

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕСЕНИЯ КОНСЕРВАНТА В ПНЕВМОКОРМОВОЙ ПОТОК НА КОРМОУБОРОЧНОМ КОМБАЙНЕ

А.В. Кузьмицкий, докт. техн. наук (БГАТУ); Г.Ф. Громько, канд. физ.-мат. наук (Ин-т математики НАН Беларуси); П.В. Авраменко, ст. преподаватель (БГАТУ)

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы, связанные с численным моделированием движения капель жидкого консерванта в пневмокормовом потоке с учетом неоднородности свойств воздушной и кормовой среды вдоль силосопровода, а также дополнительного влияния сил электростатического поля. Предлагается программа визуализации движения капель для анализа места впрыска консерванта.

In the article the issue of equations of numerical modeling of the drops liquid preservative movements in a pneumothe fodder flow taking into account heterogeneity of the air and fodder environment properties lengthways of silage tube, and also additional influence of electrostatic field forces is considered. The program of drops movements visualization for the analysis of a preservative introduction place is offered.

Введение

В современном кормопроизводстве применение жидких консервантов при заготовке силоса является одной из главных технологических составляющих, позволяющее получать высококачественный корм. При этом наиболее перспективным способом их дозирования является внесение жидких консервантов на кормоуборочных комбайнах [1, 2].

С целью управления процессом внесения, а также выбором оптимальных технологических параметров (для снижения неравномерности и потерь при внесении), места впрыска, необходимо учитывать основные закономерности процесса движения капель жидкого консерванта в движущемся корме (пневмокормовой поток).

Существующие исследования по моделированию проникновения жидкого консерванта в измельченный растительный материал основываются на аналитических моделях внесения в неизмельченный поток растительного материала при формировании рулона [3] в насыпной измельченный растительный материал, при закладке на хранение, а также при инъекционном внесении в корм на прицепах [4].

В работах [5, 6] впервые предложена модель внесения жидкого консерванта в пневмокормовой поток измельченной растительной массы, учитывающая как структурные свойства пневмокормового потока измельченной растительной массы, так и законы движения и поглощения капель консерванта.

В настоящей работе предлагается математическая модель движения капель жидкого консерванта в пневмокормовом потоке силосопровода кормоуборочного комбайна, учитывающая дополнительное влияние электростатического поля при новом способе внесения [7, 8], свойства пневмокормовой среды.

Основная часть

Постановка задач

Для исследования процесса движения и проникновения жидкого консерванта выделим область силосопровода с распылительной форсункой, установленной на высоте H_{ϕ} (рис. 1).

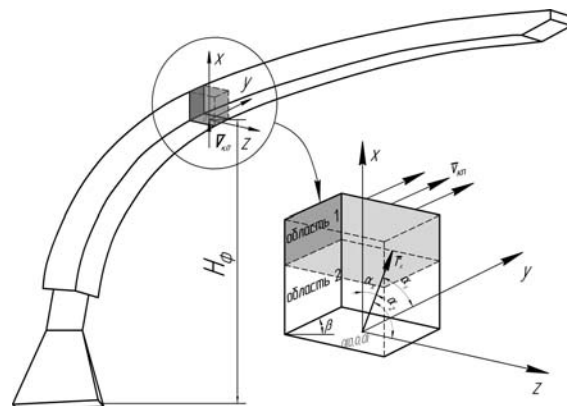


Рис. 1. Расчетная область процесса внесения жидкого консерванта в силосопровод

Особенность внесения консерванта в силосопровод кормоуборочного комбайна состоит в том, что рабочая жидкость диспергируется распылителем, и образовавшиеся капли консерванта движутся первоначально в воздушном потоке силосопровода до тех пор, пока не достигнут пневмокормового потока. Капли, попавшие в пневмокормовой поток, проникают вглубь него и движутся вместе с ним. Поэтому исследуемый процесс движения капли консерванта и ее проникновение в кормовой поток целесообразно разделить на две задачи:

Задача 1. Движение капли консерванта в воздухе (вдоль нижней грани боковой поверхности силосопровода – область 1). Искомым решением этой задачи является скорость капли и координаты ее центра тяжести в момент столкновения с пневмокормовым потоком.

Задача 2. Движение капли консерванта в измельченной силосной массе (верхняя часть силосопровода – область 2). Искомым решением этой задачи является скорость, координаты центра тяжести, глубина проникновения и снос капли.

Математическое моделирование движения каплей жидкого консерванта в пневмокормовом потоке силосопровода

Для расчета *области 1* будем полагать, что на протяжении всей длины силосопровода сечение имеет постоянный размер. К нижней части желоба прикреплен форсунка (распылитель), через которую впрыскивается консервант. Положим, что в начальный момент времени $t_0=0$ распылитель находится в начале координат $O(0,0,0)$, направление оси O_x совпадает с направлением струи консерванта, направление оси O_y совпадает с направлением кормового потока, который движется вдоль боковой поверхности, а ось O_z – перпендикулярно выбранным плоскостям (рис. 1).

Положение капли консерванта будем определять по координатам ее центра тяжести. Текущее положение частицы в пространстве $\vec{r}_k = \vec{r}_k(t)$, как функции от времени t , определяется полем скоростей

$$d\vec{r}_k/dt = \vec{v}_k,$$

где $\vec{r}_k = (x_k, y_k, z_k)$ и $x_k = x_k(t)$, $y_k = y_k(t)$, $z_k = z_k(t)$ – функции от времени.

Зададим направление впрыска консерванта через углы к соответствующим координатным осям: α_x , α_y и α_z ,

$$\text{где } \cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z = 1.$$

Тогда вектор начальной скорости частиц консерванта имеет следующий вид:

$$\vec{v}_{k,0} = v_{k,0}(\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z).$$

Движение частицы, т.е. путь, пройденный каплей жидкого консерванта, как и ее траектория, зависит от величины и направления приложенных к ней сил, и определяется их суммарным воздействием. Поэтому закон баланса приложенных к капле сил имеет вид:

$$m_k d\vec{v}_k/dt = \sum \vec{F}_k, \tag{1}$$

где m_k – масса капли консерванта, кг;

$\vec{v}_k = (v_{k,x}, v_{k,y}, v_{k,z})$ – вектор скорости капли (центра капли), м/с;

$\sum \vec{F}_k$ – силы, действующие на каплю, находящуюся в движущемся потоке газа, Н;

t – время движения капли, с.

Рассмотрим характер сил, действующих на каплю консерванта, под действием которых она перемещается в направлении к пневмокормовому потоку.

Согласно [9, с. 274], на каплю жидкого консерванта действуют следующие силы:

$$\sum \vec{F}_k = \vec{F}_g + \vec{F}_э + \vec{F}_E + \vec{F}_c,$$

где $\vec{F}_g, \vec{F}_э, \vec{F}_c$ – силы (тяжести, Кулона, сопротивления среды), Н;

\vec{F}_E – сила, обусловленная неравномерным распределением напряженности электрического поля, Н.

Составим уравнения движения капли консерванта под действием приложенных сил. Для этого рассмотрим проекции сил в выбранной системе координат, связанной с поверхностью силосопровода и местом ввода консерванта (рис. 2, 3):

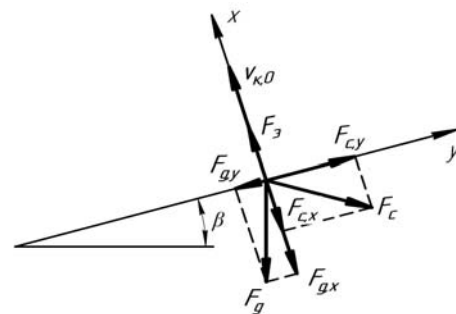


Рис. 2. Силы, действующие на каплю консерванта (XOY)

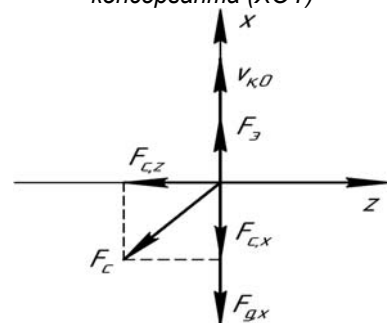


Рис. 3. Силы, действующие на каплю консерванта (XOZ)

а) сила тяжести

$$\vec{F}_g = m_k g \tag{2}$$

в декартовой системе координат определяется вектором $\vec{F}_g = (F_{gx}, F_{gy}, 0)$,

$$\text{где } F_{gx} = 0, F_{gy} = -m_k g, F_{gz} = 0.$$

В новой системе координат имеем следующие составляющие вектора силы тяжести:

$$F_{gx} = -m_k g \cos \beta, F_{gy} = -m_k g \sin \beta.$$

Тогда выражение для силы тяжести (2) примет вид:

$$\vec{F}_g = -m_k g \cdot (\cos \beta, \sin \beta, 0); \tag{3}$$

б) сила, обусловленная действием электрического поля на заряженную каплю, определяется через заряд капли q_k и напряженность электрического поля \vec{E} , в этом случае равна

$$\vec{F}_3 = q_k \vec{E} = (q_k E, 0, 0) \quad (4)$$

и направлена перпендикулярно граням силосопровода, на которых размещены электроды;

в) сила, обусловленная неравномерностью распределения напряженности электрического поля F_E .

Результаты оценки соотношения сил F_3 и F_E показывают, что силою F_E для практических случаев пренебрегают, т.к. $F_E < 0,01F_3$, при $E \geq 1$ кВ/см [9, с. 274]. В связи с этим, для дальнейших расчетов можно принять напряженность электрического поля постоянной ($E = const$);

г) сила аэродинамического (лобового) сопротивления \vec{F}_c , препятствующая движению капли в среде. Данная сила возникает по причине разницы скорости капли и среды, в которой движется. Определяется по формуле [10, стр. 54]:

$$\vec{F}_c = C_D S_k (\vec{v}_g - \vec{v}_k) |\vec{v}_g - \vec{v}_k| / 2,$$

где $S_k = \pi d_k^2 / 4$ – площадь миделева сечения сферической частицы, м²;

v_k, v_g – скорость движения капли, воздуха, м/с;

C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления капли, который определяется как $C_D = (24/Re) C(Re)$.

Поправочная функция $C = C(Re)$ в соответствии с [10, с. 55] имеет вид:

$$C = C(Re) = \begin{cases} 1 & Re < 1 \\ 1 + Re^{2/3} / 6 & \text{при } 1 \leq Re < 10^3 \\ 0.11 Re / 6 & Re \geq 10^3 \end{cases}$$

и зависит от критерия Рейнольдса Re , который рассчитывается исходя из определения относительной скорости $|\vec{v}_g - \vec{v}_k|$ капли консерванта:

$$|\vec{v}_g - \vec{v}_k| = \sqrt{(v_{g,x} - v_{k,x})^2 + (v_{g,y} - v_{k,y})^2 + (v_{g,z} - v_{k,z})^2},$$

тогда в новой системе координат для скорости газа имеем: $\vec{v}_g = (v_g, 0, 0)$, где неизвестные компоненты вектора скорости капли консерванта обозначим через $v_{k,x}$, $v_{k,y}$ и $v_{k,z}$. Тогда модуль относительной скорости капли консерванта примет следующий вид:

$$|\vec{v}_g - \vec{v}_k| = \sqrt{v_{k,x}^2 + (v_g - v_{k,y})^2 + v_{k,z}^2}.$$

Обозначим через $\tilde{C}_D(Re)$ следующее выражение:

$$\tilde{C}_D(Re) = C_D S_k |\vec{v}_g - \vec{v}_k| / 2.$$

Тогда в новой системе координат уравнения движения одиночной капли консерванта (1) в проекциях на соответствующие оси имеют вид:

$$m_k dv_{k,x} / dt = -\tilde{C}_D(Re) v_{k,x} - m_k g \cos \beta + q_k E, \quad (5)$$

$$m_k dv_{k,y} / dt = \tilde{C}_D(Re) (v_g - v_{k,y}) - m_k g \sin \beta, \quad (6)$$

$$m_k dv_{k,z} / dt = -\tilde{C}_D(Re) v_{k,z}. \quad (7)$$

Система уравнений (5) – (7) – это система дифференциальных уравнений первого порядка относи-

тельно компонент скорости капли консерванта $v_{k,x}$, $v_{k,y}$ и $v_{k,z}$. Она нелинейная, поскольку коэффициент $C_D(Re)$ зависит от скорости капли, которая является неизвестной. Поэтому для решения задачи будем использовать неявные разностные схемы, реализация которых проводится с помощью итерационного процесса типа Ньютона [11–13].

Для **области 2** будем считать, что в начале зоны обработки, скорость частиц консерванта и место их входа уже определены, т.е. $\vec{v}_{k,ex}$ и $\vec{r}_{k,ex}$ – найдены.

Моделирование пневмокормового потока, в котором движется капля консерванта, приведено в работе [5], где была предложена структурная модель, элементами которой являлись круговые цилиндры, диаметр основания которых соответствует среднему диаметру частиц, причем элементы в пространстве располагаются равномерно и одинаково во всех направлениях. Предложенная модель позволяет определить структурный параметр пневмокормового потока a_{kn} .

Аналогично предыдущему разделу, для оценки движения консерванта воспользуемся балансом количества движения (1) при $t > t_{ex, kn}$.

По аналогии с задачей 1, находим силы, действующие на каплю консерванта: F_g – по формуле (3), F_3 – по формуле (4).

Силу сопротивления среды, которая представляет движущийся пневмокормовый поток со скоростью v_{kn} , определим согласно [14], используя введенный структурный параметр

$$F_c = -C_D (v_k - v_{kn}),$$

где $C_D = b/a_{kn}^n$, a_{kn} – структурный параметр;

b и n – постоянные.

С учетом рассмотренных сил, система уравнений движения капли консерванта (1) в проекциях на оси выбранной системы координат для $t > t_{ex}$ переписывается в виде:

$$m_k dv_{k,x} / dt = -C_D v_{k,x} - m_k g \cos \beta + q_k E,$$

$$v_{k,x} |_{t=t_{ex}} = v_{k,x,ex}; \quad (8)$$

$$m_k dv_{k,y} / dt = C_D (v_{kn} - v_{k,y}) - m_k g \sin \beta,$$

$$v_{k,y} |_{t=t_{ex}} = v_{k,y,ex}; \quad (9)$$

$$m_k dv_{k,z} / dt = -C_D v_{k,z}, \quad v_{k,z} |_{t=t_{ex}} = v_{k,z,ex}. \quad (10)$$

В общем случае, найти аналитическое решение уравнений (5) – (10) трудно, т.к. масса капли консерванта непостоянна по причине впитывания и изменяется по экспоненциальному закону в зависимости от структурного параметра пневмокормового потока a_{kn} . Поэтому уравнения (8) – (10) решаются по аналогии с уравнениями (5) – (7).

Для численного решения уравнений (5) – (10), учитывая ранее предложенную методику расчета и оценки технологических параметров процесса внесения [15], предлагается программа «Konservant-Silosoprovod». Программа реализована на языке Fortran, эксплуатируется на персональном компьютере типа IBM PC и работает под

управлением операционной системы Microsoft Windows XP и позволяет рассчитать скорость пневмокормового потока, скорость, координаты движения и глубину проникновения каплей жидкого консерванта и др., на основе чего производится выбор места впрыска и оптимальных технологических параметров.

Например, для входных данных, соответствующих техническим характеристикам кормоуборочного комбайна КВК-800, были получены графические зависимости (рис. 4), позволяющие определить макси-

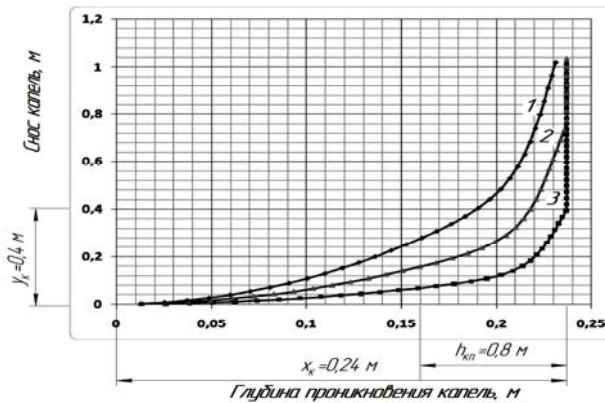


Рис. 4. Траектории проникновения жидкого консерванта в пневмокормовой поток при высоте установки распылительной форсунки на силосопроводе: 1 – 2,78 м; 2 – 2,86 м; 3 – 2,94 м

мальную глубину проникновения каплей консерванта ($x_k=0,24$ м) и их снос ($y_k=0,4$ м), на основании чего определено, что минимальное расстояние форсунки от направляющего козырька силосопровода должно составлять: $y_{k,min}=y_k=0,4$ м.

Заключение

Получены уравнения движения каплей жидкого консерванта в силосопроводе кормоуборочного комбайна, учитывающие дополнительное влияние электростатического поля, а также свойства пневмокормовой среды, в которой происходит движение и распространение каплей жидкого консерванта.

Разработана программа «Konservant-Silosoprovod», позволяющая проводить анализ и обоснование места впрыска жидкого консерванта в зависимости от различных технических характеристик кормоуборочных комбайнов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качество силоса в зависимости от способа внесения консервантов / М.Б. Сабиров [и др.] // Кормопроизводство. – 1987. – № 9. – С. 13–16.
2. Кузьмицкий, А.В. Особенности внесения консервантов на кормоуборочных комбайнах / А.В. Кузьмицкий, П.В. Яровенко, П.В. Авраменко // Молодежь и инновации: матер. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Горки, 3–5 июня 2009 г. / Белорус. гос. сельхоз. акад.; редкол.: А.П. Курдеко [и др.]. – Минск, 2009. – Ч. 2. – С. 3–5.

3. Гвоздев, А.В. Разработка внутрикамерного процесса и обоснование параметров устройства для внесения жидких консервантов при формировании растительной массы в рулоны: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Гвоздев. – Глеваха, 1990. – 192 л.

4. Грачев, А.В. Способы и технические средства повышения эффективности обработки силосуемой массы химическими консервантами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Грачев. – Москва, 1987. – 167 л.

5. Кузьмицкий, А.В. Механико-технологические основы внесения консервантов в силосуемые корма: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Кузьмицкий. – Горки, 2001. – 380 л.

6. Дремук, В.А. Повышение эффективности заготовки силоса внесением жидких консервантов смесителем-разравнивателем в траншейном силосохранилище: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.А. Дремук. – Горки, 2000. – 130 л.

7. Способ внесения жидких консервантов в измельченную растительную массу в кормоуборочном комбайне и устройство для его осуществления: пат. 12378 Респ. Беларусь, МПК А 23К 3/00 / А.В. Кузьмицкий, П.В. Авраменко, И.М. Лабозкий, А.Л. Зиновенко; заявит. Белор. гос. аграрн. техн. ун-т. – № а 20061344; заявл. 27.12.06; опубл. 30.10.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 42.

8. Устройство для внесения жидких консервантов в измельченную растительную массу на кормоуборочном комбайне: пат. 7370 Респ. Беларусь, МПК А 23К 3/03 / А.В. Кузьмицкий, П.В. Авраменко, Р.В. Новиков, Н.И. Ануфриев; заявит. Белор. гос. аграрн. техн. ун-т. – № и 20101003; заявл. 12.01.11; опубл. 30.06.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 3. – С. 167–168.

9. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник [и др.]; под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.

10. Вараксин, А.Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами / А.Ю. Вараксин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.

11. Годунов, С.К. Разностные схемы (введение в теорию) / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М.: Наука, 1973. – 400 с.

12. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

13. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак. – Мн.: Навука и тэхніка, 1991. – 480 с.

14. Кузьмицкий, А.В. Моделирование процесса внесения жидких консервантов в кормовой поток / А.В. Кузьмицкий, П.В. Авраменко // Агропанорама. – 2006. – № 5. – С. 4–7.

15. Кузьмицкий, А.В. Обоснование технологических параметров оборудования для внесения жидких консервантов на кормоуборочном комбайне / А.В. Кузьмицкий, П.В. Авраменко // Агропанорама. – 2010. – № 5. – С. 11–15.