

УДК 621.929:636(476)

**А. В. Китун**, доктор технических наук, профессор,  
**И. М. Швед**

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКА РАЗМЫВА ОСАДКА В НАВОЗОХРАНИЛИЩЕ НАПРАВЛЕННЫМ ДЕЙСТВИЕМ СТРУИ ЖИДКОГО НАВОЗА**

При хранении жидкого навоза в навозохранилищах происходит его разделение на фракции с осаждением тяжелой фракции в осадок. Размыв осадка навоза является одним из важнейших показателей процесса перемешивания навозной массы в навозохранилище. Недостаточный размыв осадка приводит к снижению удобрительных свойств органических удобрений, а также уменьшению полезного объема навозохранилища.

Размеры участка размыва осадка зависят от скорости струи навозной массы, создаваемой мешалкой, объема осадка навоза, накопленного в период хранения, и конструктивно-кинематических параметров миксера. Установлена зависимость между глубиной и длиной участка размыва осадка, конструктивными параметрами миксера, физико-механическими свойствами навоза, а также расстоянием участка размыва от сопла кожуха и углом ориентации струеформирующего сопла кожуха. В статье приведены результаты теоретических исследований по определению геометрических параметров участка размыва осадка навоза в навозохранилище миксером, оснащенный кожухом с конусообразным соплом.

**Ключевые слова:** размыв осадка; объем; площадь; сопло; кожух; жидкий навоз.

Рис. 2. Библиогр.: 15 назв.

**A. V. Kitun**, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**I. M. Shved**

Educational Institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Prospect,  
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

## **DETERMINATION OF THE SEDIMENT EROSION AREA PARAMETERS IN THE MANURE STORAGE BY THE DIRECTED ACTION OF A LIQUID MANURE JET**

When liquid manure is stored in manure storage facilities, it is divided into fractions with the deposition of a heavy fraction into the sediment. The erosion of the manure sediment is one of the most important indicators of the process of mixing the manure mass in the manure storage. Insufficient erosion of sediment leads to a decrease in the fertilizing properties of organic fertilizers, as well as a decrease in the useful volume of manure storage.

The size of the sediment erosion area depends on the velocity of the manure mass jet created by the agitator, the volume of manure sediment accumulated during storage and the structural and kinematic parameters of the mixer. The relationship between the depth and length of the segment erosion section, the mixer design parameters, the physical and mechanical properties of the manure, as well as the distance of the erosion section from the casing nozzle and the orientation angle of the casing jet-forming nozzle has been established. The article presents the results of theoretical research of determination of the geometric parameters of the manure sediment erosion site in the manure storage with a mixer equipped with a casing with a cone-shaped nozzle.

**Key words:** sediment erosion; volume; area; nozzle; casing; liquid manure.

Fig. 2. Ref.: 15 titles.

**Введение.** Образование осадка в навозохранилищах приводит к снижению полезного объема емкости, возникновению коррозионных процессов, приводящих к разрушению и затруднению эксплуатации емкостей, утилизации навоза из хранилища, а также получению некачественных органических удобрений. Для надежной эксплуатации машин и оборудования

и получения качественных органических удобрений жидкий навоз при хранении необходимо периодически перемешивать. Для этих целей применяется миксер, оснащенный кожухом с конусообразным соплом.

В процессе перемешивания жидкого навоза, хранящегося в навозохранилище, первоначально при помощи направленной струи, создаваемой лопастями мешалки миксера, осуществляют размыв осадка.

Обзор литературных источников и анализ формул [1—5] по распределению струи в жидкостной среде и определению параметров размыва осадка позволяет определить основные факторы, от которых зависит максимальная площадь участка размыва.

Исследованиями авторов [6; 7] установлено, что производительность оборудования, выполняющего работу по размыву осадка, зависит от стабильного состояния струи: чем компактнее струя в поперечном сечении, тем большей размывающей способностью она обладает.

Для формирования стабильного состояния струи и увеличения ее мощности миксер оборудуют кожухом с коническим соплом. При этом качество и стабильное состояние струи будут определяться давлением, создаваемым мешалкой, диаметром отверстия сопла кожуха, качеством его обработки и условиями перемещения потока жидкого навоза в хранящейся навозной массе.

Для эффективной работы миксера, оборудованного конусообразным соплом, необходимо установить основные закономерности разрушающей способности струи в процессе размыва осадка (глубину и длину участка размыва), следовательно, установить ее размывающие способности, определив параметры участка размыва.

**Материалы и методы исследования.** Согласно ГОСТ Р 53042-2008, жидким навозом называется навоз (помет), содержащий от 3 до 8 % сухого вещества.

Жидкий навоз представляет собой многокомпонентную среду. Вязкость ньютоновских жидкостей меняется при разной температуре, а также давлении и не остается величиной постоянной, а изменяется в зависимости от скорости деформаций сдвига [8]. Исследования физико-механических свойств жидкого навоза показали, что при концентрации сухого вещества менее 8 % он является ньютоновской жидкостью [9; 10].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Сущностью размыва осадка навоза является то, что весь процесс осуществляется перемещением струи внутри осадка, характеризующейся глубиной и длиной участка размыва, которые неизвестны и их необходимо определить. При этом разрушение свода осадка в процессе размыва определяется влиянием следующих факторов: кавитационного воздействия струи на осадок; действием усилия, приложенного от воздействия давления струи; ударного воздействия струи на осадок; уменьшения прочности осадка под влиянием усталостных напряжений, вызываемых пульсирующей нагрузкой; размывающего воздействия от скорости струи, а также от физико-механических свойств осадка. В начале процесса размыва профиль фигуры на поверхности размываемого участка может быть подобен профилю струи, имеющей круглое сечение, в которой наибольшая сила давления струи расположена в центре.

Силу давления струи можно определить по формуле [11]

$$F_c = \frac{\gamma}{g} Q V_n \sin \alpha = \rho_c S_c V_n^2 \sin \alpha,$$

- где  $\gamma$  — удельный вес навозной массы, Н / м<sup>3</sup>;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м / с<sup>2</sup>;  
 $Q$  — расход навозной массы, выходящей из кожуха, м<sup>3</sup> / с;  
 $V_n$  — скорость истечения навозной массы в сжатом сечении струи, м / с;  
 $\alpha$  — угол наклона струи жидкого навоза, град;  
 $\rho_c$  — плотность навозной массы, выходящей из кожуха, кг / м<sup>3</sup>;  
 $S_c$  — площадь поперечного сечения струи, истекающей из сопла, м<sup>2</sup>.

Сила сопротивления размыву осадка навоза будет численно равна силе, которую требуется приложить для перемещения струи в осадке, и в общем случае зависит от плотности осадка, скорости струи, площади соприкосновения струи с осадком и угла атаки струи в осадок. При перемещении струи в осадке формируются вихри, а следовательно, будет возникать турбулентное сопротивление, которое зависит от скорости и линейных размеров струи, а также плотности осадка навоза.

Согласно закону Ньютона, силу турбулентного сопротивления, препятствующего размыву осадка навоза, можно определить по формуле

$$F_o = \rho_o S_L V_L^2 \sin \alpha,$$

где  $\rho_o$  — плотность осадка навоза, кг / м<sup>3</sup>;

$S_L$  — площадь поперечного сечения струи на расстоянии  $L$  от сопла, м<sup>2</sup>;

$V_L$  — скорость струи на расстоянии  $L$  от сопла, м / с.

Перемещение струи в осадке будет до тех пор, пока сила давления струи остается больше силы сопротивления размыву, следовательно, будет справедливым условие

$$\rho_c S_c V_n^2 \sin \alpha \geq \rho_o S_L V_L^2 \sin \alpha. \tag{1}$$

Частицы навоза, перемещаемые движущей силой от вращающейся мешалки и приближающиеся к отверстию сопла по радиальным направлениям, по инерции стремятся сохранить свое движение. Приближаясь к отверстию, они огибают его край, что приводит к сжатию струи. Тогда с учетом сжимаемости площадь поперечного сечения струи, истекающей из сопла, определится по формуле

$$S_c = \varepsilon \frac{\pi d_c^2}{4}, \tag{2}$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент сжатия струи;

$d_c$  — диаметр отверстия сопла кожуха, м.

Размыв осадка характеризуется критической размывающей скоростью потока жидкого навоза, при которой начинается разрушение отдельных частиц осадка и продолжается до момента, когда струя жидкой фракции навоза распадается, так как ее скорость движения стремится к нулю (рисунок 1).

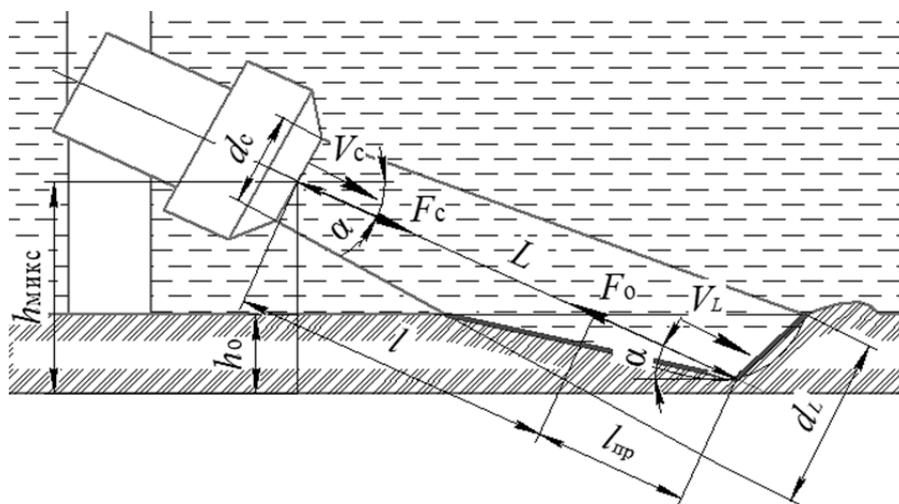


Рисунок 1. — Схема к определению длины проникновения струи в осадок навоза

Скорость истечения навозной массы в сжатом сечении струи определяется по формуле [12]

$$V_n = \mu \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода жидкости;

$H$  — напор навозной массы, м.

Скорость размыва, когда струя жидкой фракции навоза распадается, можно определить по формуле А. Я. Миловича [13]:

$$V_L = \varphi \frac{V_n d_{стр}}{L}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  — опытный коэффициент;

$d_{стр}$  — диаметр струи в начальном сечении, м;

$L$  — расстояние от сопла кожуха до участка размыва, м.

Учитывая, что  $d_{стр}^2 = \varepsilon d_c^2$ , и подставив формулу (3) в формулу (4), определим скорость струи на расстоянии  $L$  от сопла:

$$V_L = \varphi \mu \frac{d_c \sqrt{2\varepsilon gH}}{L}. \quad (5)$$

Подставив выражения (2), (3) и (5) в (1), выразим из него площадь поперечного сечения струи на расстоянии  $L$  от сопла:

$$S_L = \frac{\pi \rho_c L^2}{4\varphi^2 \rho_o}.$$

Так как струя на протяжении всего процесса размыва сохраняет свою форму, то будет справедливо равенство

$$S_L = \frac{\pi d_L^2}{4} = \frac{\pi \rho_c L^2}{4\varphi^2 \rho_o},$$

где  $d_L$  — диаметр струи на расстоянии  $L$  от сопла, м.

Из полученного равенства выразим расстояние  $L$  от сопла кожуха до участка размыва:

$$L = \varphi d_L \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}. \quad (6)$$

На основании опытов, проводимых с затопленными струями, Г. Н. Абрамович вывел зависимость по определению диаметра струи на расстоянии  $L$  от сопла, который можно определить по формуле [14]

$$d_L = 0,475L + d_{стр} = 0,475L + d_c \sqrt{\varepsilon}.$$

Преобразуем выражение (6), подставив в него полученную выше формулу для определения диаметра струи  $d_L$ :

$$L = \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475\varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}}. \quad (7)$$

Из рисунка 1 видно, что расстояние от сопла кожуха до предельного проникновения струи в осадок навоза состоит из двух составляющих: расстояния от сопла до поверхности осадка  $l$  и длины проникновения струи в осадок  $l_{пр}$ :

$$L = l + l_{пр}, \tag{8}$$

где  $l$  — расстояние от сопла до поверхности осадка, м;

$l_{пр}$  — длина проникновения струи в осадок, м.

Расстояние от сопла до поверхности осадка определим по формуле

$$l = \frac{h_{микс} - h_0}{\sin \alpha}, \tag{9}$$

где  $h_{микс}$  — высота расположения миксера относительно дна хранилища, м;

$h_0$  — высота осадка навоза, м.

Определим длину проникновения струи в осадок, выразив из формулы (8) и подставив в нее выражения (7), (9):

$$l_{пр} = \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_0}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_c}}} - \frac{h_{микс} - h_0}{\sin \alpha}. \tag{10}$$

Струя навозной массы, создаваемая миксером и истекающая из сопла кожуха, перемещается в неподвижной жидкой среде. При встрече струи с поверхностью осадка навоза происходит процесс его разрушения. Так как осадок насыщен влагой, следовательно, связи между частицами ослаблены. Под воздействием силы давления струи на осадок жидкая среда навозной массы интенсивно поступает в поры, находящиеся в осадке, и, создавая в них избыточное давление, вызывает его разрушение. При дальнейшем углублении струи в осадок происходит кольцевой размыв и под действием силы тяжести разрушение его верхнего свода.

В процессе разрушения свода формируется наклонная поверхность, угол наклона которой можно рассматривать как угол откоса осадка  $\beta_0$ .

Процесс размыва осадка является следствием приложенной на него силы давления струи. Наибольшая сила давления расположена в центре струи [15], следовательно, максимальное углубление в приямке будет находиться на ее оси, где расположена остаточная часть ядра струи.

Так как размыв осадка имеет неправильные формы, то для упрощения нахождения параметров участка размыва рассмотрим участок в виде треугольника (рисунок 2).

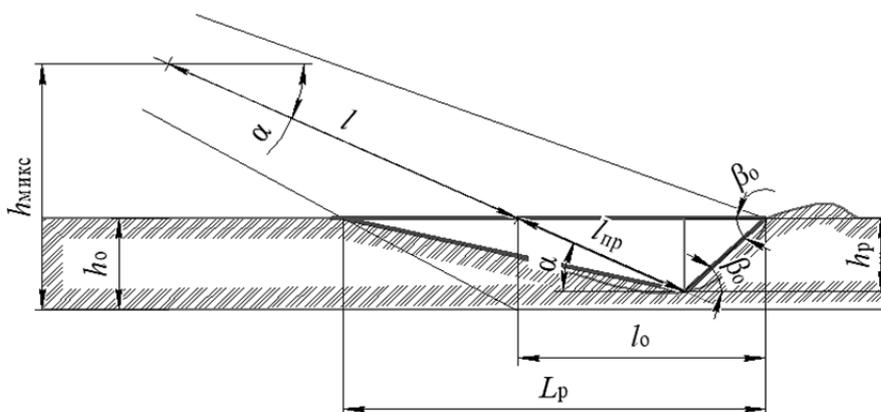


Рисунок 2. — Схема к определению параметров участка размыва осадка навоза

Из рисунка 2 глубину размыва осадка можно определить по следующей формуле:

$$h_p = \frac{l_{np}}{\sin \alpha} = \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{\left(1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}\right) \sin \alpha} - \frac{h_{микс} - h_o}{\sin^2 \alpha}. \quad (11)$$

Анализ формулы (11) показывает, что глубина размыва осадка зависит от высоты расположения миксера относительно дна навозохранилища, конструктивных параметров сопла кожуха, физико-механических свойств струи и осадка, его высоты, а также угла наклона струи жидкого навоза.

Струя жидкого навоза истекает из отверстия сопла под углом наклона  $\alpha$ . При соприкосновении ее с поверхностью осадка навоза форма и характер пятна участка размыва меняются, при этом пятно удлиняется в сторону наклона струи. Участок размыва при этом приобретает форму эллипса с полуосями: малой полуосью, равной диаметру струи на поверхности участка размыва осадка  $d_l$ , и большой полуосью, равной половине длины участка размыва  $0,5L_p$  или из рисунка 2

$$L_p = 2l_o, \quad (12)$$

где  $L_p$  — длина участка размыва осадка навоза, м;

$l_o$  — длина большей полуоси пятна участка размыва осадка навоза, м.

Из теоремы синусов определим длину большей полуоси пятна участка размыва осадка навоза:

$$\frac{l_o}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))} = \frac{l_{np}}{\sin \beta_o}, \quad (13)$$

где  $\beta_o$  — угол откоса наклонной поверхности на участке размыва, град.

Тогда из формулы (13) с учетом уравнения (10) длина большей полуоси пятна участка размыва осадка навоза определится из следующего выражения:

$$l_o = \left( \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}} - \frac{h_{микс} - h_o}{\sin \alpha} \right) \frac{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))}{\sin \beta_o}. \quad (14)$$

Определим длину участка размыва осадка навоза, подставив в уравнение (12) полученное выражение (14):

$$L_p = \frac{2 \sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))}{\sin \beta_o} \left( \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}} - \frac{h_{микс} - h_o}{\sin \alpha} \right). \quad (15)$$

Формула (15) позволяет рассчитать длину размыва осадка навоза, которая зависит от конструктивных параметров сопла миксера, физико-механических свойств струи и осадка, высоты расположения миксера относительно дна навозохранилища и высоты осадка навоза, а также угла наклона струи жидкого навоза на поверхность осадка.

**Заключение.** В результате проведенных теоретических исследований было установлено, что угол наклона струи жидкого навоза на поверхность осадка влияет на размывающие способности оборудования.

При использовании уравнения (15) следует учитывать, что длина размываемого участка зависит от высоты осадка и будет изменяться при изменении диаметра отверстия сопла кожуха, высоты расположения миксера относительно дна навозохранилища и угла наклона струи жидкого навоза.

#### Список цитированных источников

1. Эколого-экономическое управление охраной окружающей среды / А. Г. Ананенков [и др.]. — М. : Недра, 2004. — 230 с.
2. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) : учебник / Р. Р. Чугаев. — М. : Бастет, 2008. — 672 с.
3. Руководство по гидравлическим расчётам малых искусственных сооружений и русел. — 3-е изд., перераб. и доп. : утв. «ГИПРОТРАНСТЭИ» МПС : введ. 01.01.1967. — М. : Транспорт, 1967. — 224 с.
4. Оборудование резервуаров : учеб. пособие / Н. И. Коновалов [и др.]. — Уфа : ДизайнПолиграф-Сервис, 2004. — 212 с.
5. Кононов, О. В. Анализ и классификация существующих способов борьбы с отложениями в нефтяных емкостях / О. В. Кононов, Б. Н. Мастобаев // История науки и техники. — 2010. — № 6. — С. 60—68.
6. Совершенствование систем предотвращения накопления донных нефтяных отложений в резервуарах большой вместимости / В. Н. Александров [и др.] // Нефтяное хоз-во. — 2001. — № 2. — С. 70—72.
7. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учеб. для вузов : в 2 кн. / Д. В. Штеренлихт. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — Кн. 2. — 367 с.
8. Караева, Ю. В. Оценка динамической вязкости субстратов, используемых для получения биогаза / Ю. В. Караева, И. А. Трахунова // Технические науки — от теории к практике : сб. ст. по материалам XXV Междунар. науч.-практ. конф., № 8 (21). — Новосибирск : СибАК, 2013. — С. 84—90.
9. Ворожцов, О. В. Обоснование технологических и конструкционных параметров перемешивающего устройства, обеспечивающего гомогенизацию жидкого свиного навоза при его хранении в плёночных навозохранилищах : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / О. В. Ворожцов. — СПб., 2018. — 195 л. : ил.
10. Трахунова, И. А. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / И. А. Трахунова. — Казань : КНИЦ РАН, 2014. — 114 л.
11. Гидравлика, гидромашин и гидропневмопривод / Т. В. Артемьева [и др.]. — 2-е изд., стер. — М. : Академия, 2006. — 336 с.
12. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической технологии / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. — М. : Химия, 1967. — 848 с.
13. Милович, А. Я. Вихревая теория направляющего аппарата и камеры турбины / А. Я. Милович. — М. : Тип. Рус. Товарищества, 1912. — 62 с.
14. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. — М. : ЭКОЛИТ, 2011. — 720 с.
15. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Шукин // Успехи физ. наук. — 1972. — Т. 108, № 9. — С. 3—42.

Поступила в редакцию 12.01.2022.