от нескольких сантиметров до десятков и даже тысяч метров, перемещаются ветром в «подвешенном» состоянии. Высоту скачка H (м) частиц с радиусами r_i рассчитывали по формуле [4]:

$$H_i = \frac{4kr_i^2 \rho_n U}{3\eta\varphi}, \quad (2)$$

где k – отношение скорости ветра к начальной скорости подъема частиц; U – скорость горизонтального полета частицы (принимается, что частица, «стартовая» с поверхности с критической скоростью $U_{кр}$ мгновенно принимает

скорость потока); η – вязкость воздуха (0,000018 кг/м/с); ϕ – коэффициент Стокса (для разнородных частиц $\phi=6$).

Таблица 2

Высота скачка частиц H (м) в зависимости от скорости ветра

Радиус частиц r_i , мм	Скорость ветра U , м/с										
	1,8	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	18,5	20,5
1,5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	1125	1442	1813	2227
0,875	↓	↓	↓	↓	↓	↓	367	494	640	804	988
0,375	↓	↓	↓	↓	48	72	103	138	179	226	277
0,187	↓	↓	↓	9,9	17	26	37	49	64	80	99
0,088	↓	↓	1,4	3,0	5,1	7,7	11	15	19	24	29
0,075	↓	↓	1,2	2,5	4,3	6,6	9,4	13	16	21	25
0,050	↓	0,17	0,61	1,3	2,2	3,3	4,7	6,3	8,2	10	13
0,025	0,04	0,07	0,23	0,48	0,82	1,3	1,9	2,4	3,1	3,9	4,5

↓ - неподвижные частицы ($U < U_{кр}$)

Скорость седиментации U_{ci} частиц различной формы с известными радиусами из потока воздуха описывается законом Стокса [6]. Это соотношение справедливо, если частицы дисперсной фазы осаждаются независимо друг от друга, что может быть только в разбавленных системах. Континуумы частиц с различными радиусами, «стартующими» с разными скоростями, движутся по своим траекториям, не оказывая влияния друг на друга. Для более точных вычислений в закон Стокса вводится поправка Кенингема C_k (таблица 3) [7]:

$$U_{ci} = \frac{g\rho_p d_i^2}{C_k 18\eta\phi}. \quad (3)$$

Таблица 3

Скорость осаждения частиц из потока воздуха

Радиус частиц r_i , мм	1,5	0,875	0,375	0,187	0,088	0,075	0,050	0,025
Поправка Кенингема C_k	1	1,08	1,12	1,61	2,2	2,7	2,9	7,1
Скорость седиментации U_{ci} , м/с	120	39	6,8	1,2	0,18	0,11	0,050	0,005

Зная максимальную высоту подъема частиц с различными радиусами, можно рассчитать время их осаждения из потока воздуха (таблица 4):

$$\tau_i = H_i / U_{ci}. \quad (4)$$

С учетом того, что скорость частицы близка к скорости ветра U , которым она переносится, путь переноса частицы от источника до места осаждения (таблица 5):

$$S_i = \tau_i \cdot U. \quad (5)$$

Таблица 4

Время осаждения частицы из потока воздуха τ_i (с)

Радиус частиц r_i , мм	Скорость ветра U , м/с										
	1,8	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	18,5	20,5
1,5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	9,4	12	15	19
0,875	↓	↓	↓	↓	↓	↓	9,3	13	16	20	25
0,375	↓	↓	↓	↓	7,1	11	15	20	26	33	41
0,187	↓	↓	↓	8,3	14	22	31	41	53	67	83
0,088	↓	↓	7,7	17	28	42	61	81	105	133	161
0,075	↓	↓	11	23	39	60	85	118	146	191	227
0,050	↓	3,4	12	26	44	66	94	120	164	206	252
0,025	8,0	14	46	96	164	260	380	480	620	780	900

Таблица 5

Расстояние от источника загрязнения до места осаждения частицы S_i (м)

Радиус частиц r_i , мм	Скорость ветра U , м/с										
	1,8	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	18,5	20,5
1,5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	136	198	228	390
0,875	↓	↓	↓	↓	↓	↓	116	189	264	370	512
0,375	↓	↓	↓	↓	60,4	116	188	290	429	610	840
0,187	↓	↓	↓	54	119	231	388	595	874	1239	1701
0,088	↓	↓	35	111	238	441	762	1175	1733	2460	3301
0,075	↓	↓	50	150	332	630	1062	1711	2409	3533	4653
0,050	↓	8,5	54	169	374	693	1175	1740	2706	3811	5166
0,025	14	35	207	624	1394	2730	4750	6960	10230	14430	18450

Таким образом, крупные частицы почвы поднимаются вихрями на высоту до ~1 км, но осаждаются быстрее, загрязняя территории в радиусе 0,5 км. Мелкие частицы поднимаются над поверхностью на 4,5–13 м и сразу подхватываются ветром, ареал их распространения при сильных ветрах достигает 18,5 км. С учетом того, что мелкие частицы лучше адсорбируют загрязняющие вещества, в том числе тяжелые металлы [8], максимальный уровень загрязнения почв наиболее вероятен на некотором удалении от аэродрома, зависящем от розы ветров и характерной для исследуемого региона и времени года скорости ветра. Это согласуется с ранее полученными экспериментальными данными [1, 2].

На прилегающих к аэродромам государственной авиации территориях, как правило, расположены сельскохозяйственные угодья, жилые и дачные поселки, военные городки [3]. Для снижения негативного экологического воздействия на прилегающие территории при реконструкции аэродромов, аэропортов, складов, хранилищ ГСМ и других подобных объектов с высоким содержанием токсикантов в почвах (грунтах) необходимо принимать предупреждающие меры по снижению пыления на строительных площадках; пересматривать ведение агротехнических работ, информировать население о возможной опасности.

Список литературы:

1. Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Терентьев В.В. Интегральная оценка загрязнения почв при реконструкции аэродрома // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 3. С. 448–462.
2. Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С. Методика оценки интегрального загрязнения почв (на примере приаэродромной территории) // Географический вестник. 2022. № 3 (62). С. 126 – 136.
3. Кочетова Ж.Ю. Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // Географический вестник. 2019. № 3 (50). С. 79–91.
4. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 240 с.
5. Васильев И.А., Овчинников Н.А., Чернов В.В., Шестаков А.А. Геомиграционная модель переноса урана. Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 34 с.
6. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.
7. Ветошкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы). Учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 325 с.
8. Kochetova Zh.Yu., Bazarskii O.V., Maslova N.V. Filtration of Heavy Metals in Soils with Different Degrees of Urbanization and Technogenic Load // Russian Journal of General Chemistry. 2018. Vol. 88. No 13. P. 2990–2996.