

Научная статья
УДК 622.4+519.67
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.004

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ЛЕСОПОЛОСЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ОТ ПЫЛЯЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

**Павел Васильевич Амосов¹, Александр Анатольевич Бакланов^{2,3},
Геннадий Валерианович Калабин⁴, Дмитрий Викторович Макаров⁵**

^{1,5}Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Всемирная метеорологическая организация, Женева, Швейцария

⁴Институт проблем комплексного освоения недр им. Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

¹p.amosov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

^{2,3}aabaklanov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

⁴kalabin.g@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0081-187X>

⁵d.makarov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Аннотация

Цель исследования — оценить эффективность «конструкций плотной лесополосы» (КПЛ), сооружаемых на пылящей техногенной поверхности со стороны набегающего ветрового потока, на уровень загрязнения атмосферы вниз по потоку для трёх вариантов искусственного непроницаемого барьера (аналог КПЛ). Исследования выполнены на базе компьютерных моделей, созданных в программе COMSOL. Использована трёхстадийная последовательность расчётов: аэродинамические параметры на базе приближения несжимаемой жидкости с привлечением ($k-\epsilon$)-модели турбулентности; оценка интенсивности пыления по зависимости Вестфалля [Westphal]; перенос пыли диаметром 35 мкм с учётом скорости оседания и пороговой скорости на базе решения конвективно-диффузионного уравнения. Выполнен прогноз относительного изменения уровня загрязнения атмосферы вниз по потоку для трёх вариантов искусственного непроницаемого барьера по сравнению с «эталонным» — отсутствием барьера. Показано, что усложнение КПЛ (количественное увеличение барьеров и их высоты) заметно снижает уровень загрязнения атмосферы: для вариантов двух- и трёхбарьерных конструкций расчётная эффективность КПЛ выше 90 %.

Ключевые слова:

техногенные объекты пыления, конструкция плотной лесополосы, эффективность снижения загрязнения атмосферы, численное моделирование

Благодарности:

работа выполнена в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)». Часть исследований выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-30008.

Для цитирования:

Оценка эффективности использования физических принципов функционирования конструкции лесополосы для снижения уровня загрязнения атмосферы от пылящих техногенных объектов / П. В. Амосов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 3. С. 45–55. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.004.

Original article

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING THE PHYSICAL PRINCIPLES OF THE FUNCTIONING OF THE FOREST BELT STRUCTURE TO REDUCE THE LEVEL OF ATMOSPHERIC POLLUTION FROM DUSTY MAN-MADE FACILITIES

Pavel V. Amosov¹, Alexander A. Baklanov^{2,3}, Gennadiy V. Kalabin⁴, Dmitrii V. Makarov⁵

^{1,5}Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

³World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland

⁴Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of RAS, Moscow, Russia

¹p.amosov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

^{2,3}aabaklanov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

⁴kalabin.g@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0081-187X>

⁵d.makarov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Abstract

Research objective is to evaluate the effectiveness of "dense forest belt structures" (DFBS) constructed on a dusty man-made surface from the side of the incoming wind flow to the level of atmospheric pollution downstream for 3 variants of an artificial impenetrable barrier (analogous of DFBS). The research was carried out on the basis of computer models created in the COMSOL program. A three-stage sequence of calculations was used: aerodynamic parameters based on the incompressible fluid approximation using the (k- ϵ) turbulence model; estimation of dust intensity according to the dependence of Westphal et al.; dust transport with a diameter of 35 microns, taking into account the settling rate and threshold velocity based on the solution of the convective-diffusion equation. The forecast of the relative change in the level of atmospheric pollution downstream for 3 variants of an artificial impenetrable barrier has been made compared to the "reference" one, there is no barrier. It is shown that the complication of the DFBS (a quantitative increase in barriers and their height) significantly reduces the level of atmospheric pollution: for variants 2 and 3 barrier structures, the calculated efficiency of the DFBS is above 90%.

Keywords:

man-made dusting facilities, dense forest belt structure, efficiency of reducing atmospheric pollution, numerical modeling

Acknowledgements:

The research was carried out within the framework of the research topic No. 1021051803680-5 "Processes of transformation of natural and man-made systems in the conditions of climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (on the example of the Murmansk region)". Part of the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-77-30008.

For citation:

Evaluation of the effectiveness of using the physical principles of the functioning of the forest belt structure to reduce the level of atmospheric pollution from dusty man-made facilities / P. V. Amosov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, no. 3. P. 45–55. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.004.

Введение

Многочисленные публикации и электронные ресурсы по вопросам лесомелиорации ландшафтов свидетельствуют о достаточно серьёзной проработанности указанного направления и широком использовании защитных лесных полос (от двух и более рядов) для преодоления негативного воздействия суховеев на урожай, улучшения водного режима почвы путём задержания снега и уменьшения испарения, для предотвращения эрозии почв и роста оврагов, а также для защиты железных и автомобильных дорог от снежных и песчаных заносов [1–9].

Специалистами в области лесомелиорации [2] отмечается, что одним из наиболее опасных видов ветровой эрозии является разрушение почвенного покрова так называемыми чёрными бурями, когда сильный ветер разрушает верхний плодородный слой почвы, поднимает почвенные частицы в воздух и переносит их на значительные расстояния. Подчёркивается, что при сильном ветре (8–10 м/с) почва может быть выдута на глубину до 30 см и больше, то есть на всю глубину пахотного горизонта. Продолжительность пыльных бурь бывает различной — от кратковременных вспышек до нескольких часов, а иногда даже и нескольких суток. Во время пыльных бурь, наносящих огромный ущерб, мелкие частицы почвы (мельче 0,1 мм) — наиболее плодородная часть почвы — поднимаются в воздух в виде облака и уносятся на большие расстояния.

Исследованиями установлено, что степень развития ветровой эрозии зависит от режима и интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, силы и направления ветра, рельефа местности, механического состава, структуры, физических и химических свойств, влажности почвы, её геологического строения, состояния растительного покрова, хозяйственной деятельности человека и культуры земледелия [3]. Естественно, что указанные проблемы нашли свои определённые решения в исследованиях лесомелиораторов. В частности, в обзорной публикации В. В. Засобы с коллегами [6] представлен семидесятилетний опыт создания государственных защитных лесных полос в степной зоне России, а также на основе аналитических материалов выполнена оценка состояния государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России и обоснован их рекреационный потенциал.

По классификации А. Ш. Тимерьянова [2] выделяют три основные конструкции лесных полос (плотную, продуваемую, ажурную), которые определяются по внешним признакам (ажурность лесной полосы) и на основании ветропроницаемости. Обе величины являются относительными:

- ажурность лесной полосы — отношение площади просветов в её продольном профиле в облиственном состоянии к её общей площади;
- ветропроницаемость лесных полос — отношение скорости ветра на заветренной стороне лесной полосы на расстоянии её высоты к скорости ветра в открытом поле.

Полосы плотной конструкции практически не имеют просветов по всему профилю, полосы ажурной конструкции имеют мелкие просветы по всему профилю, продуваемой — крупные просветы между стволами и практически без просветов в кронах.

В науке о лесомелиорации ландшафтов дальность влияния лесных полос измеряется в высотах насаждения H . Наилучшими ветрозащитными свойствами обладают лесные полосы продуваемой конструкции, дальность влияния которых на наветренной стороне находится в пределах $(5–10) H$, а на заветренной — до $(35–40) H$ [2].

На втором месте по дальности эффективного влияния на скорость ветра находятся лесные полосы ажурной конструкции, которые действуют на ветровой поток как решётчатые экраны. Дальность влияния такой конструкции на наветренной стороне равна $(5–7) H$, на заветренной стороне до $(30–35) H$.

Низкую мелиоративную эффективность имеют лесные полосы плотной (непродуваемой) конструкции, которые действуют по принципу непродуваемых экранов. Скорость ветра на наветренной стороне непродуваемых лесных полос начинает снижаться на расстоянии $(10–15) H$. Дальность влияния лесных полос плотной конструкции на заветренной стороне равна $(15–20) H$.

Используемый авторами программный продукт COMSOL [10] для исследования процессов пыления и переноса загрязнений вниз по ветровому потоку на данный момент освоённости программы позволяет моделировать наименее эффективную мелиоративную конструкцию плотной лесной полосы (сплошной барьер). Для моделирования продуваемой и ажурной конструкций лесной полосы потребуются дополнительное освоение, определённая модернизация кода через функции пользователя и улучшенные характеристики компьютерной техники.

Отметим, что авторы имеют определённый опыт по использованию указанной программы [11–14], в том числе с учётом современного формализованного описания интенсивности пыления [15–21], а также освоённого методического подхода [13] в исследованиях загрязнения атмосферы на техногенных объектах (карьеры, хвостохранилища, подземные выработки).

Описание модели и последовательность расчётов

Авторами сформулирована задача по оценке эффективности «конструкций плотной лесополосы» (КПЛ), сооружаемых на пылящей техногенной поверхности со стороны набегающего ветрового потока. В качестве критерия эффективности принято относительное изменение уровня загрязнения атмосферы вниз по потоку для трёх вариантов искусственного непроницаемого барьера (аналог конструкции плотной лесополосы) по сравнению с «эталонным» — отсутствие барьера (рис. 1):

- I вариант — отсутствие барьера;
- II вариант — один барьер высотой 0,5 м;
- III вариант — два барьера высотой 0,5 и 1,0 м;
- IV вариант — три барьера высотой 0,5, 1,0 и 1,5 м.

Указанные значения высоты барьеров использовались авторами в статье [12]. В работе было отмечено, что хотя наибольший эффект прогнозируется при высоте полуметрового одиночного ограждения, сооружаемого на дальней стороне пылящей поверхности, но если речь идёт о предотвращении загрязнения атмосферы на расстояниях порядка 1000 м и более, то с учётом экономических соображений рекомендуется создание более дешёвого ограждения высотой 0,5 м.

При создании компьютерных моделей использована опция автоматизированной генерации расчётной сетки. Применение треугольной самой мелкой расчётной сетки (Extremely fine) при толщине барьера 0,05 м потребовало использования расстояния между барьерами 0,06 м (попытки сгенерировать сетку с меньшими значениями для всех рассмотренных вариантов оказались неудачными).



Рис. 1. Варианты искусственных барьеров на пылящей поверхности
Fig. 1. Variants of artificial barriers on a dusty surface

Основные параметры компьютерных моделей, разработанных в программе COMSOL:

- 1) область моделирования — 3000×500 м;
- 2) протяжённость пылящей поверхности — 300 м;
- 3) высота пылящей поверхности — +50 м над основанием модели;
- 4) скорость ветра на высоте +10 м над основанием модели — 8 м/с.

Расчёты выполнены по отработанному методическому подходу [13]:

- расчёт аэродинамических параметров (I этап) на базе приближения несжимаемой жидкости с привлечением (k - ϵ)-модели турбулентности, по итогам которого получаем поля скорости, коэффициенты динамической турбулентной вязкости, распределение горизонтальной компоненты скорости на высоте +10 м над поверхностью пыления;

- вычисление вертикального потока массы или интенсивности пыления на основе собственных программ (средняя скорость на высоте +10 м над поверхностью пыления, динамическая скорость на высоте пыления, интенсивность пыления (зависимость Вестфаля [15]), коэффициенты турбулентной диффузии);

- расчёт пространственного распределения пыли диаметром 35 мкм с учётом скорости оседания и пороговой скорости (для указанного размера пыли) на базе решения конвективно-диффузионного уравнения (II этап). В численных экспериментах используются значения коэффициентов турбулентной диффузии, которые получены операцией осреднения по объёму моделируемой области коэффициентов турбулентной вязкости с поправкой на плотность воздуха и число Прандтля — Шмидта [22, 23].

Для каждой интегрируемой физической величины задаются соответствующие начальные и граничные условия. При численном решении системы уравнений I этапа и уравнения II этапа используются общепринятые стандартные начальные и граничные условия, предложенные создателями программного продукта [10]. Например, для скорости при расчёте аэродинамических параметров задействованы следующие условия:

- на входной и верхней границах модели условие 1-го рода (на входной — логарифмический профиль скорости, на верхней — постоянное значение, отвечающее максимальной высоте модели);
- на твёрдой поверхности условие логарифмической функции стенки.

При решении конвективно-диффузионного уравнения предполагается, что пыль химически не взаимодействует с материалом поверхности, на входной границе поступает «чистый» воздух, а на выходной границе «работает» условие конвективного потока, предполагающее вынос примеси из области моделирования.

Как уже упоминалось выше, расчёты выполнены на треугольной самой мелкой расчётной сетке (Extremely fine), минимальный размер сетки в области барьеров составляет примерно 0,02 м.

Для обеспечения устойчивости расчётов на одинаковой для всех вариантов расчётной сетке выполнен выбор демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых: решатель (Direct UMFPACK) и демпфирующие коэффициенты (Crosswind diffusion) для уравнения сохранения импульса и Turbulence isotropic для уравнений (k - ϵ)-модели на уровне 0,65. Для достижения положительных значений концентрации пыли при решении конвективно-диффузионного уравнения использован тот же решатель (Direct UMFPACK) и демпфирующий коэффициент (Isotropic diffusion) на уровне 0,5.

Результаты численных экспериментов и их анализ

Аэродинамика

Расчётные структуры скоростных потоков и линий тока над поверхностью пыления при вариации КПЛ представлены на рис. 2. Отчётливо видно, что усложнение КПЛ приводит к увеличению области обратных потоков, то есть дальности влияния предлагаемой конструкции.

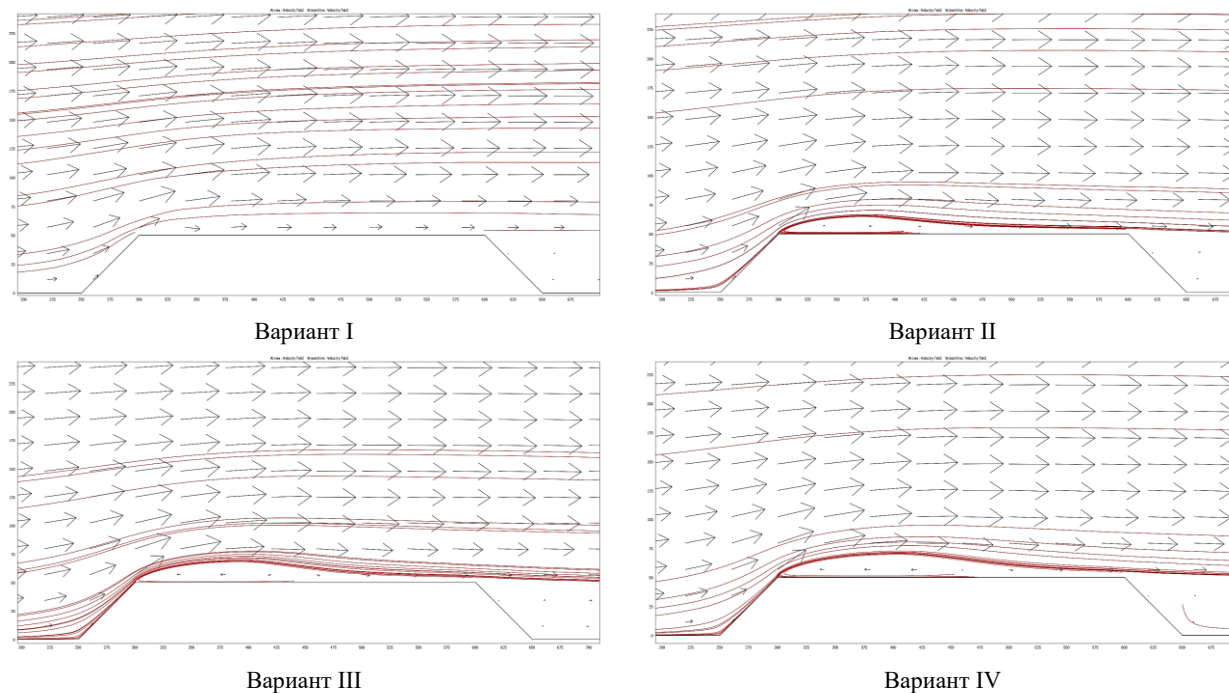


Рис. 2. Структура скоростных потоков и линий тока над поверхностью пыления при вариации КПЛ
Fig. 2. The structure of high-speed flows and streamlines above the dusting surface with a variation of the KPL

Вместе с тем очевидно, что дальность влияния лесных полос плотной конструкции на заветренной стороне не равна $(15\text{--}20)H$, как это указывалось выше [2]. В варианте II высота барьера 0,5 м, а дальность влияния более 100 м, в варианте III максимальная высота барьера 1 м, а дальность влияния на уровне 150 м, в варианте IV максимальная высота барьера 1,5 м, а дальность влияния практически 200 м.

Представляется, что основная причина таких больших значений дальности влияния обусловлена тем, что ветровой поток попадает на КПЛ не перпендикулярно, а с учётом угла откоса пылящей поверхности. Таким образом, просматривается необходимость дополнительного изучения вопроса об эффекте угла откоса пылящей поверхности на дальность влияния конструкции.

Загрязнение атмосферы

Прежде чем переходить к анализу пространственного загрязнения атмосферы при вариации КПЛ, выполним небольшой качественный анализ интенсивности пыления для рассмотренных вариантов конструкций. В соответствии с зависимостью Вестфаля [15] имеем (табл. 1) следующие значения ВПМ.

Из данных табл. 1 видно, что усложнение конструкции лесополосы примерно с коэффициентом 3 приводит к уменьшению интенсивности пыления, что далее должно отразиться на уровне загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку.

Пространственное распределение загрязнения атмосферы на высоте +2 м над основанием модели вниз по потоку при вариации КПЛ представлено на рис. 3, а значения концентрации пыли на четырёх

фиксированных расстояниях от объекта пыления в табл. 2, в ней же представлены значения относительных изменений концентрации по сравнению с вариантом I. Отрицательные значения относительных изменений свидетельствуют о положительной эффективности предлагаемых инженерных мероприятий.

Таблица 1

Расчётные значения ВПМ при вариации КПЛ
Calculated VPM values for CPL variation

Номер варианта	I	II	III	IV
ВПМ, кг/(м ² ·с)	$0,10350 \cdot 10^{-5}$	$0,34038 \cdot 10^{-6}$	$0,10177 \cdot 10^{-6}$	$0,36532 \cdot 10^{-7}$

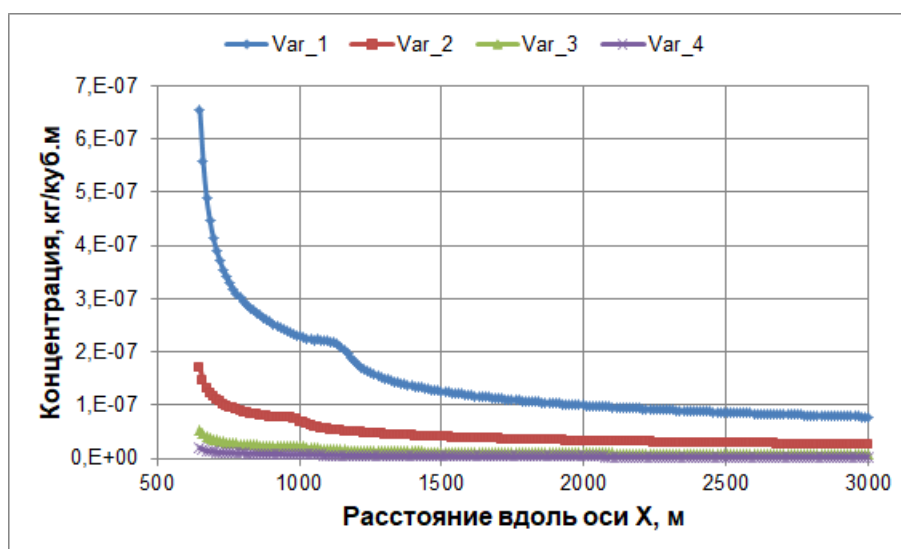


Рис. 3. Пространственное распределение загрязнения атмосферы на высоте +2 м к основанию модели вниз по потоку при вариации КПЛ

Fig. 3. Spatial distribution of atmospheric pollution at altitude +2 m to the base of the model downstream with a KPL variation

Таблица 2

Значения концентрации пыли и их относительное изменение к варианту I на различных расстояниях от объекта пыления при вариации КПЛ
The values of the dust concentration and their relative change to variant I at different distances from the dusting object with a variation of the KPL

Координата X , м	Концентрация пыли, кг/м ³				Относительное изменение, %		
	Вариант I	Вариант II	Вариант III	Вариант IV	Вариант II	Вариант III	Вариант IV
700	4,1485E-07	1,1514E-07	3,5240E-08	1,2723E-08	−72,24	−91,51	−96,93
1000	2,2924E-07	6,8787E-08	2,2022E-08	7,8273E-09	−69,99	−90,39	−96,59
2000	1,0002E-07	3,2816E-08	9,7720E-09	3,4917E-09	−67,19	−90,23	−96,51
3000	7,8293E-08	2,5891E-08	7,7228E-09	2,7619E-09	−66,93	−90,14	−96,47

С учётом значения ПДК по пыли $3 \cdot 10^{-7}$ кг/м³ [24] видно, что в рассматриваемом случае для варианта I превышение ПДК имеет место в непосредственной близости к объекту пыления, а использование КПЛ позволяет заметным образом снизить уровень загрязнения атмосферы.

Приведённые на рис. 3 кривые являются монотонно убывающими. Усложнение КПЛ (количественное увеличение барьеров и их высоты) заметно снижает уровень загрязнения атмосферы. Небольшие «плато» кривых для вариантов I и II являются следствием формирования обратных потоков на различных расстояниях от источника пыления.

Данные табл. 2 в части относительного изменения концентрации «в цифре» показывают положительную тенденцию роста эффективности рассмотренных КПЛ на различных расстояниях от объекта пыления. Для вариантов III и IV расчётная эффективность КПЛ выше 90 %. В цепочке вариантов конструкции лесополосы II-III-IV с ростом расстояния эффективность снижается, причём для варианта II диапазон эффективности изменяется примерно на 5 %, для варианта III менее 1,5 %, а для варианта IV всего лишь около 0,5 %.

Дополнительно рассмотрено пространственное распределение загрязнения атмосферы на высоте +2 м над поверхностью пыления при вариации КПЛ (рис. 4). Хорошо видно, что использование КПЛ кардинально изменяет поведение функции пространственного распределения: из возрастающей функции для варианта I применение КПЛ делает поведение кривых более сложным — заметный рост сразу за барьерами и далее монотонный спад. С учётом указанного выше значения ПДК видно, что использование КПЛ изменяет размеры пространственных зон с уровнем загрязнения выше ПДК, при этом применение конструкции варианта IV обеспечивает снижение загрязнения атмосферы до безопасных уровней над всей пылящей поверхностью.

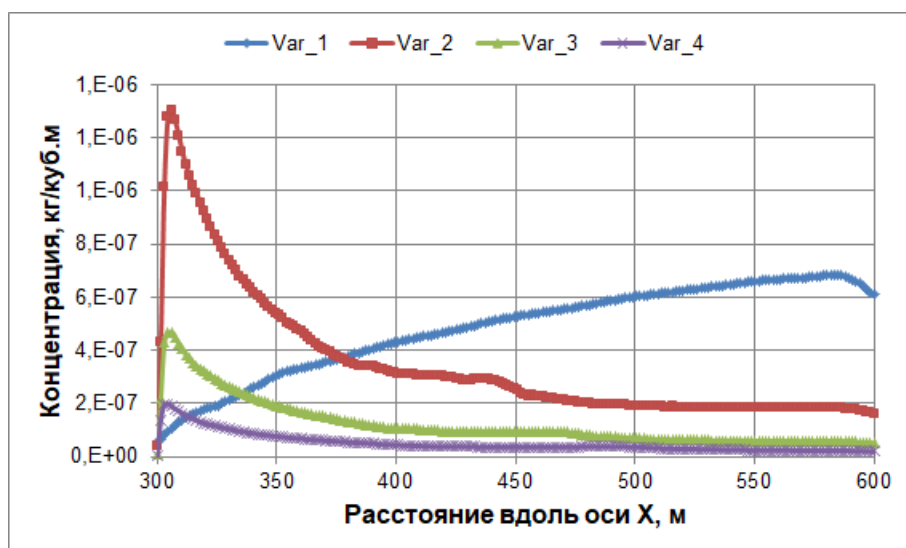


Рис. 4. Пространственное распределение загрязнения атмосферы на высоте +2 м над поверхностью пыления при вариации КПЛ

Fig. 4. Spatial distribution of atmospheric pollution at altitude +2 m above the dusting surface with a KPL variation

Заключение

Разработан набор компьютерных моделей аэрогазодинамики для исследования процессов пыления и переноса пыли при возведении с наветренной стороны горизонтальной техногенной пылящей поверхности (например, хвостохранилище) искусственных конструкций в виде непроницаемых барьеров, имитирующих принципы функционирования плотной лесополосы, с использованием программы COMSOL.

Моделирование аэродинамики реализовано в приближении несжимаемой жидкости с привлечением ($k-\epsilon$)-модели турбулентности. Моделирование переноса пыли базируется на стандартном уравнении конвективно-диффузионного переноса с учётом скорости оседания.

Выполнен цикл расчётов процессов пыления и переноса пыли размером 35 мкм для протяжённости пылящей поверхности 300 м при вариации искусственных конструкций: I — отсутствие барьера; II — один барьер высотой 0,5 м; III — два барьера высотой 0,5 и 1,0 м; IV — три барьера высотой 0,5, 1,0 и 1,5 м. Расчёты выполнены для высоты пылящей поверхности +50 м и фиксированной скорости ветра 8 м/с на высоте +10 м над основанием модели. Для оценки интенсивности пыления использованы зависимость Вестфала [15].

Полученные результаты в рамках принятых модельных предположений и диапазонов варьируемых параметров показали следующее:

1) подтверждена работоспособность разработанных компьютерных моделей аэрогазодинамики процессов пыления и переноса пыли при возведении с наветренной стороны горизонтальной пылящей поверхности искусственных сооружений в виде непроницаемых барьеров, имитирующих принципы функционирования конструкций плотной лесополосы;

2) обоснована целесообразность использования подобных искусственных сооружений с целью снижения уровня загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку и непосредственно над пылящей поверхностью;

3) наибольшая эффективность процессов снижения образования пыли и её перенос достигается при использовании двух- и трёхбарьерных конструкций и составляет не менее 90 %;

4) дальность влияния инженерных сооружений, обустраиваемых на приподнятой пылящей поверхности по типу плотной лесополосы, превышает «теоретическую» для горизонтальной поверхности.

Поставленная и решённая задача может быть расширена исследованиями по оценке влияния на эффективность искусственных сооружений (по типу плотной лесополосы) таких технологических параметров, как угол откоса пылящей поверхности и её протяжённости, а также природных факторов (скорость набегающего потока, стратификация атмосферы и др.).

Список источников

1. Карпович К. И. Лесомелиорация и рекультивация ландшафтов: учеб.-метод. пособие. Ульяновск: УлГУ, 2019. 48 с.
2. Тимерьянов А. Ш. Лесомелиорация ландшафтов: учеб. пособие. Уфа: БГАУ, 2007. 86 с.
3. Маштаков Д. А., Проездов П. Н. Агролесомелиорация, защитное лесоразведение и озеленение населённых пунктов, лесные пожары и борьба с ними: краткий курс лекций. Саратов: Саратовский ГАУ, 2014. 121 с.
4. Лесополосы. Их значение в поддержании устойчивости ландшафта. URL: <https://infopedia.su/5x3e14.html> (дата обращения: 11.12.2023).
5. Зелёные защитные полосы. URL: <https://scienceforum.ru/2020/article/2018020827> (дата обращения: 11.12.2023).
6. Засоба В. В., Чеплянский И. Я., Поповичев В. В. Семидесятилетний опыт создания государственных защитных лесных полос в степной зоне России // Живые и биокосные системы. 2019. № 27. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-27/article-3> (дата обращения: 11.12.2023).
7. Бульд В. Лесные полосы. Зачем их создавали? URL: <https://selnivi.ru/articles/selskoe-khozyaystvo/2020-09-18/lesnye-polosy-zachem-ih-sozdavali-432995> (дата обращения: 11.12.2023).
8. Лесополоса защитит поля от эрозии. URL: <https://dzen.ru/a/YcRvwsH9TxMIUmyM> (дата обращения: 11.12.2023).
9. Какое количество рядов деревьев и кустарников чаще всего высаживают в полезащитных лесополосах. URL: <https://sadovod-agronom.ru/derevyu/kakoe-kolichestvo-ryadov-derevev-i-kustarnikov-chasche-vsego-vysazhivayut-v-polezaschitnyh-lesopolosah.html> (дата обращения: 11.12.2023).
10. COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 12.05 2022).
11. Прогноз загрязнения атмосферы при случайном выборе дискретных пылящих участков на базе численного моделирования / П. В. Амосов [и др.] // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 5. С. 63–74. doi:10.21440/0536-1028-2021-5-63-74.
12. Мельников Н. Н., Бакланов А. А., Амосов П. В. Влияние высоты ограждения пылящей поверхности хвостохранилища на загрязнение атмосферы // Горный журнал. 2013. № 3. С. 92–94.

13. Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Обоснование методического подхода к оценке интенсивности пыления на хвостохранилище // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 1. С. 5–14. doi:10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.1.5-14.
14. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли / П. В. Амосов [и др.] // Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 61–73. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>.
15. Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust // J. Atmospheric Sciences. 1988. No. 45. P. 2145–2175.
16. Gillette D. A., Passi R. Modeling Dust Emission Caused by Wind Erosion // J. Geophysical Research-Atmospheres. 1988. Vol. 93, no. D11. P. 14233–14242.
17. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the Atmospheric Dust Cycle. 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme // J. Geophysical Research-Atmospheres. 1995. Vol. 100, no. D8. P. 16415–16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
18. Zender C. S., Bian H. S., Newman D. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology // J. Geophysical Research-Atmospheres. 2003. Vol. 108 (D14). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775> (accessed 23.01.2020).
19. Menut L., Schmechtig C., Marticorena B. Sensitivity of the Sandblasting Flux Calculations to the Soil Size Distribution Accuracy // J. of Atmospheric and Ocean Technology. 2005. Vol. 22. P. 1875–1884.
20. An improved dust emission model - Part 1: Model description and comparison against measurements / J. F. Kok [et al.] // Atmos. Chem. Phys. 2014. Vol. 14 (23). P. 13023–13041.
21. Mineral dust cycle in the Multiscale Online Nonhydrostatic Atmosphere Chemistry model (MONARCH). Version 2.0 / M. Klose [et al.] // Geosci. Model Dev. 2021. Vol. 14. P. 6403–6444. URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6403-2021> (accessed 18.09.2022).
22. Методы расчёта турбулентных течений / под ред. В. Колльмана. М.: Мир, 1984. 464 с.
23. Теодорович Э. В. Явления турбулентного переноса и метод ренормализационных групп // Журнал прикладной математики и механики. Вып. 2. 1988. Т. 52. С. 218–224.
24. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: Гигиенические нормативы [с изм., утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 31 мая 2018 г. № 37]. М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 55 с.

References

1. Karpovich K. I. *Lesomelioratsiya i rekul'tivatsiya landshaftov* [Forest reclamation and landscape recultivation]. Ulyanovsk, Ulyanovskii State University Publishing, 2019, 48 p.
2. Timeryanov A. Sh. *Lesomelioratsiya landshaftov* [Forest reclamation of landscapes]. Ufa, Bashkirskii State Agricultural University Publishing, 2007, 86 p.
3. Mashtakov D. A., Proezdov P. N. *Agrolesomelioratsiya, zashchitnoe lesorazvedenie i ozelenenie naselennykh punktov, lesnye pozhary i bor'ba s nimi* [Agroforestry, protective afforestation and landscaping of settlements, forest fires and their control]. Saratov, Saratovskii State Agricultural University Publishing, 2014, 121 p.
4. *Lesopolosy. Ikh znachenie v podderzhanii ustojchivosti landshafta* [Forest belts. Their importance in maintaining the stability of the landscape]. (In Russ.). Available at: <https://infopedia.su/5x3e14.html> (accessed 11.12.2023).
5. *Zelenye zashchitnye polosy* [Green protective stripes]. (In Russ.). Available at: <https://scienceforum.ru/2020/article/2018020827> (accessed 11.12.2023).
6. Zasoba V. V., Cheplyanskii I. Ya., Popovichev V. V. Semidesyatiletnij opyt sozdaniya gosudarstvennykh zashchitnykh lesnykh polos v stepnoj zone Rossii [Seventy years of experience in creating state protective forest belts in the steppe zone of Russia]. *Zhivie i biokosnye sistemy* [Living and biokos systems], 2019, no. 27. (In Russ.). Available at: <http://www.jbks.ru/archive/issue-27/article-3> (accessed 11.12.2023).
7. Bylts V. Lesnye polosy. Zachem ikh sozdavali? [Forest belts. Why were they created?]. Available at: <https://selnivi.ru/articles/selskoe-khozyaystvo/2020-09-18/lesnye-polosy-zachem-ih-sozdavali-432995> (accessed 11.12.2023).
8. *Lesopolosa zashchitit polya ot erozii* [The forest belt will protect the fields from erosion]. (In Russ.). Available at: <https://dzen.ru/a/YcRvwsH9TxMIUmyM> (accessed 11.12.2023).
9. *Kakoe kolichestvo ryadov i kustarnikov chashche vsego vysazhivayut v polezashchitnykh lesopolosakh* [How many rows of trees and shrubs are most often planted in protective forest belts]. (In Russ.). Available at: <https://sadovod->

agronom.ru/derevya/kakoe-kolichestvo-ryadov-derevev-i-kustarnikov-chasche-vsego-vysazhivayut-v-polezaschitnyh-lesopolosah.html (accessed 11.12.2023).

10. COMSOL. Available at: <https://www.comsol.ru/> (accessed 12.05.2022).
11. Amosov P. V., Baklanov A. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Prognoz zagryazneniya atmosfery pri sluchajnom vabore diskretnykh pylyashchikh uchastkov na baze chislenного моделиrovaniya [Forecast of atmospheric pollution with a random selection of discrete dusty areas (based on numerical modeling)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2021, no. 5, pp. 63–74. doi:10.21440/0536-1028-2021-5-63-74 (In Russ.).
12. Melnikov N. N., Baklanov A. A., Amosov P. V. Vliyanie vysoty ograzhdeniya pylyashchej poverkhnosti khvostokhranilishcha na zagryaznenie atmosfery [The effect of the height of the barrier of the dusty surface of the tailings dump on atmospheric pollution]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2013, no. 3, pp. 92–94. (In Russ.).
13. Amosov P. V., Baklanov A. A., Masloboev V. A. Obosnovanie metodicheskogo podkhoda k otsenke intensivnosti pyleniya na khvostokhranilishche [Justification of the methodical approach to estimation of dust intensity at tailing dump]. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS* [Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra], 2018, no. 1 (10), pp. 5–14. doi:10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.1.5-14 (In Russ.).
14. Amosov P. V., Baklanov A. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Chislennoe modelirovanie zagryazneniya atmosfery v podkhodakh sluchajного vybora diskretnykh uchastkov pyleniya i pointinterval'nogo raspredeleniya razmera pyli [Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size]. *Vestnik of MSTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 2022, no. 25 (1), pp. 61–73. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73> (In Russ.).
15. Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, no. 45, pp. 2145–2175.
16. Gillette D. A., Passi R. Modeling Dust Emission Caused by Wind Erosion. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1988, Vol. 93 (D11), pp. 14233–14242.
17. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the Atmospheric Dust Cycle. 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1995, Vol. 100 (D8), pp. 16415–16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
18. Zender C. S., Bian H. S., Newman D. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, Vol. 108 (D14). Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775> (accessed 23.01.2020).
19. Menut L., Schmechtig C., Marticorena B. Sensitivity of the Sandblasting Flux Calculations to the Soil Size Distribution Accuracy. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 2005, no. 22, pp. 1875–1884.
20. Kok J. F., Mahowald N. M., Fratini G., Gillies J. A., Ishizuka M., Leys J. F., Mikami M., Park M.-S., Park S.-U., Van Pelt R. S., Zobeck T. M. An improved dust emission model — Part 1: Model description and comparison against measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, Vol. 14 (23), pp. 13023–13041.
21. Klose M., Jorba O., Gonçalves Ageitos M., Escribano J., Dawson M. L., Obiso V., Di Tomaso E., Basart S., Montané Pinto G., Macchia F., Ginoux P., Guerschman J., Prigent C., Huang Y., Kok J. F., Miller R. L., Pérez García-Pando C. Mineral dust cycle in the Multiscale Online Nonhydrostatic Atmosphere Chemistry model (MONARCH) Version 2.0. *Geosci. Model Dev.*, 2021, no. 14, pp. 6403–6444. Available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6403-2021> (accessed 18.09.2022).
22. *Metody rascheta turbulentnykh techenij* [Methods for calculating turbulent flows]. Moscow, Mir Publishing, 1984, 464 p.
23. Teodorovich E. V. Yavleniya turbulentnogo perenosa i metod renormalizatsionnykh grupp [Phenomena of turbulent transport and the method of renormalization groups]. *Zhurnal prikladnoi matematiki i mekhaniki* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 1988, no. 52 (2), pp. 218–224. (In Russ.).
24. *Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernom vozduhe gorodskih i sel'skih poselenij: Gigienicheskie normativy* [Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements: Hygienic standards]. Moscow, Feder. Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2019, 55 p. (In Russ.).

Информация об авторах

П. В. Амосов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

А. А. Бакланов — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, консультант ВМО;

Г. В. Калабин — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник;

Д. В. Макаров — доктор технических наук, директор

Information about the authors

P. V. Amosov — PhD (Engineering), Leading Researcher;

A. A. Baklanov — Dr. Sc. (Phys.&Math.), Professor, Chief Scientist, Consultant WMO;

G. V. Kalabin — Dr. Sc. (Engineering), Professor, Chief Scientist;

D. V. Makarov — Dr. Sc. (Engineering), Director

Статья поступила в редакцию 17.11.2024; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 29.08.2025.
The article was submitted 17.11.2024; approved after reviewing 21.04.2025; accepted for publication 29.08.2025.