

УДК

Канд. с.-х. наук Б. В. АНТИПОВ, д-р физ.-мат. наук В. М. БЕЛЬКОВ

О дрейфе гербицидов в полосу отвода

Ключевые слова: железнодорожный путь; балластная призма; техническая полоса отвода; биологическое засорение; скорость движения; путевой гидравлический опрыскиватель; гербициды; массоперенос микрокапель; моделирование; турбулентная пограничная область

На железнодорожных путях борьба с биологическим засорением растительностью балластной призмы проводится с использованием гербицидов общеистребительного действия, рабочие жидкости которых применяются способом опрыскивания.

При дрейфе рабочей жидкости в сторону от пути потенциальная опасность полной гибели возникает для древесно-кустарниковой растительности защитных лесонасаждений и плодовоощных растений на смежных пространственных базисах. С этим связана актуальность рассмотрения задачи дрейфа (сноса) части рабочей жидкости с пути. Тем более что некоторые используемые гербициды относятся к 3-му классу опасности для человека и теплокровных животных, а эти гербициды вносят в балластную призму техническими средствами, начиная от поливочных поездов до опрыскивающих устройств [1, 2] и даже «самодолок» [3]. При этом процесс распыления рабочей жидкости проводится на достаточно высокой скорости в диапазоне расхода рабочей жидкости от 75 до 350 л/га.

Рассмотрим задачу массопереноса микрокапель гербицида в перпендикулярном направлении от головки рельса вглубь технической полосы отвода при движении опрыскивающей установки со скоростью 25–30 км/ч. Визуально завихрения частиц рабочей жидкости при движении опрыскивателя способом «штанга впереди» сходны с завихрениями частиц снеговой массы при прохождении подвижного состава во время спокойного снегопада. Здесь уже при скорости движения подвижного состава выше 10–15 км/ч происходит срыв ламинарного обтекания на выступающих частях движущейся платформы. При дальнейшем наборе скорости движения вблизи поверхностей кузова возникает поле вихревых трубок. В зазоре между днищем кузова вагона и верхним строением пути образуется область повышенного давления (до 0,1 кг/см²), заполненная вихревыми трубками. Вокруг платформы образуется веерообразная пульсирующая турбулентная пограничная область, размеры и форма которой определяются скоростью движения и по ширине достигают 3 м. Применительно к опрыскиванию

установлено, что вследствие низкого давления в вихревых трубках капли рабочей жидкости, а равно пылевидные частицы износа рельсов, колесных пар, тормозных колодок всасываются внутрь, что способствует увеличению их устойчивости. Из-за повышенного давления между днищем кузова платформы и верхним строением пути возникает градиент давления по координате X , перпендикулярной оси рельса, что вызывает поток вихрей из щели наружу. В торце последнего вагона поезда формируется пограничная область с пониженным давлением. Испарение капель рабочей жидкости не учитываем, так как учет испарения значительно усложняет задачу и получить уравнение турбулентного рассеивания в аналитическом виде не удастся.

Данные исследования структуры снежного наносного покрова на невысоких строениях станций и платформ показывают, что при турбулизации потока образуются слоистые структуры толщиной слоя $\Delta h \approx 2,5 \div 3,0$ см. Толщина наносного слоя приблизительно соответствует диаметру вихрей. В случае с опрыскиванием это означает, что воздушный поток — пограничная область с каплями рабочей жидкости — разбивается на множество слоев, турбулентная диффузия в которых, полагаем для упрощения решения, протекает независимо.

Средняя скорость турбулентной пограничной области, образующейся вокруг поезда, меньше скорости поезда, поэтому в зоне за последним вагоном происходит сжатие внешних границ отстающей пограничной области по оси X и Z (высоте), интенсивное перемешивание и усреднение вихревых трубок по оси Y , совпадающей с направлением движения поезда.

Вследствие трения пограничная область за последним вагоном поезда постепенно останавливается, слоистость течения пограничной области нарушается, вихри в слоях вблизи поверхности балластной призмы начинают распадаться, и происходит выпадение поглощенных пылевидных частиц, смоченных раствором, на путь и техническую полосу отвода.

Моделирование обтекания объекта сложной формы в турбулентных условиях относится к наиболее сложным задачам аэродинамики. Для описания турбулентных движений в слоистой газовой среде используют аппарат теории флуктуаций. В соответствии с теорией Тейлора [4, 5, 6] коэффициент турбулентной диффузии в направлении оси X имеет вид



Визуализация рассеивания капель рабочей жидкости боковыми форсунками центральной штанги путевого гидравлического опрыскивателя ОПШ-5А при скорости опрыскивания 30 км/ч

$$D_{\text{турб.}} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2(\tau)}{d\tau}, \quad (1)$$

где: $\sigma_x^2(\tau)$ — средний квадрат относительного смещения частиц за время τ , равное $\sigma_x^2(\tau) = [x(\tau) - x(0)]^2$.

Тейлор, выражая $\sigma_x^2(\tau)$ через коэффициент корреляции Лагранжа, определил, что у источника загрязнения атмосферы величина $\sigma_x^2(\tau)$, определяющая характер распространения факела выбросов, пропорциональна τ^2 — квадрату времени, необходимого для перемещения частицы на расстояние $x(\tau) - x(0)$, а коэффициент турбулентной диффузии $D_{\text{турб}}$ пропорционален τ . На значительном расстоянии от рельса величина $\sigma_x^2(\tau)$ пропорциональна τ , а $D_{\text{турб}}$ становится постоянной величиной. Из этого следует, что вблизи от источника выбросов распространение частиц вдоль оси X происходит по линейному закону, а вдали от источника становится пропорциональным $x^{0.5}$.

Как видно из рисунка, область с приблизительно постоянной концентрацией C_0 , образующуюся при прохождении путевого опрыскивателя, можно аппроксимировать параллелепипедом шириной $2a$ и высотой H .

Для приземного слоя толщиной $H \approx 2,0$ м считаем коэффициенты турбулентной диффузии в каждом слое постоянными. Система уравнений, описывающая турбулентную диффузию из параллелепипеда вдоль координаты x для слоистого течения, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C_i(X, Z, \tau)}{\partial \tau} &= D_{\text{турб}} \frac{\partial^2 C_i(X, Z, \tau)}{\partial X^2}; \\ \frac{\partial C_i(X, Z, \tau)}{\partial Z} &= \text{const}, Z_i < Z < Z_{i+1}; \\ C_i(X, Z, \tau) &= 0 \text{ при } x > a, \tau = 0; \\ C_i(X, Z, 0) &= C^0 \text{ при } -a < X < a; \\ C(X, \tau) &= C^0 \text{ при } -a < X < a, \tau = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где C^0 — средняя начальная концентрация в слое параллелепипеда малых капель; i — номер слоя, $1 < i < k$; k (число слоев) = $\frac{H}{\Delta h}$.

Из структуры общего решения системы уравнений следует, что решение в слое i есть решение задачи диффузии из слоя конечной толщины ($-a < X < a$), содержащего в начальный момент диффундирующее вещество с постоянной концентрацией C^0 [7]:

$$C_i(X, \tau) = \frac{C^0}{2} \left[\text{erf} \left(\frac{a - X}{2\sqrt{D\tau_i}} \right) + \text{erf} \left(\frac{a + X}{2\sqrt{D\tau_i}} \right) \right]. \quad (3)$$

Уравнение описывает рассеяние вихрей, содержащих примеси, в слое i . При удалении вихрей от поверхности их генерации по слою в пограничной области они замедляются из-за трения и теряют устойчивость. На каждый слой, кроме того, действует градиент давления, направленный вниз, так как в прошлое наверху i -го слоя скорость движения воздуха ниже, чем внизу слоя. Вещество, содержащееся в вихре, оседает на поверхность грунта. Скорость оседания частиц из разрушенного вихря можно найти из уравнения закона Стокса. Приняв скорость оседания вихрей и частиц $v_z = \text{const}$, можно определить время существования вихря в i -м слое:

$$\tau_i = \frac{(h_0 + i\Delta h)}{v_z}, \quad (4)$$

где h_0 — среднее возвышение головки рельса над поверхностью технической полосы.

Оседание слоев приводит к концентрированию гербицида на надземных частях растений и в балластной призме. Просуммировав C_i по всем слоям, находим:

$$\begin{aligned} C_z(X, \tau_i) &= \sum_{i=1}^k C_i(X, \tau_i) = \\ &= \frac{C^0}{2} \left[\sum_{i=1}^k \text{erf} \frac{a - X}{\sqrt{\frac{D_{\text{турб.}}}{v_z} \left(h_0 + (2i - 1) \frac{\Delta h}{2} \right)}} + \right. \\ &\left. + \sum_{i=1}^k \text{erf} \frac{a + X}{\sqrt{\frac{D_{\text{турб.}}}{v_z} \left(h_0 + (2i - 1) \frac{\Delta h}{2} \right)}} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) имеет громоздкий вид и неудобно для проведения расчетов. Приведем уравнение (5) к безразмерному виду

$$\begin{aligned} C_z(X) &= \frac{C^0}{2} \left[\sum_{i=1}^k \text{erf} \frac{1 - \xi}{\sqrt{\Omega(1 + (2i - 1)\lambda)}} + \right. \\ &\left. + \sum_{i=1}^k \text{erf} \frac{1 + \xi}{\sqrt{\Omega(1 + (2i - 1)\lambda)}} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\xi = \frac{X}{a}$, $\lambda = \frac{\Delta h}{2h_0}$, $\Omega = \frac{D_{\text{турб.}} h_0}{v_z a^2}$.

ВОПРОС
x, y, z
— строчные или прописные (по всей статье)?

Для величин $\Delta h \sim 0,03$ м, $h_0 \sim 0,3 \div 1,5$ м параметр $\lambda \sim (0,05; 0,01)$; выражение $\Psi = [1 + (2i - 1)\lambda]^{-0,5}$, входящее в аргумент функции erf (7,46), изменяется в интервале значений: при $i = 1$ $\Psi \approx 1$, при $i = k$ $\Psi \sim (0,32; 0,57)$. Выражение $\Psi = [1 + (2i - 1)\lambda]^{-0,5}$ можно заменить с абсолютной погрешностью не более 15–25%, что приемлемо для расчетов рассеивания, средней величиной, равной $\left[1 + \frac{1}{(1+165\lambda)^{0,5}}\right]/2$.

С учетом сделанных оценок и суммируя ряды в уравнении (6), находим окончательное выражение для суммарной концентрации гербицида на частях растений и балласте:

$$C_x(X) = \frac{kC^0}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{1-\xi}{\sqrt{\Omega}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{1+165\lambda}} \right) \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{1+\xi}{\sqrt{\Omega}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{1+165\lambda}} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

Уравнение (7) получено в предположении, что скорость ветра в приземной области вдоль координаты X равна 0. Если слой обдувается ламинарным потоком, то решение не изменяется, но вместо координаты X в уравнении (7) следует подставить $v_x \tau$. Концентрационная кривая $C(X, \tau)$ будет не только «размываться» во времени, но и перемещаться вдоль координаты X .

Коэффициент турбулентной диффузии находится в пределах от 1 до $100 \text{ см}^2/\text{с}$ [6], коэффициент молекулярной диффузии характеризуется значениями порядка $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$. Для взвешенных веществ коэффициент турбулентной диффузии приблизительно составляет $10\text{--}20 \text{ см}^2/\text{с}$. Ширина турбулентной области приблизительно равна $a = 3$ м, величина скорости оседания взвешенных веществ размером $0,001\text{--}0,3$ мм при вязкости воздуха $18,1 \cdot 10^{-6}$ П·с равна соответственно $1 \cdot 10^{-2}\text{--}3,0$ м/с. Принимая закон распределения частиц по размеру как логарифмически нормальный, находим средний размер частицы $r \approx 0,03$ мм. Тогда средняя скорость оседания будет равна $v_z = 0,003$ м/с. Параметр $\Omega = 2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$.

Вывод. Рассмотрена задача массопереноса микрокапель гербицида в перпендикулярном направлении от головки рельса вглубь технической полосы отвода при движении опрыскивающей установки со

скоростью 25–30 км/ч. Установлено, что при среднеобъемном способе опрыскивания капли рабочей жидкости гербицида со средним размером $r \approx 0,03$ мм осаживаются на поверхность обрабатываемых объектов (надземные части растений) со скоростью 0,003 м/с и не переносятся от балластной призмы в техническую полосу отвода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов Б. В. Применение гербицида сплошного действия Грейдер на землях несельскохозяйственного пользования. М.: ЗАО Фирма «Август», 2010. 20 с.
2. Никитин Н. В., Спиридонов Ю. Я., Шестаков В. Г. Технические средства и технологические особенности применения гербицидов и арборицидов на объектах несельскохозяйственного пользования: научно-практическое руководство. М.: РАСХН-ГНУ ВНИИФ, 2009. 68 с.
3. Иванова С. Путь без травы // Дальневосточная магистраль. 2010. 24 сент.
4. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 1, 2. М.: Химия. 1995.
5. Карлслю Г., Егерд. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. М.: Наука, 1964. 487 с.
6. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача / пер. с англ. М.: Химия, 1982. 696 с.
7. Кафаров В. В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1972. 496 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

АНТИПОВ Борис Владимирович,
главный инженер, ООО «Арсенал».
115114, г. Москва, Дербеневская наб., д. 7,
корп. 12, этаж 4, ком. 8.
Тел.: (495) 223-05-63.
E-mail: b.antipov@ooo-arsenal.ru

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,
заведующий лабораторией «Экологическая безопасность»,
ОАО «ВНИИЖТ».
107996, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10.
Тел.: 8 (495) 602 83 67

УДК

Антипов Б. В., Бельков В. М. О дрейфе гербицидов в полосу отвода // Вестник «ВНИИЖТ». 2012. № 5. С.

Рассмотрена задача массопереноса микрокапель гербицида в перпендикулярном направлении от головки рельса вглубь технической полосы отвода при движении опрыскивающей установки со скоростью 25–30 км/ч. Ил. 1, библиогр. 7 назв.