

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА УЛИЦАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

Статья посвящена проблеме пылеобразования на автомобильных дорогах различного назначения. Автор предлагает различные варианты определения количественных характеристик образующихся пылевых потоков и их сравнительную характеристику, подтвержденную экспериментальными исследованиями.

Анализ автотранспортных потоков и состояния дорог на улицах города показывает, что движение транспорта должно сопровождаться образованием пылегазовых выбросов [1]. Причем концентрация пыли в воздухе улиц будет зависеть в первую очередь от интенсивности движения транспорта и скорости воздушных потоков, определяющих объем воздуха, в котором распределяется пыль. В соответствии с нашими теоретическими представлениями, изложенными ранее («Вестник ОГУ» №3, 2001) [2], расчет категории опасности дороги (КОД) сводится к определению массы взметнувшейся пыли и ее химического состава. В свою очередь, количество пыли будет зависеть от сдуваемости, являющейся функцией влажности пылевидного материала и его дисперсности. Следовательно, для того чтобы определить объем воздушной среды, в котором рассеивается основная масса взметнувшейся пыли, необходимо изучить процессы образования и рассеяния пыли в атмосферном воздухе улицы. Нами были изучены условия формирования и распространения пылевого аэрозоля в атмосферном воздухе улиц различного назначения. Сначала в лабораторных условиях по методике [3] была определена сдуваемость образцов грунта, взятых с полотна временной дороги различной влажности. Полученные результаты представлены в виде рисунка 1 и указывают на то, что величина сдуваемости, изменяемая в широких пределах (от 0 до 10 мг/м<sup>2</sup>с), функционально связана с действием сил, отвечающих за пылесвязывание. Причем на кривых зависимости сдуваемости пыли от скорости воздушного потока можно выделить две области: 1 – где преобладают силы аутогезии в пылевидном материале; 2 – где наблюдается инерционный срыв частиц поверхности. Первая область соответствует уносу отдельных пылинок, не связанных со слоем грунта. Вторая – массовому уносу пыли и разрушению сплошности грунта. Причем характер зависимости одинаков для грунта любой влажности. Однако при повышении влажности в образце переход из

первой области во вторую становится не таким выраженным и происходит при больших динамических нагрузках на пылевидный материал. Это объясняется изменением механизма связывания пыли. Происходит переход инерционно-аутогезионного механизма связывания в адгезионный. На временных автомобильных дорогах с грунтовой поверхностью связывание пыли осуществляется по инерционно-аутогезионному механизму. Следовательно, величиной сдуваемости, отвечающей первой области на рисунке 1, можно пренебречь и описать изменение сдуваемости от скорости воздушных потоков второй части уравнением прямой

$$\Psi = a_1 v - v_1, \quad (1)$$

где  $a_1$  и  $v_1$  – коэффициенты, зависящие от природы и дисперсности пылевидного материала.

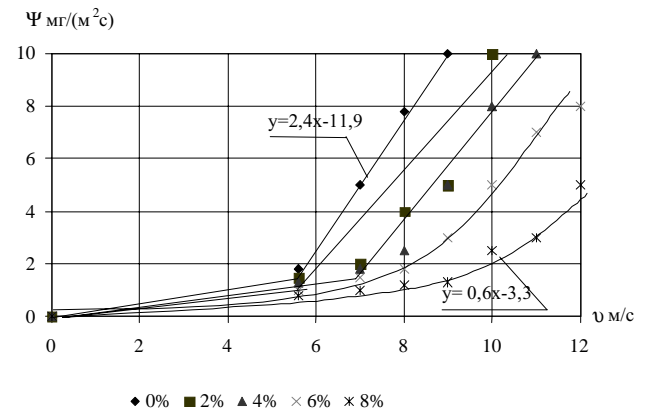


Рисунок 1. Зависимость критической скорости сдувания от влажности пылевидного материала

На асфальтированных автомобильных дорогах сплошной грунт будет лежать только в районе пересечения дороги с временной грунтовой и только после дождя. В остальное время пылевидный материал будет переноситься движущимся транспортом по всей поверхности дороги. Механизм связывания пыли будет уже адгезионным (взаимодействуют отдельные частицы с поверхностью дороги). И в этом случае зависимость сдуваемости пылевидного материала от скорости воздушных потоков можно описать прямой, объясняющей адге-

зионный механизм связывания пыли и поверхности и отвечающей на рисунке 1 первой области для грунта влажности 8%, которая описывает отрыв отдельных частиц с поверхности асфальтного полотна.

Значение сдуваемости пылевидного материала постоянной влажности для одного вида транспорта есть величина постоянная, площадь проекции автомобиля на проезжую часть – тоже, поэтому уместно их произведение ( $\psi \cdot S_A$ ) выразить через величину удельной сдуваемости ( $\psi_{уд}$ ). Нами были просчитаны значения удельной сдуваемости для различных транспортных средств в зависимости от скорости их движения на дорогах с асфальтовым и грунтовым покрытиями (таблица 1).

Таблица 1. Изменение пылевзметывания на улицах местного значения и магистралях при различных скоростных режимах движения транспортных средств

Тип АТС	Значения удельной сдуваемости пыли, мг/с, на магистральных улицах (числитель) и улицах местного значения с грунтовым покрытием (знаменатель) при различных скоростях движения, км/ч			
	20	40	60	80
Легковой	$\frac{3}{21}$	$\frac{29}{125}$	$\frac{57}{240}$	$\frac{85}{352}$
	$\frac{6}{46}$	$\frac{62}{269}$	$\frac{123}{516}$	$\frac{183}{758}$
Грузовой	$\frac{6}{48}$	$\frac{65}{282}$	$\frac{129}{541}$	$\frac{192}{789}$

Из данных таблицы видно, что наибольшее значение удельной сдуваемости характерно для автобусов при скорости движения 80 км/час, как для дороги с асфальтовым покрытием – 192 мг/с, так и с грунтовым покрытием – 789 мг/с. Наименьшее значение удельной сдуваемости характерно для легковых автомобилей при скорости движения 20 км/ч. Для дорог с асфальтовым покрытием она составляет 3 мг/с, а для дорог с грунтовым покрытием 21 мг/с.

Снижение запыленности воздуха на улицах города происходит как за счет естественного очищения атмосферы осадками, так и за счет увлажнения пылящей поверхности. С увеличением влажности грунта происходит усиление адгезионного взаимодействия в нем, что приводит к слипанию частиц, уменьшению их дисперсности и препятствует их переходу в аэрозоль. Нами проводились исследования влияния влажности почвы придорожной зоны на запыленность атмосферы улицы с грунтовым и асфальтовым покрытием при различном удалении от дороги (таблица 2, 3).

Таблица 2. Влияние влажности пылевидного материала на запыленность атмосферы улицы местного значения с грунтовой автодорогой. Скорость ветра – 0-3 м/с.

№	Влажность пылевидного материала, %	Запыленность воздуха, мг/м <sup>3</sup> , при удаленности от центра улицы, м					
		0	5	10	15	20	25
1	1±1	14±2	11±2	9±2	6±1	5±1	3±1
2	3±1	10±2	9±2	7±1	4±1	3±1	1,0±0,5
3	6±2	1,0±0,5	1,0±0,5	0,5±0,1	0,5±0,1	0,5±0,1	0,5±0,1
4	10±2	0,3±0,1	0,2±0,1	0,1±0,1	0,1±0,1	0,1±0,1	0,1±0,1

Таблица 3. Влияние влажности пылевидного материала на запыленность атмосферы улицы магистрального общегородского значения с регулируемым движением. Скорость ветра – 0-3 м/с.

№	Влажность пылевидного материала, %	Запыленность воздуха, мг/м <sup>3</sup> , при удаленности от центра улицы, м					
		0	10	20	30	40	50
1	1±1	4,5±1	1,5±0,5	1,0±0,5	0,6±0,1	0,5±0,1	0,4±0,1
2	3±1	3,7±1	1,2±0,5	0,9±0,1	0,5±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1
3	6±2	2,5±0,5	0,9±0,1	0,7±0,1	0,5±0,1	0,3±0,1	0,3±0,1
4	10±2	1,0±0,5	0,5±0,1	0,4±0,1	0,1±0,1	0,1±0,1	0,1±0,1

Анализ полученных данных показал, что при увеличении влажности пылевидного материала на поверхности дороги до 8-10% (т. е. в 8 раз по сравнению с сухим образцом) запыленность воздуха улицы с грунтовой дорогой снижается в 30-50 раз. Максимальная запыленность атмосферы улицы с грунтовой автодорогой наблюдается при влажности пылевидного материала 0-2% и составляет 14 мг/м<sup>3</sup>. Минимальная запыленность составляет 0,3 мг/м<sup>3</sup> при влажности пылевидного материала 8%.

Как видно из таблицы, максимальная запыленность атмосферы улицы с асфальтовой автодорогой наблюдается при влажности пылевидного материала 0-2% и составляет 4,5 мг/м<sup>3</sup>. Минимальная запыленность атмосферы составляет 0,1 мг/м<sup>3</sup> при влажности пылевидного материала 8%. При увеличении влажности поверхности в 8 раз запыленность атмосферы улицы с асфальтовой дорогой снижается в 40-50 раз. Предварительное увлажнение можно считать одним из способов предупреждения и снижения пылеобразования, но верхний слой нарушенной поверхности теряет необходимую влагу через 8-10 часов после выпадения осадков [1]. Следовательно, через такой промежуток времени грунт приобретает способность к интенсивному пылеобразованию. То есть, эффект увлажнения пылящей поверхности непродолжителен во времени.

Для оценки объема воздушной среды, в котором рассеивается основная масса взметнувшейся пыли, нами был проведен эксперимент по определению запыленности воздуха на разных высотах от пылящей поверхности, и дисперсности частиц, составляющих этот поток (таблица 4).

Таблица 4. Изменение запыленности воздуха на разных высотах. Температура воздуха – 30 °С, скорость воздушного потока – 3 м/с.

Место отбора пробы по высоте, м	Средняя концентрация пыли и погрешность ее определения, мг/м <sup>3</sup>	Содержание фракции 0-2 мкм, %	Средний радиус частиц, мкм
1	1,5±0,1	54	1,6
5	1,3±0,1	58	1,6
10	1,0±0,1	63	1,6
15	0,7±0,1	64	1,4
20	0,15±0,1	70	1,1
25	0,1±0,1	74	1

Из табличных данных следует, что концентрация пыли на высоте 1 м превышает ПДК в 10 раз. На высоте 20 м концентрация пыли уже находится на уровне ПДК. Основная масса пыли (90%) находится на высоте до 10 м. С увеличением высоты от 1 до 25 м концентрация пыли уменьшается в 15 раз, но, несмотря на снижение концентрации пыли с увеличением высоты, её токсичность возрастает, так как увеличивается дисперсность. Содержание тонких фракций в потоке на высоте 25 метров составляет уже 74%.

Зная состав и интенсивность транспортного потока, а также значения удельной сдуваемости для различных транспортных средств в зависимости от скорости их движения и влажности пылевидного материала, можно определить количество пыли, образующейся на улице определенного назначения.

Значение удельной сдуваемости ( $\psi_{уд}$ ), т. е. произведение сдуваемости пылевидного материала ( $\psi$ ) на площадь проекции автомобиля ( $S_A$ ), рассчитывалась нами при значениях скорости движения транспортных средств, предусмотренных правилами дорожного движения для населенных пунктов. Расчеты количества пыли, образующейся на улицах различного назначения в зависимости от скорости движения транспортных средств и влажности пылевидного материала, представлены в таблице 5. Данный расчет произведен из условий, что вся взметнувшаяся пыль находится во взвешенном состоянии, без учета оседания.

Максимальное количество пыли на магистральных улицах общегородского значения образуется при влажности пылевидного материала 0-2% и скорости движения транспортных средств 60-80 км/час и составляет  $9,6 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^5$  мг/с. Минимальное количество пыли образуется при влажности пылевидного материала 8% и скорости движения транспортных средств 20 км/час и не превышает  $1,0 \cdot 10^3$  мг/с. Аналогичная картина наблюдается на улицах местного значения с временным покрытием. Максимальное количество пыли, образующееся на улицах местного значения с временным покрытием, составляет  $7 \cdot 10^3$  мг/с, а минимальное – 51 мг/с.

Таблица 5. Количество пыли, образующейся на улицах магистрального и местного значения, рассчитанное через сдуваемость пылевидного материала

Влажность пылевидного материала, %	Скорость автомобиля, км/час	Значения $\Psi_{уд}$ , мг/с авт			Количество пыли, мг/с	
		легков.	грузов.	автобус	МОЗ	УМЗГ
0	20	21·10 <sup>3</sup>	46·10 <sup>3</sup>	48·10 <sup>3</sup>	8,5·10 <sup>3</sup>	4,3·10 <sup>2</sup>
2	20	8,5·10 <sup>3</sup>	18,3·10 <sup>3</sup>	19,2·10 <sup>3</sup>	3,4·10 <sup>3</sup>	1,7·10 <sup>2</sup>
4	20	4,3·10 <sup>3</sup>	9,2·10 <sup>3</sup>	9,6·10 <sup>3</sup>	1,7·10 <sup>3</sup>	8,5·10 <sup>1</sup>
6	20	4,3·10 <sup>3</sup>	9,2·10 <sup>3</sup>	9,6·10 <sup>3</sup>	1,7·10 <sup>3</sup>	8,5·10 <sup>1</sup>
8	20	3·10 <sup>3</sup>	5,5·10 <sup>3</sup>	6·10 <sup>3</sup>	1,0·10 <sup>3</sup>	5,1·10 <sup>1</sup>
0	40	125·10 <sup>3</sup>	270·10 <sup>3</sup>	283·10 <sup>3</sup>	5,0·10 <sup>4</sup>	2,5·10 <sup>3</sup>
2	40	86,5·10 <sup>3</sup>	186·10 <sup>3</sup>	196·10 <sup>3</sup>	3,5·10 <sup>4</sup>	1,7·10 <sup>3</sup>
4	40	78·10 <sup>3</sup>	168·10 <sup>3</sup>	176·10 <sup>3</sup>	3,1·10 <sup>4</sup>	1,6·10 <sup>3</sup>
6	40	56,3·10 <sup>3</sup>	121·10 <sup>3</sup>	127·10 <sup>3</sup>	2,3·10 <sup>4</sup>	1,1·10 <sup>3</sup>
8	40	29·10 <sup>3</sup>	61,5·10 <sup>3</sup>	64,5·10 <sup>3</sup>	1,1·10 <sup>4</sup>	5,7·10 <sup>2</sup>
0	60	240·10 <sup>3</sup>	516·10 <sup>3</sup>	541·10 <sup>3</sup>	9,6·10 <sup>4</sup>	4,8·10 <sup>3</sup>
2	60	172·10 <sup>3</sup>	371·10 <sup>3</sup>	389·10 <sup>3</sup>	6,9·10 <sup>4</sup>	3,4·10 <sup>3</sup>
4	60	159·10 <sup>3</sup>	342·10 <sup>3</sup>	359·10 <sup>3</sup>	6,4·10 <sup>4</sup>	3,2·10 <sup>3</sup>
6	60	113·10 <sup>3</sup>	244·10 <sup>3</sup>	256·10 <sup>3</sup>	4,5·10 <sup>4</sup>	2,3·10 <sup>3</sup>
8	60	57·10 <sup>3</sup>	123·10 <sup>3</sup>	129·10 <sup>3</sup>	2,3·10 <sup>4</sup>	1,1·10 <sup>3</sup>
0	80	352·10 <sup>3</sup>	757·10 <sup>3</sup>	794·10 <sup>3</sup>	1,4·10 <sup>5</sup>	7,0·10 <sup>3</sup>
2	80	256·10 <sup>3</sup>	552·10 <sup>3</sup>	579·10 <sup>3</sup>	1,0·10 <sup>5</sup>	5,1·10 <sup>3</sup>
4	80	238·10 <sup>3</sup>	513·10 <sup>3</sup>	539·10 <sup>3</sup>	9,6·10 <sup>4</sup>	4,8·10 <sup>3</sup>
6	80	169·10 <sup>3</sup>	365·10 <sup>3</sup>	383·10 <sup>3</sup>	6,8·10 <sup>4</sup>	3,4·10 <sup>3</sup>
8	80	85·10 <sup>3</sup>	183·10 <sup>3</sup>	192·10 <sup>3</sup>	3,4·10 <sup>4</sup>	1,7·10 <sup>3</sup>

Зная количество взметнувшейся пыли, можно определить категорию опасности дороги. Результаты расчетов категории опасности дороги представлены в виде графиков (рисунки 2, 3) и показывают, что при влажности 0% механизм связывания пыли будет инерционно-аутогезионным, а при влажности 8% механизм связывания пыли будет уже адгезионным.

Условие, не учитывающее оседание пыли из атмосферы, справедливо в условиях ветреной погоды ( $v > 10$  м/с). Однако вероятность таких погодных условий в г. Оренбурге не превышает 4% [1]. С другой стороны, количество пыли, образующейся на улице определенного назначения, можно считать не через сдуваемость, а через концентрацию пыли в воздухе, которая учитывает процесс оседания и справедлива в условиях штиля ( $v = 0-3$

м/с). Вероятность таких погодных условий составляет 45% [1].

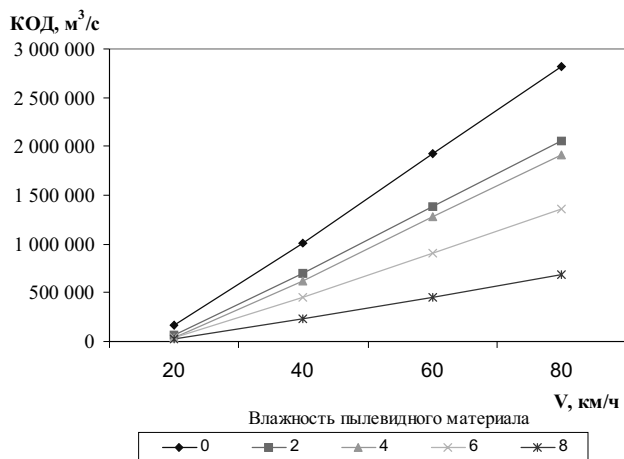


Рисунок 2. Зависимость категории опасности дороги от влажности пылевидного материала и скорости движения автотранспорта для МОЗ

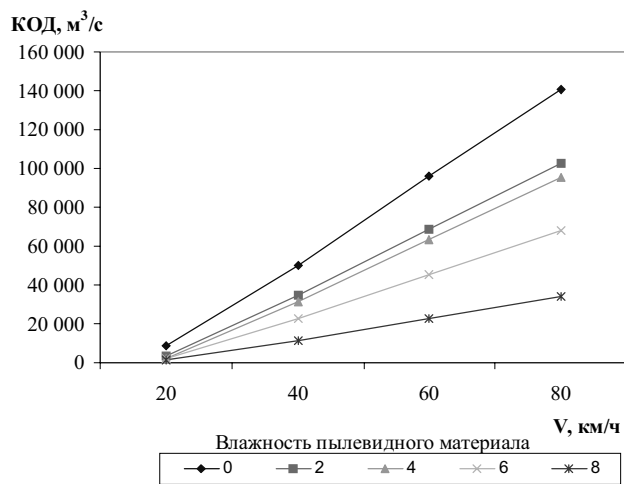


Рисунок 3. Зависимость категории опасности дороги от влажности пылевидного материала и скорости движения автотранспорта для УМЗГ

Данные расчета представлены в таблице 6 для магистрали общегородского значения (п-т. Победы) и улицы местного значения с временным покрытием (ул. Астраханская).

Максимальное загрязнение атмосферного воздуха для улиц магистрального общегородского значения и местного значения с временным покрытием наблюдаются при влажности пылевидного материала 0-2% и скорости движения транспортных средств 80 км/час и составляют  $4,2 \cdot 10^5$  и  $2,1 \cdot 10^4$  м³/с соответственно.

Правильность наших теоретических положений можно оценить, сравнивая значения КОД, рассчитанные через сдуваемость, со значениями КОД, рассчитанными через концентрации, которые были определены в воздухе придорожной зоны.

Таблица 6. Количество пыли, образующейся на улицах магистрального и местного значения, рассчитанное через ее содержание в воздухе

Влажность пылевидного материала, %	Скорость автомобиля, км/час	Количество пыли, мг/с		Категория опасности дороги, м³/с	
		МОЗ	УМЗГ	МОЗ	УМЗГ
0	20	$1,3 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^1$	$2,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^3$
2	20	$5,1 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^1$	$1,0 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^2$
4	20	$2,6 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^1$	$5,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^2$
6	20	$2,6 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^1$	$5,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^2$
8	20	$1,5 \cdot 10^2$	$7,7 \cdot 10^0$	$3,1 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^2$
0	40	$7,5 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^3$
2	40	$5,2 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^3$
4	40	$4,7 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^2$	$9,4 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^3$
6	40	$3,4 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^2$	$6,8 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$
8	40	$1,7 \cdot 10^3$	$8,6 \cdot 10^1$	$3,4 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^3$
0	60	$1,4 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$
2	60	$1,0 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^4$
4	60	$9,6 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^3$
6	60	$6,8 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^3$
8	60	$3,4 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$
0	80	$2,1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^4$
2	80	$1,5 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^4$
4	80	$1,4 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$
6	80	$1,0 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^4$
8	80	$5,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^3$

В результате исследования изменения КОД (и расчетного и экспериментального) были построены зависимости КОД от влажности пылевидного материала (рисунки 4, 5, 6). Для сравнения были взяты расчеты, произведенные при влажности пылевидного материала от 0 до 8%, исходя из условия, что средняя скорость движения транспортных средств по дорогам, имеющим асфальтовое покрытие, составляет 60 км/час, а для временных дорог 40 км/час. Как видно из рисунка 4, для магистральных улиц общегородского значения в условиях штиля ( $v=0-3$  м/с) возле дороги оседание не наблюдается. При удалении от полотна дороги (рисунки 5) справедливо условие, учитывающее процесс оседания пыли из атмосферы. При значительной скорости движения воздушных потоков ( $v>9$  м/с) экспериментальные значения выше расчетных. Очевидно, это можно объяснить отсутствием в расчетах данных по другим источникам пылевыделения, находящимся на рассматриваемой территории. Для улиц местного значения с временным покрытием (рисунки 6) в условиях штиля при влажности пылевидного материала 0-2% экспериментальные значения категории опасности дороги выше расчетных, так как для сухих пылевых материалов действует еще и другой механизм пылевзметывания. При влажности пылевидного материала 4-8% наблюдается сходимость расчетных и экспериментальных значений.

тальных данных. Для направленного воздушного потока экспериментальные данные также выше расчетных значений (механизм усложняется за счет эффекта вторичного взметывания).

Таким образом, зная категорию улицы, ее геометрические параметры и метеоусловия, можно дать прогноз экологической ситуации по пылевому фактору для любой территории (города).

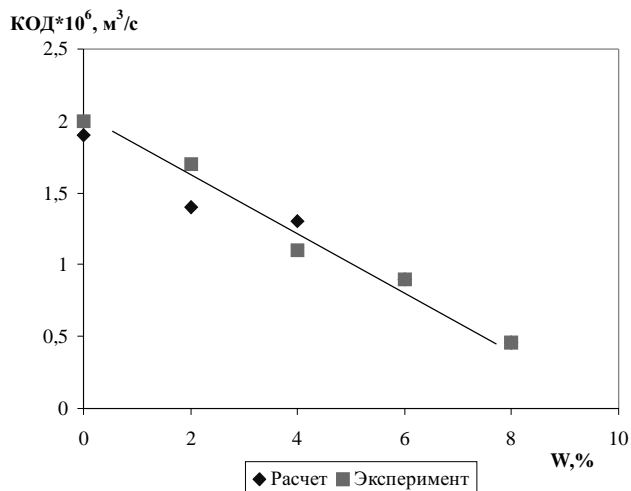


Рисунок 4. Зависимость расчетных и экспериментальных значений КОД от влажности пылевидного материала (возле дороги). МОЗ

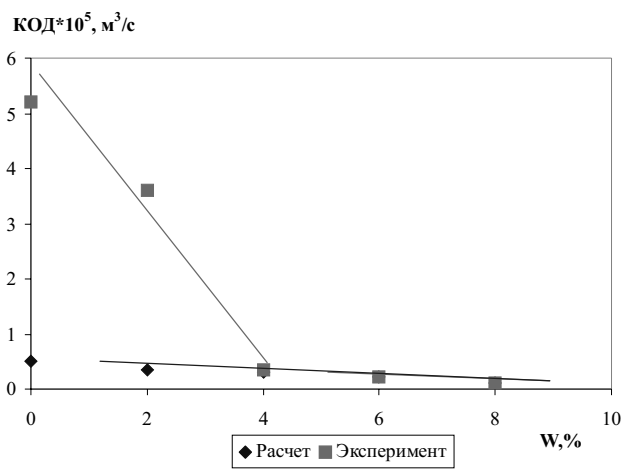


Рисунок 6. Зависимость расчетных и экспериментальных значений КОД от влажности пылевидного материала (возле дороги). УМЗГ

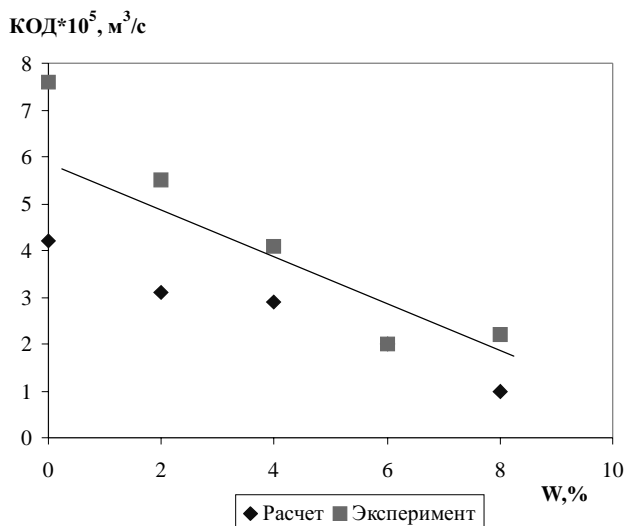


Рисунок 5. Зависимость расчетных и экспериментальных значений КОД от влажности пылевидного материала (при удалении от полотна дороги)

**Список использованной литературы:**

1. Цыцур А.А., Куксанов В.Ф., Бондаренко Е.В., Старокожева Е.А. Транспортно-дорожный комплекс и его влияние на экологическую обстановку города Оренбурга. – Оренбург: ИПК ОГУ, 2002. -164 с.
2. Цыцур А.А., Старокожева Е.А. Теоретические основы комплексной оценки качества атмосферы улиц промышленного города. / Вестник ОГУ, №3. - Оренбург: Изд-во ОГУ, 2001. С.71-78.
3. Старокожева Е.А. Оценка загрязнения атмосферы на территории, прилегающей к золоотвалам, и разработка составов и технологий связывания пылевидных материалов. Дис. на соис. уч. ст. кан. техн. наук. – Оренбург, 1998. 179 с.