

С целью обеспечить недостающее количество в РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» разработан полуприцепной ягодоуборочный комбайн КПЯ.

3. В соответствии с результатами проведенного эксперимента, в котором исследовались функциональные показатели качества выполняемого технологического процесса, допускается при уборке ягод аронии эксплуатация КПЯ на рабочих скоростях выше, чем указано в техническом задании.

4. Уборка ягод смородины на рабочих скоростях выше, чем указаны в техническом задании, не допускается.

Литература

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2017. – 364 с.

2. Техническое задание на разработку комбайна полурядного ягодоуборочного КПЯ: утв. 06.12.16 первым заместителем министра сельского хозяйства и продовольствия Л. А. Мариничем. – Минск, 2016. – 14 с.

УДК 631.363

Поступила в редакцию 03.07.2018

Received 03.07.2018

**П. В. Авраменко¹, А. Г. Вабищевич¹, А. Н. Смирнов¹, Г. Ф. Громыко²,
Ю. Л. Салапура³, М. Н. Салапура⁴**

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: minsk777@tut.by

²ГНУ «Институт математики НАН Беларуси»

г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: labmkr@yandex.ru

³РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь,

e-mail: salapura.yurii@mail.ru

⁴УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: marinasalapura@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПНЕВМОКОРМОВОГО ПОТОКА В СИЛОСОПРОВОДЕ КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА КВК-800

В статье представлена модель движения потока измельченного растительного материала в силосопроводе кормоуборочного комбайна.

Ключевые слова: модель, поток, скорость.

P. V. Auramenka¹, A. G. Vabischevich¹, A. N. Smirnov¹, G. F. Gromiko², Y. L. Salapura³, M. N. Salapura⁴

¹EE «Belarusian State Agrarian Technical University»

Minsk, Republic of Belarus

e-mail: minsk777@tut.by

²SNI «Institute of Mathematics NAS of Belarus»

Minsk, Republic of Belarus,

e-mail: grom@im.bas-net.by

³RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization»

Minsk, Republic of Belarus

e-mail: salapura.yurii@mail.ru

⁴EE «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics»

Minsk, Republic of Belarus

e-mail: marinasalapura@gmail.com

The article presents numerical model of motion of cut green material flow in the silotube of a forage harvester KVK-800.

Keywords: model, flow, speed.

Введение

В современном кормопроизводстве наибольшее распространение при заготовке силоса получила технология внесения жидкого консерванта на кормоуборочном комбайне. Для обоснования выбора места впрыска жидкого консерванта в силосопровод комбайна необходимо учитывать изменение свойств (параметров) пневмокормового потока в процессе движения.

Движение пневмокормового потока в транспортирующих рабочих органах кормоуборочного комбайна исследовалось в работах Н. Е. Резника [1], В. И. Особова [2], В. М. Козлова [3], А. А. Марьиной [4] и других авторов.

Во всех этих работах при расчете аэродинамического сопротивления главным образом не учитывается изменение скорости движения воздушного потока по длине силосопровода, что приводит к неадекватности расчетных и экспериментальных данных.

В работе [5] для моделирования пневмокормового потока в силосопроводе кормоуборочного комбайна КВК-800 используется лицензионный программный пакет STAR-CD, где учитываются силы Сэфмена (сила, возникающая по причине неоднородности профиля скорости воздушной среды), Магнуса (сила, возникающая по причине вращения несферической частицы в воздушной среде), тяжести, аэродинамического сопротивления, а также учитывается упругое взаимодействие частиц со стенками силосопровода. Определение скоростей потока ведется с помощью применения программного пакета STAR-CD. Тем не менее основные недостатки таких крупных лицензионных пакетов – это сложность их освоения и применения (высокая трудоемкость, необходимость в обслуживании высококвалифицированными специалистами), высокая стоимость покупки и обслуживания лицензионного пакета, отсутствие свободы в математическом программировании (в рамках одного пакета трудно реализовать несколько моделей).

Учитывая сложность описания движения пневмокормового потока аналитическими выражениями и отсутствие приемлемых лицензионных пакетов при необходимости стыковки разных моделей (движение пневмокормовой среды и консерванта), для теоретического исследования процесса проникновения капель жидкого консерванта в пневмокормовой поток использована среда MS Developer Visual Studio (VS) Digital Visual Fortran (DVL), которая позволяет реализовать и совместить модели движения пневмокормового потока и капель жидкого консерванта в силосопроводе.

Целью данной работы является моделирование движения потока измельченного растительного материала в силосопроводе самоходного кормоуборочного комбайна.

Основная часть

Направленно движущийся пневмокормовой поток в силосопроводе состоит из сплошного воздушного потока и дискретных частиц измельченного растительного материала, то есть является двухфазным: воздух – измельченный растительный материал [6, с. 26].

Составим математическую модель для определения скорости частицы измельченного растительного материала вдоль оси силосопровода, который представляет собой изогнутый желоб прямоугольного сечения.

В современных кормоуборочных комбайнах форма силосопровода отличается от параболы и в случае с высокопроизводительным комбайном КВК-800 описывается уравнением, полученным согласно аппроксимации точек его образующей:

$$Y = 0,9188 \cdot \log_{10}(X) + 1,783. \quad (1)$$

На рисунке 1 приведена схема силосопровода, где кривая ОА (ось силосопровода) в декартовой системе координат является функцией $Y = f(X)$.

При движении частицы в силосопроводе она преодолевает силу трения о стенки силосопровода, силу сопротивления воздуха, трения с другими частицами измельченного растительного материала, в результате чего скорость ее уменьшается [1, с. 330; 2, с. 270].

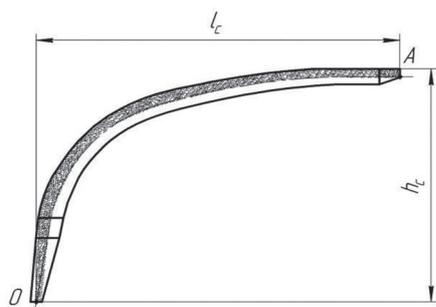


Рисунок 1. – Схема силосопровода (фронтальная проекция)

Уравнение движения частицы получим из баланса сил, приложенных к каждой точке при ее движении в силосопроводе.

Рассмотрим изменение количества движения вдоль траектории, описывающей изогнутую часть силосопровода, то есть вдоль линии, описываемой уравнением (1):

$$m_q \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \sum \vec{F}_q,$$

где $\sum \vec{F}_q$ – силы, действующие на частицу, находящуюся в пневмокормовом потоке, Н; \vec{v}_q – вектор скорости центра масс частицы, м/с; t – время движения частицы по силосопроводу, с.

Рассмотрим характер сил, действующих на частицу, под действием которых она движется вдоль выбранной линии.

Пренебрегая силами взаимодействия частиц между собой при движении в потоке и без учета вращения частицы, согласно работам [2, 7], рассмотрим следующие силы:

$$\sum \vec{F}_q = \vec{F}_g + \vec{F}_u + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_c,$$

где $\vec{F}_g, \vec{F}_u, \vec{F}_{mp}, \vec{F}_c$ – силы (тяжести, центробежная сила инерции, сила трения о стенки силосопровода, сила аэродинамического сопротивления среды), Н.

На рисунке 2 показаны проекции основных сил в ортогональной системе координат (S, N), связанной с поверхностью силосопровода (S – касательное направление, N – нормальное направление).

Рассмотрим проекции наиболее существенных сил вдоль линии, определяемой уравнением (1): $F_{g,s}$ – составляющая силы тяжести, направленная по касательной к силосопроводу; $F_{тр}$ – сила трения о стенки силосопровода; $F_{c,s}$ – сила сопротивления воздуха.

1. Составляющая силы тяжести частицы $F_{g,s}$, согласно рисунку 2, определяется как

$$F_{g,s} = m_q \cdot g \cdot \sin \beta,$$

где m_q – масса частицы, кг; β – угол наклона силосопровода в точке к оси OX , град.

Поскольку траектория движения частицы известна, то угол наклона β в каждой точке можем определить, исходя из вида кривой движения.

2. Сила трения – это сила реакции стенки на воздействие на нее частицы, умноженная на коэффициент трения, поэтому она пропорциональна силе нормального давления со стороны частицы на стенку силосопровода. Силой нормального давления в нашем случае является центробежная сила:

$$F_u = m_q v_q^2 / R_{кр},$$

где $R_{кр}$ – радиус кривизны поверхности силосопровода, м.

Поэтому сила трения будет пропорциональна центробежной силе [1, с. 335]:

$$\vec{F}_{mp} = f_{mp} (m_q v_q^2 / R_{кр}),$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения частицы измельченного растительного материала о поверхность силосопровода.

Если линия задана зависимостью $Y = f(X)$, то ее кривизна определяется по формуле [8, с. 206]:

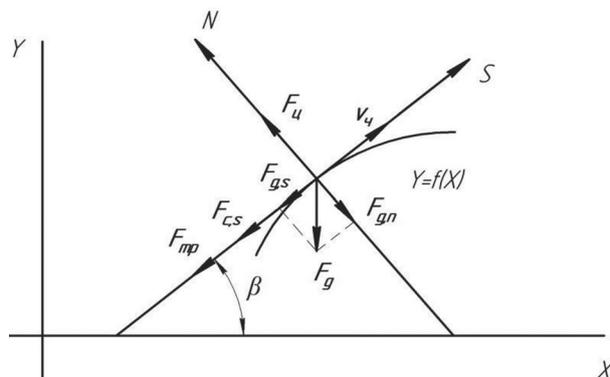


Рисунок 2. – Схема сил, действующих на частицу при ее движении по поверхности силосопровода

$$k = \frac{|Y''|}{(1 + Y'^2)^{3/2}}.$$

Тогда, согласно уравнению (1):

$$k = \frac{0,4 \cdot X}{(X^2 + (0,4)^2)^{3/2}}.$$

Поскольку радиус кривизны $R_{кр}$ определяется через кривизну k , то есть $R_{кр} = 1/k$, то в любой точке поверхности силосопровода (X, Y) можно определить радиус кривизны по формуле [2, с. 273]:

$$R_{кр} = \frac{0,4 \cdot X}{(X^2 + (0,4)^2)^{3/2}}.$$

3. Сила аэродинамического сопротивления \vec{F}_c , препятствующая движению частицы в воздухе по причине разницы скоростей частицы и воздуха, в котором она движется, определяется по формуле [9, с. 54]:

$$\vec{F}_c = C_D \rho_g S_q \frac{(\vec{v}_q - \vec{v}_g) |\vec{v}_q - \vec{v}_g|}{2},$$

где S_q – площадь миделева сечения сферической частицы, m^2 ; v_q, v_g – скорость движения частиц и среды (воздуха), m/c ; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, определяемый в зависимости от критерия Re .

В дальнейшем в формулах для силы сопротивления будем использовать значение эквивалентного радиуса частицы (для частиц – цилиндров).

Поправочная функция $C = C(Re)$ принимается в соответствии с [9, с. 55].

Для расчетов обозначим через \tilde{C}_D следующее выражение:

$$\tilde{C}_D = 0,5 C_D \rho_g S_q |\vec{v}_q - \vec{v}_g|.$$

Не учитывая взаимного влияния частиц, степень и концентрацию их в потоке, другие возможные факторы, влияющие на степень дисперсности потока, а также вращение частиц, которое связано в основном с несферичностью частиц, рассмотрим следующее уравнение движения одиночной частицы с учетом сил, действующих на частицу, когда она движется согласно траектории (1).

$$m_q \left. \frac{dv_q}{dt} \right|_S = -m_q g \sin \beta - f \frac{m_q v_q^2}{R_{кр}} - \tilde{C}_D v_q. \quad (2)$$

$$v_q \Big|_{t=0} = v_0. \quad (3)$$

Для удобства записи введем следующие обозначения: $v = v_q, m = m_q$, то есть опустим нижние индексы, указывающие на принадлежность величины к частице, и производную по времени в новых обозначениях перепишем как $v' = \left. \frac{dv_q}{dt} \right|_S$.

Уравнение (2) с начальным условием (3) примет следующий вид:

$$v' + \frac{\tilde{C}_D}{m} v + \frac{f}{R_{кр}} v^2 = -g \sin \beta, \quad v \Big|_{S=0} = v_0, \quad 0 < S \leq l_s.$$

Уравнение (4) – дифференциальное нелинейное уравнение первого порядка относительно скорости v .

Отметим особенность решения этой задачи. Угол β и радиус кривизны $R_{кр}$ зависят от места нахождения частицы на траектории. В свою очередь, положение частицы на траектории нахо-

дится в соответствии с ее скоростью. А для определения скорости частицы из уравнения (4) надо знать угол β и радиус кривизны $R_{кр}$, то есть получается, что угол β и радиус кривизны $R_{кр}$ неявно зависят от неизвестной скорости. Соответственно, аналитического решения задачи найти невозможно, поэтому необходимо использовать приближенный метод решения, сочетающий численный и аналитический подходы [10, 11].

Результаты исследований

Для решения уравнения был составлен алгоритм, реализованный в программном комплексе [12], разработанном для исследования процесса впрыска консерванта в силосопровод кормоуборочного комбайна.

На рисунке 3 приведен график, полученный в результате решения уравнения (4), показывающий изменение скорости частиц пневмокормового потока вдоль образующей силосопровода (1) кормоуборочного комбайна КВК-800.

В результате аппроксимации графических данных получена зависимость скорости пневмокормового потока от длины силосопровода:

$$v_{кп} = 0,74 \cdot l_s^2 - 0,86 \cdot l_s + 38,19.$$

Как видно из графика (рисунок 3), скорость частицы падает по мере ее движения вдоль образующей силосопровода, поскольку необходимо преодолеть силы трения о стенки силосопровода, силу сопротивления воздуха, силу тяжести и др.

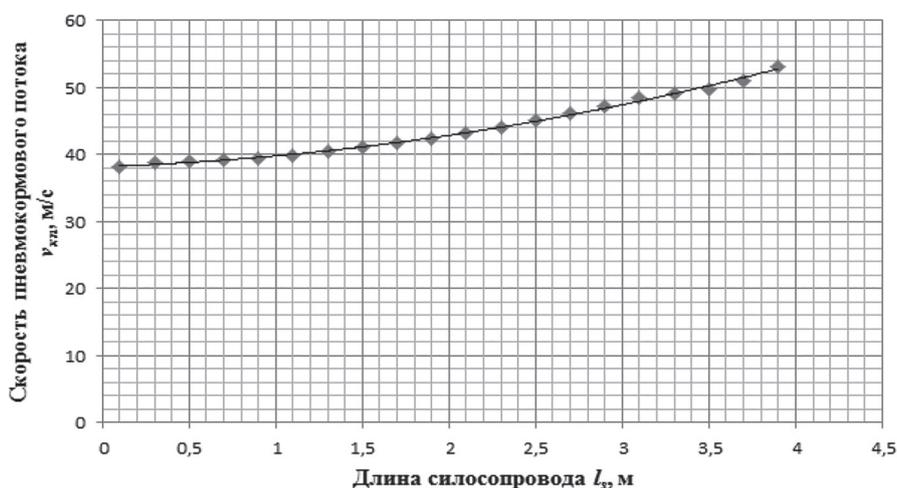


Рисунок 3. – Изменение скорости частиц пневмокормового потока вдоль длины силосопровода

Основной силой, препятствующей движению частицы по силосопроводу, особенно в начале пути, является сила трения, которая, согласно предварительным расчетам, значительно превышает силу тяжести. По мере уменьшения скорости и изменения траектории движения частицы сила трения уменьшается.

Полученная математическая модель (4) позволяет определять скорость движения пневмокормового потока по всей длине силосопровода при различных его конфигурациях.

Заключение

В данной статье получена математическая модель движения частицы пневмокормового потока в силосопровode кормоуборочного комбайна, позволяющая с заданной точностью определять ее скорость движения по всей длине силосопровода.

Полученная модель использована в программном комплексе Konservant-Silosoprovod для обоснования места впрыска жидкого консерванта в технологический тракт кормоуборочного комбайна.

Литература

1. Резник, Н. Е. Кормоуборочные комбайны / Н. Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
2. Особов, В. И. Механическая технология кормов / В. И. Особов. – Москва: Колос, 2009. – 344 с.
3. Козлов, В. М. Оптимизация процесса транспортирования измельченной массы в роторном кормоуборочном комбайне: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. М. Козлов. – Тула, 2005. – 139 л.
4. Марьина, А. А. Повышение эффективности процесса загрузки транспортных средств кормоуборочным комбайном путем оптимизации конструктивно-режимных параметров дефлектора: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. А. Марьина. – Саратов, 2007. – 210 с.
5. Компьютерное моделирование аэродинамических процессов в транспортирующих органах кормоуборочных комбайнов / А. М. Крот [и др.] // Информатика. – 2006. – № 3. – С. 80–90.
6. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. Ч. 1 / Р. И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
7. Василенко, П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П. М. Василенко; под ред. акад. УАСХН М. И. Медведева. – Киев: Изд-во УАСХН, 1960. – 283 с.
8. Гусак, А. А. Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак. – Минск: Навука и тэхніка, 1991. – 480 с.
9. Вараксин, А. Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами / А. Ю. Вараксин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.
10. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченкова. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.
11. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 512 с.
12. Программный комплекс «Konservant-Silosoprovod»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 418 / А. В. Кузьмицкий, П. В. Авраменко, Г. Ф. Громыко, А. Н. Вырский, О. В. Рыхлицкий; заявитель УО «БГАТУ». – № С20120015; заявл. 02.04.2012; дата регистр. 10.05.2012 // Реестр зарегистрированных компьютерных программ / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012.

УДК 631.352.022/353.722

Поступила в редакцию 13.07.2018
Received 13.07.2018

Н. Г. Бакач, И. Е. Мажугин, С. П. Кострома

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: labmkr@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НОЖЕЙ ОТ РАДИАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ НА РАБОТУ РОТОРНЫХ КОСИЛОК

В статье обоснована необходимость учета влияния отклонения ножей от радиального положения на работу роторной косилки. Теоретически установлено, что увеличение массы, угловой скорости, расстояния от центра крепления ножа до центра масс ножа, а также увеличение угла отклонения ножа и подачи на нож увеличивают его силовое воздействие на срезаемую и измельчаемую растительность. Отклонение ножа от радиального положения на 90° следует считать предельным.

Для увеличения силы воздействия при прочих равных параметрах необходимо стремиться к возможному уменьшению кинематического радиуса несущей части ротора.

Ключевые слова: роторная косилка, теоретический анализ, колебания ножей, лугопастбищные угодья.

N. G. Bakach, I. E. Mazhuhin, S. P. Kostroma

*RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization»
Minsk, Republic of Belarus
e-mail: labmkr@yandex.ru*

INFLUENCE OF KNIVES DIVERGE FROM RADIAL PROVISIONS FOR WORK OF ROTARY MOWERS

In the article the relevance of the need to consider the impact of deviations from the radial position of the blades to work the rotary mower. Theoretically established that the increase in mass, angular velocity, distance from the center of mounting knife to the center of mass of the knife, as well as increasing the deflection angle of the knife and the knife to increase the supply of its force on the cut and ground vegetation. Deviation from the radial position of the blade 90° should be regarded as limiting.

To increase the force of impact with the other parameters being equal should strive for a possible reduction of the kinematic radius of the rotor bearing.

Keywords: rotary mower, theoretical analysis, fluctuations of knives, grasslands.