

УДК 621.926.5:532.546:537.622

Василий Александрович Филиппов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан факультета заочного и вечернего обучения, Россия, Иваново, e-mail: 9basy9@gmail.com

Владимир Евгеньевич Шоронов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: volodymyr.shoronov@yandex.ru

Комплексное экспериментальное исследование выталкивающей силы и энергопотребления электромагнитного магнитожидкостного сепаратора

Авторское резюме

Состояние вопроса. Магнитожидкостные сепараторы нашли широкое применение для высокоточного разделения немагнитных материалов в различных отраслях промышленности. Ключевой характеристикой, определяющей эффективность сепарации, является выталкивающая сила, действующая на частицы в рабочем зазоре. Характеристики процесса магнитожидкостной сепарации, особенно в режиме питания переменным током, изучены недостаточно, что определяет актуальность настоящего исследования, сосредоточенного, в частности, на анализе энергопотребления. Цель работы – проведение комплексного экспериментального исследования, связывающего силовые и энергетические характеристики электромагнитного магнитожидкостного сепаратора.

Материалы и методы. Специализированный измерительный комплекс разработан на основе тензодатчика, микросхемы HX711 и микроконтроллера Atmega328P для точного измерения выталкивающей силы в зазоре сепаратора. Измерения потребляемой мощности проведены с использованием ваттметра. Эксперименты выполнены на физической модели электромагнитного магнитожидкостного сепаратора с шихтованным магнитопроводом с использованием магнитных жидкостей на основе минерального масла с намагниченностями насыщения 15, 20, 25 и 30 кА/м. Верификация методики проведена с помощью аналитических расчетов.

Результаты. Разработан специализированный измерительный комплекс для измерения выталкивающей силы в зазоре сепаратора. Получены детальные зависимости выталкивающей силы от тока возбуждения и намагниченности насыщения магнитной жидкости. Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными показало их хорошее соответствие (средняя относительная погрешность не превысила 4,3 %). Установлено, что для достижения одного и того же значения выталкивающей силы режим питания переменным током требует на 40–180 % больше мощности по сравнению с режимом питания постоянным током.

Выводы. Разработанная методика измерения выталкивающей силы показала высокую точность и пригодна для диагностики состояния магнитожидкостного сепаратора. Основным результатом является существенно более низкая энергоэффективность электромагнитного магнитожидкостного сепаратора в режиме питания переменным током по сравнению с постоянным, что ставит под сомнение целесообразность его использования в данном режиме без компенсирующих технологических преимуществ.

Ключевые слова: выталкивающая сила, магнитожидкостный сепаратор, магнитная жидкость, потребляемая мощность, постоянный ток, переменный ток

Vasily Alexandrovich Filippov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Dean of the Faculty of Correspondence and Evening Studies, Russia, Ivanovo, e-mail: 9basy9@gmail.com

Vladimir Evgenievich Shoronov

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: volodymyr.shoronov@yandex.ru

Comprehensive experimental study of the buoyancy force and energy consumption of an electromagnetic magnetic-liquid separator

Abstract

Background. Magnetic fluid separators (MFS) are widely used for high-precision separation of non-magnetic materials in various industries. The key characteristic that determines the separation efficiency is the buoyant force acting on the particles in the working gap. The characteristics of the magnetic fluid separation process, especially in the alternating current supply mode, have been insufficiently studied. So, it determines the relevance of this study, which focuses, in particular,

on the analysis of energy consumption. The purpose of the study is to conduct a comprehensive experimental study integrating the power and energy characteristics of an electromagnetic MFS.

Materials and methods. A specialized measuring system based on a strain gauge, HX711 chip and Atmega328P microcontroller has been developed for accurate measurement of the buoyant force. Power consumption measurements have been carried out using powermeter. Experiments have been performed on a physical model of an electromagnetic MFS with a laminated core using magnetic fluids based on mineral oil with saturation magnetizations of 15, 20, 25, and 30 kA/m. Analytical calculations of the buoyant force have been performed to verify the methodology.

Results. A specialized measuring complex has been developed to measure the buoyant forces in the separator gap. Detailed dependencies of the buoyant force on the excitation current and the magnetic fluid saturation magnetization have been obtained. Comparison of the obtained experimental data with the calculated ones has shown good agreement (the average relative error does not exceed 4,3 %). It has been found that to achieve the same value of the buoyant force, the AC power mode requires 40–180 % more power compared to direct current (DC).

Conclusions. The developed method to measure the buoyant force has shown high accuracy and is suitable to diagnose the condition of the MFS. The main conclusion is the significantly lower energy efficiency of the electromagnetic MFS in the AC power mode compared to DC, which calls into question the feasibility of its use in this mode without compensating technological advantages.

Key words: buoyant force, magnetic fluid separator, magnetic fluid, power consumption, direct current, alternating current

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.075-081

Введение. Магнитожидкостная сепарация (МЖС) представляет собой высокоэффективную технологию разделения немагнитных материалов по плотности, нашедшую применение в обогащении полезных ископаемых, переработке вторичного сырья и геологоразведке [1]. Принцип действия основан на создании в магнитной жидкости, помещенной в неоднородное магнитное поле, выталкивающей магнитной силы. Таким образом, точность и эффективность сепарации напрямую определяются значением и стабильностью выталкивающей магнитной силы в рабочем зазоре сепаратора [2].

Одной из основных характеристик магнитной жидкости (МЖ), определяющей величину выталкивающей магнитной силы, является ее намагниченность насыщения (M_s). Вопросы расчета магнитной силы, действующей на тело в магнитной жидкости, рассматривались в работах ряда авторов [3, 4]. Однако количество экспериментальных данных, особенно касающихся динамических и энергетических характеристик сепараторов, остается ограниченным.

В частности, практически неизученным является вопрос энергоэффективности электромагнитных МЖС (ЭМЖС) при питании обмотки возбуждения переменным током. Потенциально такой режим может иметь технологические преимущества, такие как предотвращение агрегации сепарируемого материала и ускорение процесса сепарации. Однако его влияние на энергопотребление установки требует тщательного исследования.

Целью настоящего исследования является комплексное экспериментальное исследование выталкивающей силы и энергопотребления ЭМЖС в режимах питания постоянным и переменным током для магнитных жидкостей с различной намагниченностью насыщения.

Методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на физической модели ЭМЖС с шихтованным магнитопроводом

(рис. 1). Магнитная система включала полюсные наконечники, катушку возбуждения и Г-образные балки для создания рабочего зазора. Для создания магнитного поля использовались катушки возбуждения, расположенные на магнитопроводе. Катушки возбуждения питались от регулируемых источников постоянного и переменного токов.

Для измерения выталкивающей магнитной силы был разработан специализированный измерительный механизм. Его принцип действия заключается в следующем: в зазоре сепаратора размещался поплавков из немагнитного материала. Выталкивающее усилие, действующее на поплавок со стороны магнитной жидкости, фиксировалось тензодатчиком. Аналоговый сигнал с тензодатчика усиливался и преобразовывался в цифровой с помощью микросхемы HX711. Далее оцифрованный сигнал обрабатывался микроконтроллером Atmega328P (плата Arduino Nano) и передавался на персональный компьютер для регистрации и обработки. Структурная схема соединения аппаратных компонентов измерительного механизма представлена на рис. 2.

Программное обеспечение комплекса включало прошивку для микроконтроллера и графический интерфейс пользователя на ПК. Для исключения систематической погрешности была проведена калибровка измерительного тензодатчика. Конструкция измерительного механизма (рис. 3) обеспечивала точное позиционирование поплавка в рабочем зазоре.

Измерения потребляемой активной мощности проводились с помощью ваттметра. Измерения выталкивающей силы проводились с использованием магнитных жидкостей с намагниченностями насыщения $M_s = 15, 20, 25$ и 30 кА/м.

Параллельно с экспериментальными исследованиями для верификации точности разработанной методики измерений выполнены аналитические расчеты выталкивающей силы по методике, изложенной в [5].

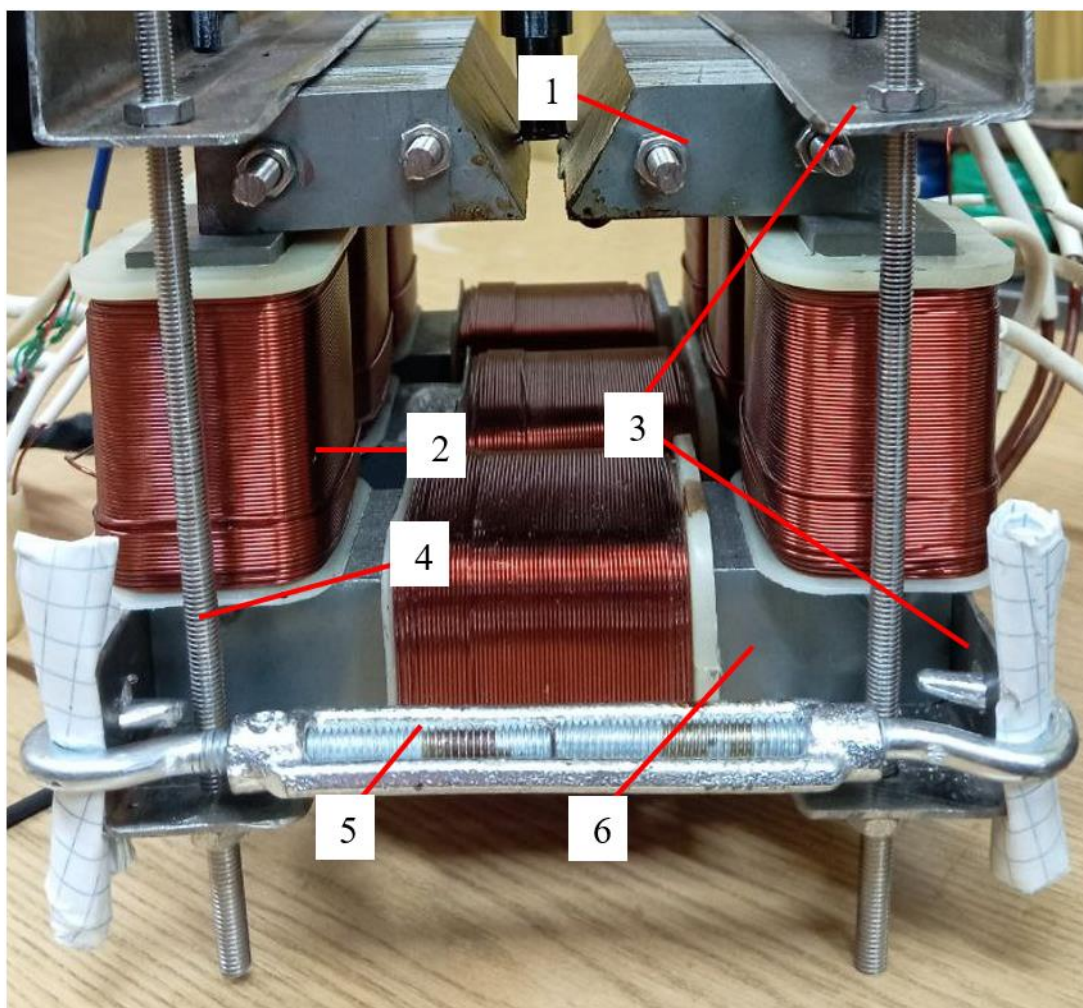


Рис. 1. Опытная установка электромагнитного магнитожидкостного сепаратора: 1 – полюс магнитной системы; 2 – катушка возбуждения; 3 – Г-образные балки; 4 – вертикальная шпилька; 5 – талреп; 6 – Г-образная часть секции магнитопровода

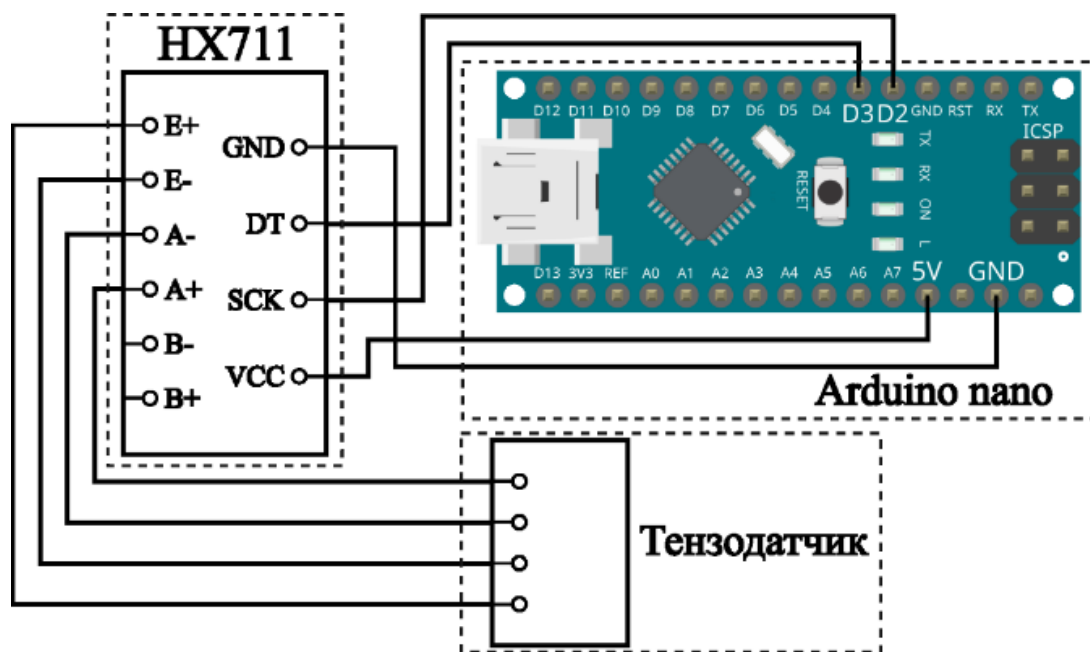


Рис. 2. Структурная схема соединения аппаратных компонентов измерительного механизма

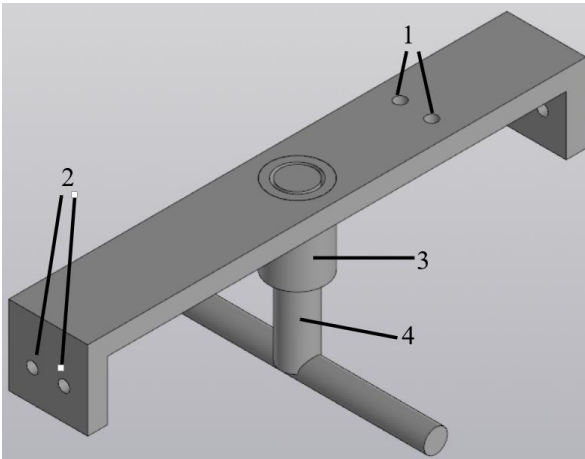


Рис. 3. Конструкция измерительного механизма: 1 – отверстия для крепления тензодатчика; 2 – отверстия для крепления к установке; 3 – направляющая трубка поплавка; 4 – подвижный поплавок

Результаты. Были проведены серии экспериментов по измерению выталкивающей силы в зависимости от тока возбуждения для четырех образцов магнитных жидкостей. Параллельно выполнены аналитические расчеты выталкивающей силы. Результаты измерений и расчетов представлены в табл. 1.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными показало хорошее количественное и качественное совпадение (рис. 4). Наибольшее соответствие наблюдается для магнитной жидкости с $M_s = 25$ кА/м, где средняя относительная погрешность составляет 2,9 %. Для других магнитных жидкостей погрешность не превышает 4,3 %, что подтверждает адекватность использованной математической модели и точность разработанного измерительного комплекса.

Таблица 1. Зависимость выталкивающей силы от тока возбуждения

M_s , кА/м	Метод получения данных	Ток возбуждения I , А									
		2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
		Выталкивающая сила F , мН									
15	Расч.	26,62	32,43	38,11	43,83	49,77	56,03	62,31	68,14	73,13	77,32
	Эксп.	22,48	32,09	38,13	45,03	51,73	55,83	61,35	73,04	80,13	83,2
20	Расч.	41,44	48,41	55,43	62,17	68,57	74,64	80,48	86,18	91,83	97,49
	Эксп.	44,55	53,97	56,67	64,49	70,98	75,22	81,41	86,5	94,87	99,1
25	Расч.	55,28	63,49	72,24	81,29	90,01	98,22	106,77	115,59	123,84	131,58
	Эксп.	56,91	66,23	72,54	80,53	88,29	95,82	103,7	110,77	118,54	125,23
30	Расч.	59,33	69,28	79,47	89,61	99,62	109,35	118,81	128,14	137,49	146,91
	Эксп.	66,47	75,95	85,32	94,87	102,59	110,05	118,34	127,39	134,28	144,97

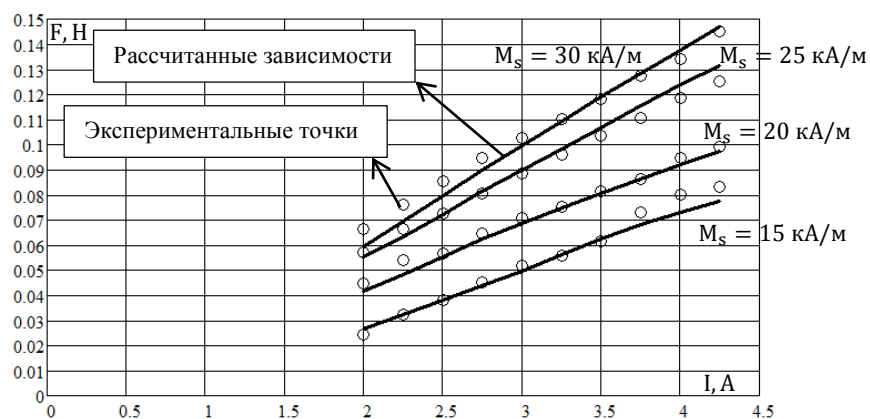


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные зависимости выталкивающей силы F от тока возбуждения I

Для количественной оценки точности методики измерений проведен анализ относительных погрешностей расчетных и экспериментальных значений (табл. 2). Наибольшие расхождения наблюдаются при малых значениях тока (2,0–2,5 А),

что может быть связано с нелинейностью начального участка намагничивания магнитной системы. При рабочих значениях тока (3,0–4,25 А) погрешность не превышает 5 %, что свидетельствует о допустимой точности методики.

Анализ полученных зависимостей показывает, что с ростом тока возбуждения и намагниченности насыщения МЖ выталкивающая сила закономерно увеличивается. Нелинейный характер зависимостей обусловлен магнитными свойствами как магнитной жидкости, так и ферромагнитных элементов магнитной системы сепаратора.

На следующем этапе были исследованы энергетические показатели ЭМЖС. На рис. 5–8 представлены зависимости потребляемой мощности от величины выталкивающей силы для режимов питания постоянным и переменным током.

Таблица 2. Относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений, %

M_s , кА/м	Ток возбуждения I , А										Среднее, %
	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	
	Относительная погрешность, %										
15	8,06	1,07	0,03	2,74	3,92	0,37	1,55	7,19	9,57	7,59	4,21
20	7,49	11,47	2,23	3,72	3,51	0,77	1,15	0,37	3,3	1,64	3,57
25	2,93	4,31	0,41	0,94	1,92	2,44	2,88	4,18	4,28	4,83	2,91
30	12,03	9,62	7,36	5,86	2,98	0,63	0,4	0,59	2,34	1,32	4,31

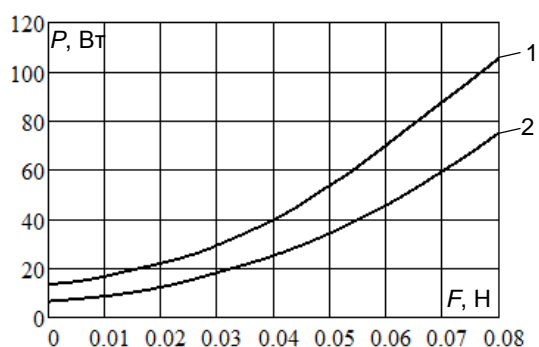


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности ЭМЖС от выталкивающей силы для МЖ с $M_s = 15$ кА/м: 1 – на переменном токе; 2 – на постоянном токе

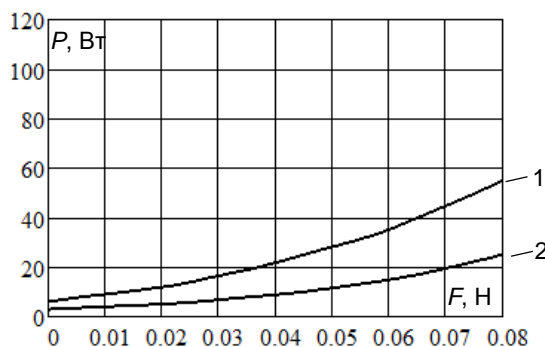


Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности ЭМЖС от выталкивающей силы для МЖ с $M_s = 25$ кА/м: 1 – на переменном токе; 2 – на постоянном токе

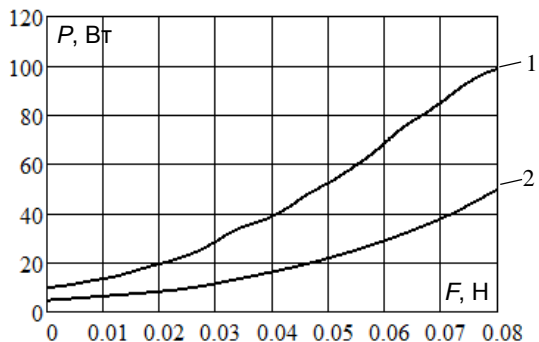


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности ЭМЖС от выталкивающей силы для МЖ с $M_s = 20$ кА/м: 1 – на переменном токе; 2 – на постоянном токе

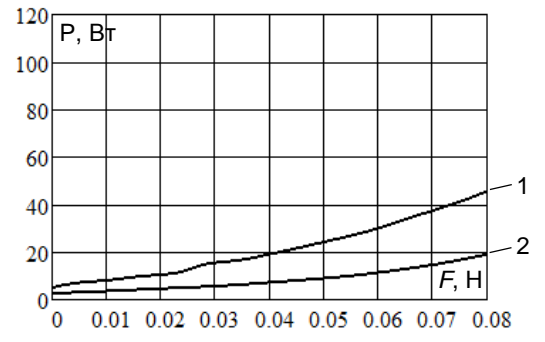


Рис. 8. Зависимость потребляемой мощности ЭМЖС от выталкивающей силы для МЖ с $M_s = 30$ кА/м: 1 – на переменном токе; 2 – на постоянном токе

Анализ полученных зависимостей показывает, что для достижения одной и той же выталкивающей силы в режиме переменного тока требуется значительно большая мощность. Разница в потребляемой мощности варьируется от 40 до 180 % в зависимости от конкретного режима (значения выталкивающей силы и типа МЖ). Наименьшая разница наблюдается при малых значениях силы и для МЖ с низкой M_S , наибольшая – в зоне средних и высоких нагрузок.

Основной причиной столь значительного роста энергопотребления в режиме питания переменным током являются дополнительные потери в шихтованном магнитопроводе сепаратора на перемагничивание и вихревые токи. Кроме того, наличие реактивного тока в цепи увеличивает потери в меди обмоток возбуждения.

Выводы. Сравнение экспериментальных данных, полученных с использованием разработанного и апробированного измерительного комплекса для определения выталкивающей силы в зазоре магнитоидкостного сепаратора, с аналитическими расчетами показало хорошее количественное и качественное соответствие, что подтверждает достоверность применяемой методики измерений.

Установлено, что средняя относительная погрешность между расчетными и экспериментальными значениями выталкивающей силы составляет от 2,9 до 4,3 % для различных магнитных жидкостей. Наибольшая точность достигнута для магнитной жидкости с $M_S = 25$ кА/м (погрешность 2,9 %).

Анализ распределения погрешностей по току возбуждения выявил закономерность: наибольшие расхождения (до 12 %) наблюдаются в области малых токов (2,0–2,5 А), что объясняется погрешностью измерения выталкивающей силы. В рабочем диапазоне токов (3,0–4,25 А) погрешность не превышает 5 %, что подтверждает пригодность методики для эксплуатационного контроля.

Впервые проведенное комплексное сравнительное исследование энергопотребления электромагнитного МЖС в режимах питания постоянным и переменным током позволило установить, что для достижения одинаковой выталкивающей силы потребляемая мощность в режиме переменного тока в среднем в 1,5–1,8 раза выше, чем в режиме постоянного тока, причем разница возрастает с увеличением значения выталкивающей силы.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную методику для оперативного контроля состояния магнитной жидкости в процессе эксплуатации сепараторов. Выявленная значительная разница в энергоэффективности режимов питания требует тщательного технико-экономического обоснования при выборе режима работы ЭМЖС.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией конструкции магнитной системы для снижения потерь в режиме переменного тока, а также с изучением влияния режима питания на технологические показатели сепарации (качество разделения, производительность).

Список литературы

1. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. – Иваново, 2011. – 264 с.
2. Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Расчет силы, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости в присутствии неоднородного магнитного поля // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – Т. 3. – С. 158–161.
3. Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Проектный расчет магнитоидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XIX Бенардосовские чтения). – Иваново, 2017. – Т. 3. – С. 211–214.
4. Филиппов В.А. Повышение эффективности электромагнитных магнитоидкостных сепараторов немагнитных материалов: дис. ... канд. техн. наук; специальность 05.09.01. – Самара, 2020. – 134 с. – EDN SKQOXP.
5. Розенцвейг Р.Е. Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989. – 352 с.
6. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
7. Страдомский Ю.И. Основы феррогидродинамики: учеб. пособие. – Иваново, 2004. – 108 с.
8. Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Этапы проектирования магнитоидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов // XVIII Междунар. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр., Плес, 04–07 сентября 2018 г. – Иваново, 2018. – С. 178–186.
9. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с.
10. Перминов С.М. Разработка способа, устройства и методики измерения намагниченности нанодисперсной магнитной жидкости // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 4. – С. 54–57.

References

1. Morozov, N.A., Kazakov, Yu.B. *Nanodispersnye magnitnye zhidkosti v tekhnike i tekhnologiyakh* [Nanodispersed magnetic fluids in engineering and technology]. Ivanovo, 2011. 264 p.
2. Kazakov, Yu.B., Stradomskiy, Yu.I., Filippov, V.A. Raschet sily, deystvuyushchey na nemagnitnoye telo v magnitnoy zhidkosti v prisutstvii neodnorodnogo magnitnogo polya [Calculation of the force acting on a non-magnetic body in a magnetic fluid in the presence of a non-uniform magnetic field]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XVI Benar-*

dosovskie chteniya) [Proceedings of international scientific and technical conference “Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies” (XVI Benardos Readings)]. Ivanovo, 2011, vol. 3, pp. 158–161.

3. Stradomskiy, Yu.I., Filippov, V.A. Proektny raschet magnitnozhidkostnogo separatora dispersnykh nemagnitnykh materialov [Design calculation of a magnetic fluid separator for dispersed non-magnetic materials]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XIX Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference “Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies” (XIX Benardos Readings)]. Ivanovo, 2017, vol. 3, pp. 211–214.

4. Filippov, V.A. *Povyshenie effektivnosti elektromagnitnykh magnitnozhidkostnykh separatorov nemagnitnykh materialov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk. 05.09.01 [Improving the efficiency of electromagnetic magnetic fluid separators of non-magnetic materials. Cand. tech. sci. diss.; specialty 05.09.01]. Samara, 2020. 134 p. EDN SKQOXP.

5. Rozentsveyg, R.E. *Ferrogidrodinamika* [Ferromagnetics]. Moscow: Mir, 1989. 352 p.

6. Berkovskiy, B.M., Medvedev, V.F., Krakov, M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow: Khimiya, 1989. 240 p.

7. Stradomskiy, Yu.I. *Osnovy ferrogidrodinamiki* [Fundamentals of ferrohydrodynamics]. Ivanovo, 2004. 108 p.

8. Stradomskiy, Yu.I., Filippov, V.A. Etapy proektirovaniya magnitnozhidkostnogo separatora dispersnykh nemagnitnykh materialov [Stages of the design of a magnetic fluid separator for dispersed non-magnetic materials]. *Sbornik nauchnykh trudov XVIII Mezhdunarodnoy Plessskoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam, Ples, 04–07 sentyabrya 2018 g.* [Proceedings of XVIII international Plyos scientific conference on nanodispersed magnetic fluids. Plyos, September 4–7, 2018]. Ivanovo, 2018, pp. 178–186.

9. Bul', O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Calculation methods for magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuits, fields, and the FEMM program]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 336 p.

10. Perminov, S.M. Razrabotka sposoba, ustroystva i metodiki izmereniya namagnichennosti nanodispersnoy magnitnoy zhidkosti [Development of method, device and technique for measuring the magnetization of nanodispersed magnetic fluid]. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 4, pp. 54–57.