

**Министерство сельского хозяйства и продовольствия
Республики Беларусь**

Академия аграрных наук Республики Беларусь

**Аграрная наука
на рубеже XXI века**

**Материалы Общего собрания
Академии аграрных наук Республики Беларусь
(16 ноября 2000 года)**

Минск 2000 г.

Кузьмицкий А.В., кандидат технических наук, доцент
Назаров А.И., кандидат технических наук
Дремук В.А., инженер
Белорусская государственная сельскохозяйственная академия

Моделирование внутриобъемного впрыска консервантов в кормовой поток

Одним из способов получения высококачественного корма является заготовка силоса с применением консервирующих веществ. Этот способ направлен на сохранение до 90% питательных веществ в растительной массе. Однако положительный результат может быть не достигнут из-за нарушения технологии консервирования, а также несоблюдения норм и равномерности внесения консервантов.

В соответствии с проведёнными в БГСХА исследованиями, а также работами зарубежных авторов наиболее перспективным следует считать внутриобъемный способ внесения консервантов. Для реализации этого способа предложена конструкция смесителя-разравнивателя, осуществляющего процесс внесения консервантов непосредственно в силосохранилище траншейного типа одновременно с перемешиванием корма, его разравниванием и трамбовкой.

Для обоснования конструктивных и технологических параметров смесителя-разравнивателя требуется разработать модель взаимодействия факела распыленного консерванта, движущегося со скоростью V_0 , с кормовым потоком.

В основу теории положим вероятностную (стохастическую) модель распространения капель в поровом пространстве движущегося растительного материала, обладающего скоростью U , порозностью ϵ и длиной резки l .

Для построения кривой сноса, рассмотрим движение капли консерванта по осям OX , OY , OZ . Пусть распылитель консерванта установлен в точке с координатами $(0;0;0)$. Направление струи совпадает с направлением оси OX , а частицы корма движутся с постоянной скоростью U в направлении оси OY . Ось OZ направлена вертикально вниз.

Консервант выходит из распылителя в виде системы капель. Каждая капля в процессе движения сталкивается с частицами корма, теряя при этом часть своей массы и изменяя скорость движения как по величине так и по направлению. При этом столкновения происходят в случайные моменты времени.

При расчете математического ожидания закона движения считаем, что случайные отклонения по направлению движения, вызванные столкновением с частицами корма, компенсируют друг друга. Изменение скорости по величине промоделировано наличием сопротивления среды.

Закон изменения массы консерванта в процессе движения:

$$m(x) = m_0 e^{-\frac{k}{a}x}, \quad k = 0,2 \quad (1)$$

Пусть масса консерванта, проходящая через распылитель за единицу времени равна m_0 . Если начальную скорость обозначить через V_0 , то

$$m_0 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \rho V_0 = 0,5 \rho d^2 V_0, \quad \text{при } \mu = 0,65, \quad \mu \frac{\pi}{4} \approx 0,5 \quad (2)$$

где ρ — плотность консерванта;

d — диаметр распылителя;

μ — коэффициент расхода распылителя.

Предположим, что столкновения частиц корма и капель консерванта представляют собой простейший поток событий по координате перемещения X . Тогда вероятность того, что капля консерванта на расстоянии X имеет n столкновений с частицами корма в соответствии с законом Пуассона равна:

$$P_n(x) = \frac{(\lambda x)^n}{n!} e^{-\lambda x}$$

где λ — средняя интенсивность потока.

Если обозначить через a среднюю длину свободного пробега капли, то

$$\lambda = 1/a$$

Предположим, что при столкновении с частицей корма капля консерванта теряет долю k своей массы. Тогда до первого столкновения движется масса m_0 . После первого — масса $k \cdot m_0$ остается с частицей корма, а масса $(1-k)m_0$ продолжает движение. После второго столкновения масса $k(1-k)m_0$ остается с частицей корма, а масса $(1-k)(1-k)m_0 = (1-k)^2 m_0$ продолжает движение. Аналогично получаем, что после n -го столкновения продолжает движение масса $(1-k)^n m_0$.

На расстоянии X от распылителя доля массы $P_0(x) = e^{-\lambda x}$ не имела столкновений, доля массы $P_1(x) = \lambda x e^{-\lambda x}$ имела одно столкновение, $P_2(x) = \frac{(\lambda x)^2}{2} e^{-\lambda x}$ — два столкновения и т.д. Таким образом на расстоянии X от распылителя продолжает движение масса:

$$\begin{aligned} m(x) &= m_0 \left(e^{-\lambda x} + (1-k)\lambda x e^{-\lambda x} + \frac{(1-k)^2 (\lambda x)^2}{2!} e^{-\lambda x} + \dots \right) = \\ &= m_0 e^{-\lambda x} \left(1 + \frac{(1-k)\lambda x}{1!} + \frac{(1-k)^2 \lambda^2 x^2}{2!} + \dots \right) = m_0 e^{-\lambda x} e^{(1-k)\lambda x} = m_0 e^{-k\lambda x} = m_0 e^{-\frac{kx}{a}} \quad (3) \end{aligned}$$

При выводе закона движения центра масс предположим, что изменение скорости движения при соударениях можно смоделировать наличием сопротивления среды, propor-

циональным первой степени относительной скорости. Тогда проекция уравнения движения на ось OX примет вид:

$$m \frac{dV_x}{dt} = -CV_x, \quad (4)$$

где V_x — проекция скорости по оси OX ,
 C — коэффициент сопротивления.

Хотя консервант в процессе движения теряет часть массы, использование уравнения движения И.В. Мещерского, не правомерно, т.к. при потере массы на столкновение не происходит передача количества движения оставшейся массе.

Сопротивление среды движущейся массе консерванта зависит не только от скорости движения, но и от плотности кормового потока. Плотность потока можно охарактеризовать структурным параметром a . Чем больше a , тем меньше сопротивление. Если же $a \rightarrow 0$, то сопротивление растет до бесконечности, поэтому можно принять что

$$C = b/a^n$$

где b и n — постоянные.

На основе сравнения теоретических зависимостей с опытными данными принято $n=2$, $b=10^{-8}$, т.е. $C=b/a^2$.

Перепишем уравнение (2.12) при начальном условии $V_x(0)=V_0$ в виде:

$$dV_x = -\frac{b}{a^2 m_0} e^{\frac{kx}{a}} V_x dt$$

Так как $V_x = dx/dt$, то оно примет вид:

$$dV_x = -\frac{b}{a^2 m_0} e^{\frac{kx}{a}} dx$$

Переменные здесь разделены и его можно проинтегрировать по X от 0 до X , по V_x от V_0 до V :

$$V_x - V_0 = -\frac{b}{kam_0} (1 - e^{\frac{kx}{a}}).$$

Запишем его в виде:
$$V_x = \frac{V_0 kam_0 + b}{kam_0} - \frac{b}{kam_0} e^{\frac{kx}{a}} \quad (5)$$

Пусть $D = \frac{V_0 kam_0 + b}{kam_0}$; $E = \frac{b}{kam_0}$.

Поскольку $V_x = dx/dt$, получим: $\frac{dx}{D - E e^{\frac{kx}{a}}} = dt$, или $\frac{e^{\frac{kx}{a}} dx}{De^{\frac{kx}{a}} - E} = dt$.

Переменные разделены и выражение можно интегрировать по t от 0 до t , по X от 0 до X . После интегрирования получим:

$$\ln \frac{De^{\frac{kx}{a}} - E}{D - E} = -\frac{kD}{a} t, \text{ или } \frac{De^{\frac{kx}{a}} - E}{D - E} = e^{-\frac{kD}{a} t}$$

Обозначим $A = \frac{kD}{a}$ и найдем X :
$$X = \frac{a}{k} \ln \frac{D}{E + (D - E)e^{-At}}$$

Введем обозначение $W = \frac{D-E}{E} = \frac{D}{E} - 1$, тогда $X = \frac{a}{k} \ln \frac{1+W}{1+We^{-At}}$. (6)

При этом: $W = \frac{V_0 k a m_0 + b - b k a m_0}{k a m_0} = \frac{V_0 k a m_0}{b} = 0,5 k d^2 \rho V_0^2 a \cdot 10^8$

$$A = \frac{k}{a} (W + 1) E = \frac{b}{a^2 m_0} (1 + W).$$

Если в формуле (6) t стремится к бесконечности, то получим предельное значение X , которое равно максимальной глубине проникновения струи консерванта:

$$L = \frac{a}{k} \ln(1 + W), \quad (7)$$

Для изучения величины сноса получим закон движения консерванта в проекции на ось OY из уравнения:

$$m \frac{dV_y}{dt} = -C (U - V_y).$$

Так как $m = m_0 e^{-\frac{kx}{a}}$, то учитывая (6) находим $m = m_0 \frac{1+We^{-At}}{1+W}$, тогда:

$$\frac{dV_y}{U - V_y} = -\frac{C}{m_0} \frac{1+W}{1+We^{-At}} dt.$$

Интегрируя непосредственно и удовлетворяя начальному условию $V_y = 0$ при $t = 0$, получим:

$$V_y = U \left(1 - \frac{1+W}{W + e^{At}} \right). \quad (8)$$

Поскольку $V_y = dy/dt$, то интегрируя при условии $y = 0$ при $t = 0$, получим:

$$y = U \left(t - \frac{1+W}{AW} \ln \frac{1+W}{1+We^{-At}} \right). \quad (9)$$

В уравнении (6) второй член равен $\frac{1}{V_0} x$. Из этого уравнения находим:

$$\frac{1+W}{1+We^{-At}} = e^{\frac{kx}{a}} \quad \text{или} \quad e^{-At} = \frac{(1+W)e^{-\frac{kx}{a}} - 1}{W}, \quad \text{откуда: } t = \frac{1}{A} \ln \frac{W}{(1+W)e^{-\frac{kx}{a}} - 1}$$

Подставив значение t в выражение (9) получим:

$$y = U \left(\frac{1}{A} \ln \frac{W}{(1+W)e^{-\frac{kx}{a}} - 1} - \frac{x}{V_0} \right). \quad (10)$$

Определим параметры сопла распылителя (d и V_0), обеспечивающие расход консерванта M на глубине проникновения X и величину сноса на этой глубине при заданном значении a .

Поскольку $x \leq L$ определим сначала параметры d и V_0 , обеспечивающие глубину L , большую заданного X . Из (7) имеем:

$$1+W = e^{\frac{kL}{a}} \quad \text{или} \quad 0,5k\rho d^2 V_0^2 a \cdot 10^8 = e^{\frac{kL}{a}} - 1. \quad (11)$$

$$\text{Из (1) и (2) по условию } m(x)=M \text{ находим: } 0,5\rho d^2 V_0 = M e^{\frac{kx}{a}}. \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (11) и (12) относительно d и V_0 , находим:

$$V_0 = \frac{e^{\frac{kL}{a}} - 1}{10^8 \cdot a \cdot M \cdot e^{\frac{kx}{a}} k}; \quad (13)$$

$$d = \sqrt{\frac{M \cdot e^{\frac{kx}{a}}}{0,5\rho V_0}}. \quad (14)$$

Зная V_0 , d , U , W , m_0 и A по выражению (10) рассчитываем величину сноса y .

Заметим, что до максимальной глубины проникновения консерванта доходит масса $m(L)$, равная (согласно выражений (3) и (7)):

$$m(L) = m_0 e^{-\frac{kL}{a}} = \frac{m_0}{1+W}, \quad \text{что от начальной массы составляет долю } 1/(1+W).$$

На основании вышеизложенного можно построить графические зависимости $m(x)/m_0$ и $y(x)$, приведенные на (рис. 1)

На этом рисунке ось OX — направление проникновения консерванта — направлена горизонтально. Вверх от нее откладывается снос $y(x)$. Графики сноса рассчитаны для различных значений V_0 и U . В нижней части номограммы расположен график $m(x)/m_0$ в процентах от впрыснутой дозы консерванта. Вертикальные линии отмечают значение L (максимальная глубина проникновения) для различных V_0 , указанных в правом столбике. Рядом в столбике приведены значения m_0 для этих V_0 и $d=0,0015$ м.

Пусть нас интересует глубина $x=400$ мм. Чтобы струя достигла этой глубины следует взять $V_0 > 10$ м/с. Видно, что при $x=400$ $m(x)/m_0$ составляет примерно 2%. Если мы выберем $V_0=15$ м/с, то расход консерванта на глубине 40 см составит 2% от 16,78, т.е. 0,33 см³/с. Если требуется большая доза, следует взять большее значение V_0 , (или больший диаметр распылителя). При $V_0=20$ м/с — 2% от 22,5 составит 0,45 см³/с. Из точки оси абсцисс $x=400$ мм проведём вертикаль до пересечения с кривой сноса (например при $U=5$ м/с). Из полученной точки проведём горизонталь до пересечения с осью OY , находим, что снос равен $y \approx 8$ мм. Аналогично дан анализ глубины $x=180$ мм. При этом выбрана скорость $V_0=10$ м/с и $U=15$ м/с. Так как при $x=180$ $m(x)/m_0=16$ и $m_0=(V_0=10)=11,25$, то $m(x=180)=1,8$ см³/с. Снос при $U=15$ м/с равен 1 см.

Зная параметры зоны обработки, можно, в частности определить количество распылителей, расстояние между ними, напор и др. с учетом скорости и плотности кормового потока что повысит равномерность распределения консерванта в кормовом потоке и в конечном итоге к повышению качества силоса.

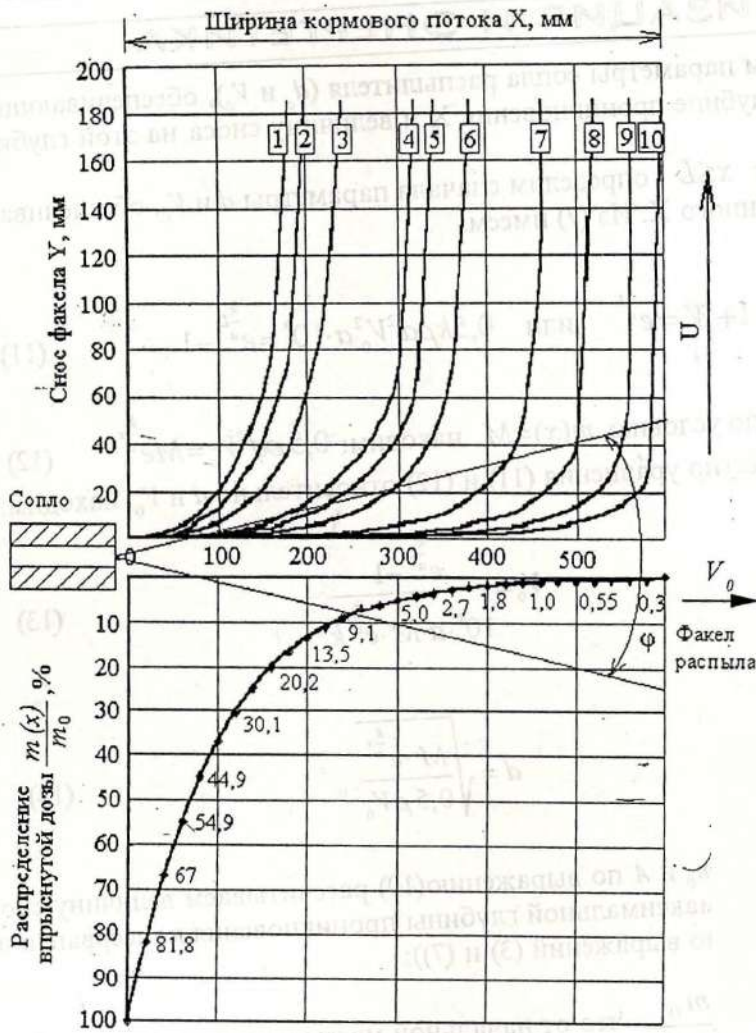


Рис. 2. Номограмма для определения ширины кормопровода X с учетом сноса струи и распределения дозы по глубине проникновения ($d=0,0015$ м; $a=0,02$ м).

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. $V_0=5$ м/с, $U=15$ м/с; | 6. $V_0=10$ м/с, $U=5$ м/с; |
| 2. $V_0=5$ м/с, $U=10$ м/с; | 7. $V_0=15$ м/с, $U=5$ м/с; |
| 3. $V_0=5$ м/с, $U=5$ м/с; | 8. $V_0=20$ м/с, $U=5$ м/с; |
| 4. $V_0=10$ м/с, $U=15$ м/с; | 9. $V_0=25$ м/с, $U=5$ м/с; |
| 5. $V_0=10$ м/с, $U=10$ м/с; | 10. $V_0=30$ м/с, $U=5$ м/с; |