

УДК 631.3-6

ОСАЖДЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В.К. Корнеева,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.М. Капцевич,

зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

И.В. Закревский,

ст. преподаватель каф. технологии металлов БГАТУ

П.М. Спиридович,

магистрант каф. технологии металлов БГАТУ

Проведены теоретические исследования движения ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле постоянных магнитов для различных размеров и природы продуктов износа и значений градиента напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: частицы износа, постоянные магниты, высокоградиентное поле.

Theoretical studies of ferromagnetic particles motion in a high-gradient magnetic field of permanent magnets for various sizes and nature of wear products and values of the magnetic field strength gradient were carried out.

Key words: wear particles, permanent magnets, high-gradient field.

Введение

В процессе работы ДВС в картер моторным маслом выносятся металлические частицы различного химического состава, генерируемые в трибосопряжениях деталей цилиндропоршневой группы (поршневые кольца, поршень, вкладыши шатунных подшипников, гильзы цилиндров), кривошипно-шатунного механизма (коленчатый вал, поршневая группа, поршневые кольца и пальцы, шатуны, маховик, шатунные и коренные вкладыши подшипников) и газораспределительного механизма (шестерни, распределительный вал, впускные и выпускные клапаны, соединительные и передающие движение детали) (табл. 1) [1].

Таблица 1. Продукты износа двигателя внутреннего сгорания

Материал	Источник продуктов износа
Железо	Износ кривошипно-шатунной системы, цилиндропоршневой группы, газораспределительного механизма,
Алюминий	Износ поршня, подшипника; неисправность воздушного фильтра
Сурьма, свинец, олово	Износ и выкрашивание подшипников качения
Медь	Износ шатуна, распределительного вала, корпуса/крышки масляного насоса
Хром	Износ поршневых колец и клапанов
Никель	Износ поршневого пальца

Количество ферромагнитных частиц может составлять до 90 % от всех взвешенных в масле частиц [2].

По размерам ферромагнитных частиц можно определить интенсивность износа рабочих поверхностей деталей: функционирование сельскохозяйственных машин в исправном состоянии сопровождается обычно образованием частиц износа с размером до 10-20 мкм, при повышенном износе размер частиц достигает 200-250 мкм, предаварийный износ сопровождается образованием частиц до 0,5 мм, аварийный – 0,5-6 мм [3]. По форме частиц можно судить о характере износа. Так, например, частицы в форме плоских хлопьевидных пластин свидетельствуют об усталостном выкрашивании, сферические частицы – об усталостном выкрашивании при качении, частицы в виде стружки – о микрорезании, частицы с бороздами – о задирах [4, 5].

По количеству ферромагнитных частиц можно судить об интенсивности изнашивания деталей двигателя и спрогнозировать возможность возникновения катастрофического износа и принять меры для его предотвращения.

В настоящее время магнитные методы контроля являются одним из самых мощных диагностических инструментов в анализе смазочных материалов и заключаются в осаждении металлических частиц износа из проб рабочих жидкостей под действием магнитного поля. В настоящее время в России и в Беларуси магнитные методы контроля для анализа свойств моторного масла сельскохозяйственной

техники не используются.

Изучению магнитных методов контроля частиц износа в моторном масле посвящены работы зарубежных ученых – V.C. Westcott, R. Bowen, D. Scott, W. Seifert, E. Fitch, R. Tessniann, J. Fitch, B. Fitch и др.

Магнитные методы контроля свойств работающего моторного масла для диагностики состояния деталей и узлов техники, основанные на анализе частиц износа, можно разделить на два класса методов [6]. Методы первого класса предусматривают периодический отбор проб масла из системы смазки с последующим анализом этих проб лабораторными методами. К таким методам относятся: феррография прямого считывания и аналитическая феррография. Методы второго класса основаны на анализе частиц износа в масле с помощью устройств, встроенных в систему смазки: магнитные фильтры, магнитные пробки и магнитные щупы.

Теоретические задачи поведения ферромагнитных частиц в магнитном поле рассмотрены в работах [7-9], однако в них не отражены вопросы определения траектории движения частиц при различных значениях градиента напряженности магнитного поля, различных размеров и природы продуктов износа, а также при различных начальных координатах попадания частиц в поток.

Целью работы является рассмотрение теоретической задачи движения ферромагнитных частиц в высокоградиентном поле действия сил постоянных магнитов.

Основная часть

При решении данной теоретической задачи поэтапно рассмотрим, во-первых, непосредственное движение масляного слоя по наклонной поверхности, во-вторых – движение ферромагнитных частиц в масляном слое, и, в-третьих – движение ферромагнитных частиц в масляном слое в высокоградиентном магнитном поле.

Рассмотрим движение масляного слоя, содержащего ферромагнитные частицы загрязнений, по наклонной поверхности на примере предметного стекла аналитического феррографа (аналогично данную задачу можно рассматривать для магнитного щупа, магнитной пробки и магнитного фильтра). На рисунке 1 схематично представлено движение масляного слоя в координатах $x-z$, где ось x перпендикулярна поверхности предметного стекла, а ось z – параллельна поверхности стекла и совпадает с направлением движения масляного слоя.

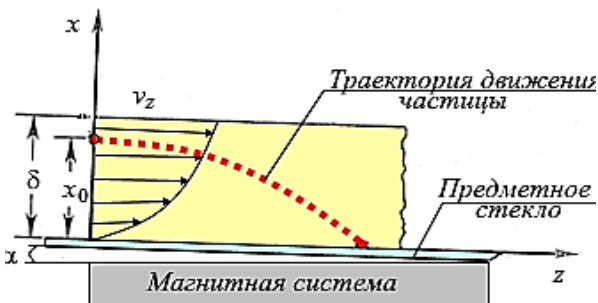


Рисунок 1. Схема изображения движения масляного слоя

Скорость течения масла v_z^* (м/с) по наклонной поверхности предметного стекла в направлении оси z может быть определена с помощью параболической зависимости [10]

$$v_z^* = \frac{\rho_{ж} g \sin \alpha}{2\eta} (2\delta x - x^2), \quad (1)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность масла, кг/м³,
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 α – угол наклона предметного стекла, град;
 δ – высота масляного слоя, м;
 η – вязкость масла, Па·с;
 x – координата вдоль оси x , м.

Скорость течения потока масла v_z относительно оси x изменяется от 0 при $x = 0$ и достигает максимального значения $v_z^*_{max}$ при $x = \delta$

$$v_z^*_{max} = \frac{\rho_{ж} g \delta^2 \sin \alpha}{2\eta}. \quad (2)$$

Средняя скорость масла в масляном слое $v_z^*_{cp}$ вдоль предметного стекла может быть определена интегрированием выражения (1) и относя полученное значение к толщине слоя δ

$$v_z^*_{cp} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} v_z^* dx = \frac{\rho_{ж} g \delta^2 \sin \alpha}{3\eta}. \quad (3)$$

Движение частиц в масляном слое носит сложный характер. С одной стороны, частица в направлении оси z перемещается со скоростью v_z , совпадающей со скоростью движения жидкости v_z^* (1)

$$v_z^* = v_z = \frac{\rho_{ж} g \sin \alpha}{2\eta} (2\delta x_{ч} - x_{ч}^2). \quad (4)$$

С другой стороны, в направлении оси x скорость перемещения частицы v_x будет определяться силами, действующими на частицу:

– силой тяжести

$$F_T = \frac{\pi D^3 g}{6} \rho_{ч}; \quad (5)$$

где D – диаметр частицы, м;
 $\rho_{ч}$ – плотность частицы, кг/м³;
– выталкивающей силой Архимеда

$$F_A = \frac{\pi D^3 g}{6} \rho_{ж}; \quad (6)$$

– магнитной силой

$$F_M = \frac{\pi D^3 \chi}{3\mu_0} B \frac{dB}{dx}, \quad (7)$$

где χ – магнитная восприимчивость частицы;
 B – магнитная индукция, Н/А·м;
 μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме, Н/А²;
– силой сопротивления Стокса

$$F_{Ст} = 3\pi\eta D v_x. \quad (8)$$

Схема действия сил на частицу представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Схема действия сил на частицу в направлении оси x

Результирующую силу, действующую на частицу в направлении оси x , с учетом закона Ньютона можно записать

$$-F_T + F_A - F_M + F_{Cr} = \left(\frac{\pi D^3}{6} \rho_{\text{ч}} \right) \frac{dv_x}{dt}. \quad (9)$$

Подставляя выражения (5)–(8) в (9), получаем

$$-\frac{\pi D^3}{6} \left[g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\chi}{2\mu_0} B \frac{dB}{dx} \right] + 3\pi\eta D v_x = \left(\frac{\pi D^3}{6} \rho_{\text{ч}} \right) \frac{dv_x}{dt}. \quad (10)$$

Когда в процессе движения силы тяжести, Архимеда и магнитная сила уравновешиваются силой Стокса, скорость движения частицы становится постоянной v_{Cr} , соответственно, правая часть выражения (10) равна 0, а скорость частицы v_x заменяем на v_{Cr}

$$v_{Cr} = \frac{D^2}{18\eta} \left[g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\chi}{2\mu_0} B \frac{dB}{dx} \right]. \quad (11)$$

Комбинируя выражения (10) и (11), получаем

$$v_{Cr} - v_x = \frac{D^2 \rho_{\text{ч}}}{18\eta} \frac{dv_x}{dt}. \quad (12)$$

Решение дифференциального уравнения (12) имеет вид

$$v_x = v_{Cr} \left[1 - \exp\left(-\frac{18\eta}{D^2 \rho_{\text{ч}}} t\right) \right]. \quad (13)$$

Из уравнения (13) время, необходимое для того чтобы скорость частицы v_x в направлении x достигла 99 % от скорости Стокса v_{Cr} , можно оценить как $5D^2 \rho_{\text{ч}} / 18\eta$. Для стальной сферической частицы диаметром 10 мкм в моторном масле М-10Г₂ ($\rho_{\text{ж}} = 850,82 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температуре $T = 273 \text{ К}$) время составляет $9,0 \times 10^{-8} \text{ с}$.

Таким образом, скорость частицы достигает 99 % от скорости Стокса за доли секунды, и, следовательно, можно считать, что скорость движения частиц в направлении оси x равна скорости Стокса.

Отсюда следует, что в каждый момент времени

$$\frac{dx_{\text{ч}}}{dt} = -v_{Cr}, \quad (14)$$

где $x_{\text{ч}}$ – координата частицы в направлении оси x , м.

Уравнения (4) и (14) описывают движение магнитных частиц в потоке масла, как по оси x , так и по оси y . Учитывая, что

$$v_z = \frac{dz_{\text{ч}}}{dt}$$

и комбинируя уравнения (4) и (14), получаем

$$dz_{\text{ч}} = -\frac{\rho_{\text{ж}} g \sin \alpha}{2\eta v_{Cr}} (2\delta x_{\text{ч}} - x_{\text{ч}}^2) dx_{\text{ч}}.$$

Интегрируя это уравнение, получаем

$$z_{\text{ч}} = -\frac{\rho_{\text{ж}} g \sin \alpha}{2\eta v_{Cr}} \left(2\delta x_{\text{ч}}^2 - \frac{x_{\text{ч}}^3}{3} \right) + C. \quad (15)$$

Постоянную C в уравнении (15) определим из следующих граничных условий: при $z_{\text{ч}} = 0$, $x_{\text{ч}} = x_0$, где x_0 – координата положения частицы по оси x в начальный момент движения в масляном слое

$$C = \frac{\rho_{\text{ж}} g \sin \alpha}{2\eta v_{Cr}} \left(2\delta x_0^2 - \frac{x_0^3}{3} \right). \quad (16)$$

С учетом уравнения (16) уравнение (15) можно записать в виде

$$z_{\text{ч}} = \frac{\rho_{\text{ж}} g \sin \alpha}{\eta v_{Cr}} \left[\frac{1}{6} (x_{\text{ч}}^3 - x_0^3) - \delta (x_{\text{ч}}^2 - x_0^2) \right]. \quad (17)$$

С учетом сил, действующих на частицу в потоке масла, преобразуем уравнение (17), подставляя значение v_{Cr} из уравнения (11)

$$z_{\text{ч}} = \frac{18\rho_{\text{ж}} g \sin \alpha}{D^2} \left[\frac{1}{6} (x_{\text{ч}}^3 - x_0^3) - \delta (x_{\text{ч}}^2 - x_0^2) \right] \left[g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\chi}{2\mu_0} B \frac{dB}{dx} \right]. \quad (18)$$

Известно [11], что для создания высокоградиентного магнитного поля с высоким значением $B \frac{dB}{dx}$

предложен способ формирования новой магнитной системы. В этой системе с открытой доменной структурой Киттеля над свободными кромками сопрягаемых граней двух магнитов с противоположным направлением полярности магнитного поля и магнитной анизотропией, существенно превышающей магнитную индукцию материала магнитов, располагают две верхние тонкие пластины из магнитомягкого материала (рис. 3) [12]. Пластины размещены на свободных гранях магнитов так, что они формируют узкий зазор непосредственно над верхними кромками сопрягаемых граней магнитов, а нижняя пластина, также изготовленная из магнитомягкого материала, размещена под магнитами.

Эффект от введения магнитомягких пластин заключается в следующем: магнитные силовые линии распространяются от одного полюса к другому, по

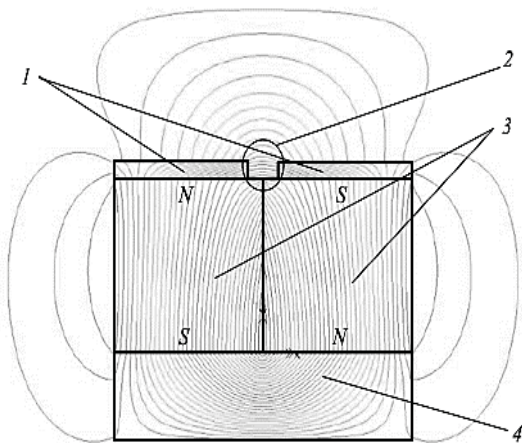


Рисунок 3. Полуоткрытая магнитная система Киттеля: 1 – верхние пластины; 2 – зазор; 3 – магниты; 4 – нижняя пластина

глощаются магнитомягким материалом в верхних пластинах, т.к. они обладают значительно большей магнитной проницаемостью, чем воздушная среда, и предотвращают выход большей части магнитного потока за пределы магнитной системы. Однако в зазоре между верхними пластинами создается область для выхода магнитных силовых линий, в которой образуется магнитное поле рассеяния с высокими напряженностью и градиентом напряженности в направлении, пер-

пендикулярном зазору. Нижняя пластина, расположенная под магнитами, также ограничивает выход силовых линий за пределы магнитной системы.

На рисунке 4 представлена расчетная зависимость $B \frac{dB}{dx}$ от расстояния x точки сопряжения верхних граней магнитов.

Для вышеописанной системы при различных значениях $B \frac{dB}{dx}$ с использованием формулы (18) рассчиты-

таны траектории движения ферромагнитных частиц диаметром 10 мкм ($\rho_{\text{ч}} = 7800 \text{ кг/м}^3$), движущихся в масляном слое ($\rho_{\text{ж}} = 800 \text{ кг/м}^3$) высотой 2 мм (рис. 5).

На рисунке 6 показаны траектории движения ферромагнитных частиц ($\rho_{\text{ч}} = 7800 \text{ кг/м}^3$) различного диаметра в масляном слое ($\rho_{\text{ж}} = 800 \text{ кг/м}^3$) высотой 2 мм при значении $B \frac{dB}{dx}$, равном $40 \text{ Тл}^2/\text{м}$.

На рисунке 7 показаны траектории движения ферромагнитных частиц ($\rho_{\text{ч}} = 7800 \text{ кг/м}^3$) диаметром 1 мкм в масляном слое ($\rho_{\text{ж}} = 800 \text{ кг/м}^3$) высотой 2 мм под воздействием магнитного поля $B \frac{dB}{dx} = 40 \text{ Тл}^2/\text{м}$ при различных координатах положения частицы x_0 в начальный момент движения.

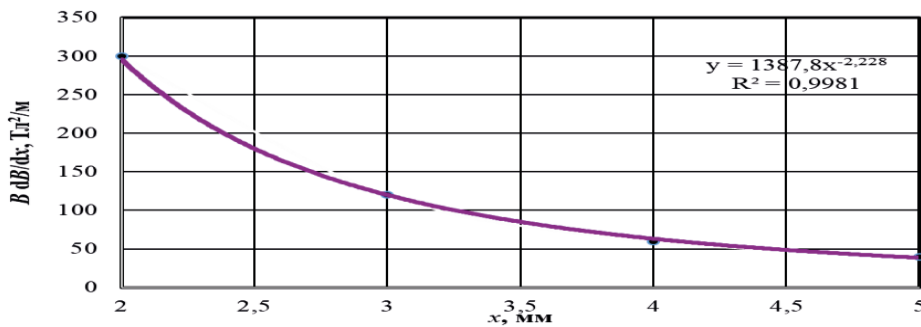


Рисунок 4. Зависимость $B \frac{dB}{dx}$ от расстояния x точки сопряжения верхних граней магнитов

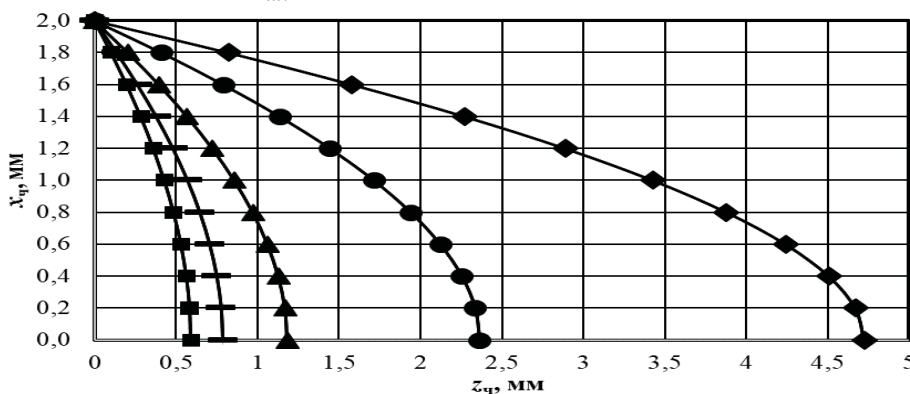


Рисунок 5. Траектории движения ферромагнитных частиц при различных значениях $B \frac{dB}{dx}$:
■ – $40 \text{ Тл}^2/\text{м}$; ▲ – $30 \text{ Тл}^2/\text{м}$; ● – $20 \text{ Тл}^2/\text{м}$; ○ – $10 \text{ Тл}^2/\text{м}$; ◆ – $5 \text{ Тл}^2/\text{м}$

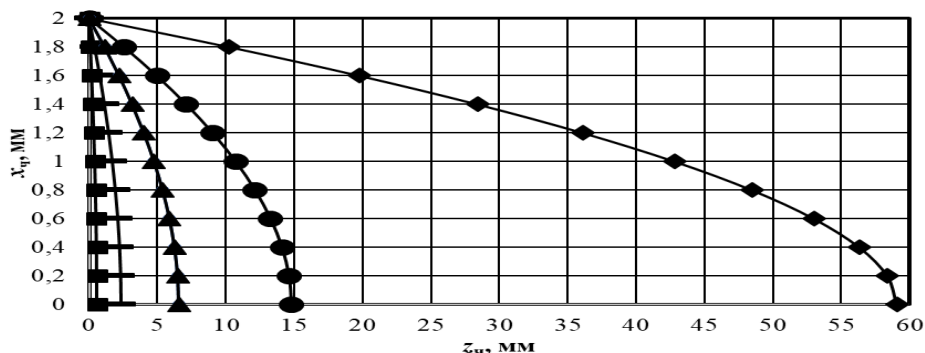


Рисунок 6. Траектории движения ферромагнитных частиц в магнитном поле $B \frac{dB}{dx} = 40 \text{ Тл}^2/\text{м}$ различного диаметра:

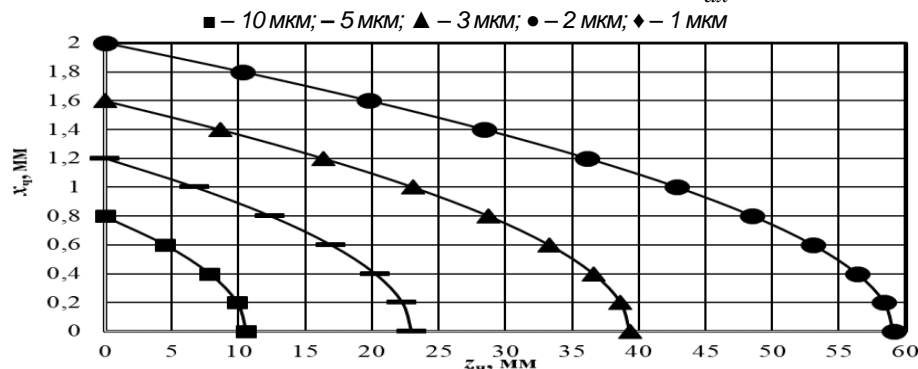


Рисунок 7. Траектории движения ферромагнитной частицы диаметром 1 мкм в магнитном поле

$B \frac{dB}{dx} = 40 \text{ Тл}^2/\text{м}$ при различных координатах положения x_0 в начальный момент движения:

■ – 0,8 мм; ▲ – 1,2 мм; ▲ – 1,6 мм; ● – 2 мм

Полученные зависимости (рис. 5-7) доказывают достоверность рассмотренной теоретической задачи движения ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле постоянных магнитов, позволяющей определять траектории их движения при различном значении градиента напряженности магнитного поля (рис. 5), различных размеров и природы продуктов износа (рис. 6), а также при различных начальных координатах попадания частиц в поток (рис. 7).

Заключение

Решена теоретическая задача движения ферромагнитных частиц в высокоградиентном поле действия сил постоянных магнитов, основанная на рассмотрении, во-первых, непосредственного движения масляного слоя по наклонной поверхности, во-вторых, движения ферромагнитных частиц в масляном слое, и, в-третьих, движения ферромагнитных частиц в масляном слое в высокоградиентном магнитном поле.

Проведенные теоретические расчеты движения ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле постоянных магнитов позволили определить траектории их движения при различном значении градиента напряженности магнитного поля, различных размеров и природы продуктов износа, а также при различных начальных координатах попадания частиц в поток, что, в конечном итоге, позво-

лит разработать и создать эффективные магнитные устройства для контроля за продуктами износа ДВС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Myalo, O.V. How the Key Indicators of Motor Oil Quality Affect the Reliability of Engine Assemblies in Tractors / O.V. Myalo, V.V. Myalo, E.V. Demchuk // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 666 (2021) 032053. – P. 1-9.
2. Fitch, B. Magnetic Filtration Applications and Benefits / B. Fitch // Machinery Lubrication [Electronic resource]. – 2005. – Mode of access: <https://www.machinerylubrication.com/Read/794/magnetic-filtration>. – Date of access: 15.03.2021.
3. Bubenicek, S. Le suivi d'usure de machines par la méthode des analyse périodiques d'huile / S. Bubenicek // Bulletin technique du: Bureau Veritas. – 1987. – Mart / april. – P.75-78.
4. Fitch, B. Anatomy of Wear Debris / B. Fitch // Machinery Lubrication [Electronic resource]. – 2013. – Mode of access : <https://www.machinerylubrication.com/Read/29537/wear-debris-anatomy>. – Date of access: 17.03.2021.
5. Fitch, J. The Benefits of Using Wear Debris Analysis in Industrial Machinery / J. Fitch // Machinery

Lubrication [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1390/wear-debris-analysis-industrial>. – Date of access: 17.03.2021.

6. Маркова, Л.В. Трибодиагностика машин / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 251 с.

7. Liu, Y. Motion analysis on the particles in a magnetic field detector / Y. Liu [et al.]. // Tribology International. – 2000. – № 33 – P. 837-843.

8. Самофалов, В.Н. Сильные поля рассеяния в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией / В.Н. Самофалов, Д.П. Белозоров, А.Г. Равлик // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – № 3. – С. 287-306.

9. Coey, J.M.D. Permanent magnet applications / J.M.D. Coey // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – № 248. – P. 441-456.

10. Берд, Р. Явления переноса. / Р. Берд, В. Стюарт, Е. Лайтфут. – Москва: Химия, 1974. – 688 с.

11. Magnet apparatus for generating high gradient magnetic field: pat. US 10328436 / Henrik Hoyer. – Pub. date 06. 25. 2019. – United States Patent Office.

12. Roth, I.B. Characterization and use of permanent magnets with extremely strong field gradients: master's thesis / I.B. Roth. – Department of Physics University of Oslo, 2009. – 95 p.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.10.2022

УДК 639.3.06+628.16.087

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АНАЭРОБНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ АКВАКУЛЬТУРЫ

В.Н. Штепа,

декан инженерного факультета Полесского гос. университета, докт. техн. наук, доцент

А.Б. Шикунец,

магистрант Полесского гос. университета

Проведены экспериментальные исследования анаэробного сбраживания отходов промышленной аквакультуры (помета клариевого сома), а также оценены различные способы интенсификации анаэробных процессов в биогазовом реакторе. Повышение эффективности процессов с помощью периодического воздействия постоянного электрического тока позволило повысить выход биогаза на 1 литр субстрата в 4,43 раза по сравнению с контрольным реактором. Установлено, что использование электротехнологической интенсификации позволяет сократить время окупаемости метаногенерирующего оборудования, а также увеличить прибыль от его использования. Полученные результаты могут быть эффективно использованы при функционировании промышленных систем аквакультуры, коммунальных и локальных очистных сооружений, а также мобильных биогазовых анаэробных реакторов.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, аквакультура, электролизные процессы.

The experimental study of industrial aquaculture waste anaerobic fermentation (clariid catfish droppings) was carried out, and various methods for intensifying anaerobic processes in the biogas reactor were evaluated. Improving the efficiency of processes with the help of periodic exposure to direct electric current made it possible to increase the yield of biogas per 1 liter of substrate by 4.43 times compared to the control reactor. It has been established that the use of electro-technological intensification makes it possible to reduce the payback time of the methane generating equipment, as well as increase profits from its use. The results obtained can be effectively used in the operation of industrial aquaculture systems, communal and local treatment facilities, as well as mobile biogas anaerobic reactors.

Key words: Anaerobic fermentation, aquaculture, electrolysis processes.

Введение

Анаэробные процессы часто используют для удаления загрязнений из промышленных отходов, например, в качестве первой ступени очистки сточных вод с высокой концентрацией органических загрязнений (биологическое потребление кислорода (БПК₅) более 4-5 гО₂/л, химическое потребление кислорода (ХПК) – от 3 гО₂/л), для переработки активного ила, других

осадков и твердых отходов. При этом в ходе метаногенерации (метаногенеза), процесса с образованием метана, органические загрязнения конвертируются в биогаз, содержащий в основном СН₄ и СО₂ [1].

В то же время при аэробной утилизации отходов образуется избыточный активный ил, в который переходит до 50 % всей энергии исходного органического вещества, тогда как в анаэробных процессах до 90-95 % всей энергии субстрата аккумулируется в