

# Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года  
Выходит 2 раза в год

№ 1 (11), май, 2022

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования  
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:  
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.  
Телефон: +375 (163) 64 34 77.  
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.  
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском, белорусском и английском языках.  
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко  
Технический редактор Л. Н. Щербук  
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак  
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 04.05.2022. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага ксероксная. Печать цифровая.  
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 8,60.  
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлопина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Кочурко В. И.** (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Климук В. В.** (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Алифанов А. В.** (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Горбач Ю. Е.** (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Зубрицкая Л. С.** (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Богданович И. А.** (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Анискович Г. И.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

**Белый А. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

**Дремук В. А.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

**Клубович В. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational Institution  
"Baranovichi State University".

Editorial address:  
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.  
Phone: +375 (163) 64 34 77.  
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;  
009992 — for companies.  
The certificate of the registration of mass media № 1533  
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information  
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation  
Commission of the Republic of Belarus from January 21,  
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU  
Herald. Engineering Series" is included into the List of  
scientific publications of the Republic of Belarus for  
publishing the results of theses research on engineering  
sciences (mechanical engineering and machines,  
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"  
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),  
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian, Belorussian and English. The journal is  
distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko  
Technical editor L. N. Scherbuk  
Desktop Publishing S. M. Glushak  
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 04.05.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.  
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 13,25.  
Acc.-pub. s. l. 8,60. Circulation of 100 copies.  
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary  
Enterprise "Slonim printing establishment". The state  
registration certificate of the publisher, manufacturer and  
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2  
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,  
Grodno region.

**EDITORIAL BOARD**

**Kochurko V. I.** (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

**Klimuk V. V.** (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

**Alifanov A. V.** (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

**Gorbach Yu. E.** (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

**Zubritskaya L. S.** (*ed. of texts in English*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

**Bogdanovich I. A.** (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

**Aniskovich G. I.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**Громыко П. Н., Хатетовский С. Н., Макацария Д. Ю., Макаревич А. С.** Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

**Жигалов А. Н., Горавский И. А.** Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали P6M5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом

**Малеронок В. В., Кушнеров А. В., Алифанов А. В.** Влияние магнитно-импульсной обработки на фазовые переходы в поверхностном слое режущего осевого инструмента из инструментальной стали

**Наліюко А. І., Русан С. І., Сівачэнка Л. А., Сівачэнка Т. Л.** Методика набліжаного аналізу сілавога ўзаемадзеяння ў здрабняльных машынах са шчоткападобнымі звёнамі

**Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С.** Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых автомобилей

**Фадин Ю. М., Шеметова О. М.** Использование пневмосмесительного оборудования для производства сухих строительных смесей

**Шматов А. А.** Характер упрочнения твердых сплавов при термогидрохимической обработке

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

**Бондарев С. Н.** Определение потребной мощности на процесс машинного доения коровы

**Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В.** Исследование процесса измельчения кормов плоскостным роторным измельчающим аппаратом вертикального типа

**Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В.** Оптимизация выбора оборудования линии первичной обработки молока

**Китун А. В., Швед И. М.** Определение параметров участка размыва осадка в навозохранилище направленным действием струи жидкого навоза

**Пузевич К. Л., Коцуба В. И., Пузевич В. В., Филиппов А. И.** Агрегаты для посева сельскохозяйственных культур под мульчирующую пленку

**Шаршунов В. А., Курзенков С. В., Левчук В. А., Цайц М. В.** Исследование характера деформации и разрушения семенной коробочки льна

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

**4 Gromyko P. N., Khatetovsky S. N., Makatsaryia D. Yu., Makarevich A. S.** Provision of the satellite translational motion during the operation of eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts

**14 Jigalov A. N., Goravskii I. A.** Experimental investigations of the high-speed steel P6M5 microstructure hardened by the aerodynamic sound method

**24 Maleronok V. V., Kushnerou A. V., Alifanov A. V.** The effect of magnetic pulse processing on phase transitions in the surface layer of a cutting axial tool of tool steel

**31 Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L.** Method of approximate analysis of force interaction in grinding machines with brush-like links

**37 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S.** Research of performance of synthetic motor oils indicators used in gasoline engines of passenger cars

**43 Fadin Yu. M., Shemetova O. M.** The use of pneumatic mixing equipment for the dry building mixes production

**48 Shmatov A. A.** The nature of hard alloys hardening during thermo-hydrochemical treatment

## PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

**55 Bondarev S. N.** Determination of the required power for the machine cow milking process

**65 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V.** Research of grinding feed process by a planar vertical rotary grinder

**74 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V.** Optimization of the equipment choice for a primary milk processing line

**81 Kitun A. V., Shved I. M.** Determination of the sediment erosion area parameters in the manure storage by the directed action of a liquid manure jet

**88 Puzevich K. L., Kotsuba V. I., Puzevich V. V., Filippov A. I.** Aggregates for sowing agricultural crops under mulching film

**96 Sharshunov V. A., Kurzenkov S. V., Levchuk V. A., Tsaits M. V.** Investigation of the nature of flax seedpods deformation and destruction

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

$$\rho_c S_c V_n^2 \sin \alpha \geq \rho_o S_L V_L^2 \sin \alpha. \quad (1)$$

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

$$S_c = \varepsilon \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad (2)$$

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).

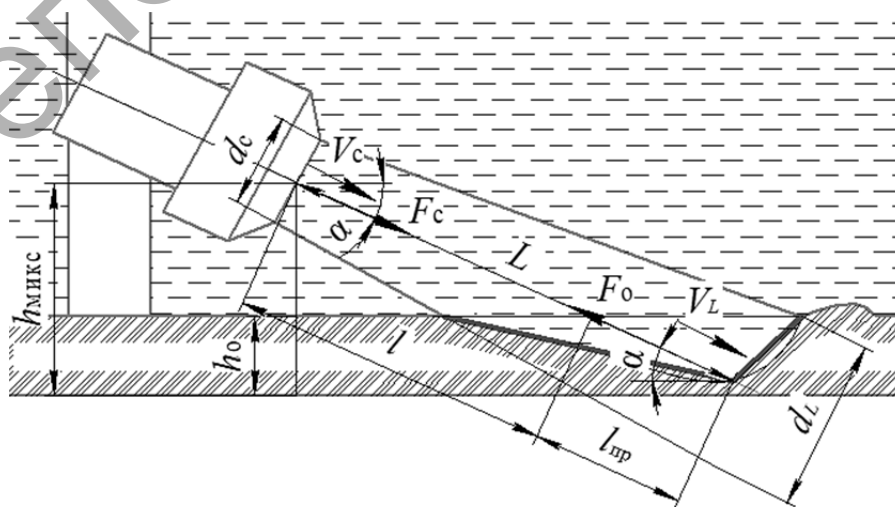


Рисунок 1. — Схема к определению длины проникновения струи в осадок навоза

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 козуха 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 козуха 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  $l_{пр}$ :

$$L = l + l_{пр}, \quad (8)$$

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

$$l = \frac{h_{микс} - h_0}{\sin \alpha}, \quad (9)$$

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):

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

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).

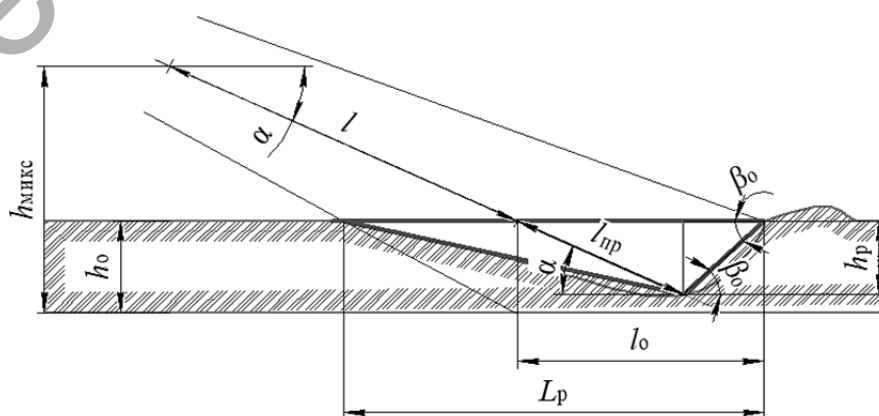


Рисунок 2. — Схема к определению параметров участка размыва осадка навоза

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 : КНЦ 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.