

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИИ ЧАСТИЦ  
В МАГНИТНОМ ОТСТОЙНИКЕ**

Масюткин Е.П., Авдеев Б.А.

**Реферат.** В сельском хозяйстве применяют большое количество различных смазывающе-охлаждающих жидкостей при эксплуатации, обслуживании и ремонте агропромышленной техники. В процессе использования технические жидкости загрязняются посторонними примесями и требуют периодической очистки. Для этого хорошо подходят магнитные отстойники. Исследования проводили с целью определения параметров (величина и градиент напряженности магнитного поля, высота аппарата, концентрация частиц), при которых наблюдается коагуляция частиц в неоднородном магнитном отстойнике. Эксперименты проводили на лабораторной установке по изучению коагуляции в рабочей области магнитного отстойника. Для заданной магнитной системы геометрические размеры аппарата были определены таким образом, чтобы магнитное поле действовало во всем рабочем объеме отстойника и эффективно улавливало посторонние металлические примеси. Величина магнитной индукции поля  $B$  пропорциональна квадрату расстояния от исследуемой точки до полюса электромагнита  $H_0$ . На расстоянии 300 мм и далее магнитная сила почти не действует на частицу, поэтому высота отстойника должна быть меньше. Самая низкая индукция магнитного поля наблюдается на середине катушки. Уменьшение тока в обмотке влечет за собой сокращение длины флоккул; магнитная коагуляция имеет место при концентрации частиц в СОЖ более 0,3 г/л, при меньшем содержании она не наблюдается вследствие значительных расстояний между частицами; эффект коагуляции отмечен во всей области действия магнитного поля, при этом со снижением концентрации уменьшается и длина флоккул. Расстояние, на котором наблюдается эффект коагуляции между частицами, определяется сложной функцией, которая зависит от силы тока в обмотке, напряженности поля, удаленности их от полюса электромагнита, а также от размера частиц.

**Ключевые слова:** магнитный отстойник, магнитное поле, коагуляция, напряженность магнитного поля, примеси, очистка.

**Введение.** Современная сельскохозяйственная техника сложна и высокотехнологична. Для того чтобы обеспечивать соответствующее качество ее работы необходимо своевременно осуществлять регламентные работы по ее техническому обслуживанию, приводить в надлежащее состояние и заменять изношенные или поломанные части и механизмы. Производство и переработка сельскохозяйственной продукции связаны с выполнением большого количества технологических операций различного характера [1]. При резании, выдавливании, прокатке, штамповке, сверлении деталей и др. часто используют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые отводят теплоту от рабочего инструмента и заготовки, а также смазывают трущиеся детали [2, 3, 4]. В процессе эксплуатации СОЖ загрязняется стружкой, твердой пылью, посторонними маслами и др. Это приводит не только к снижению эффективности и качества обработки материалов, но и служит причиной поломок оборудования [5, 6]. Ненадлежащее поддержание рабочих свойств технических жидкостей, отсутствие возможности их повторного использования после глубокой очистки – одна из причин низкой рентабельности производства. Затраты на СОЖ в агропромышленном комплексе до 4 раз превышают расходы на режущие инструменты и достигают 17 % себестоимости изготовления деталей машин [7].

Отстойники, предназначенные для очистки СОЖ от механических примесей, нашли широкое применение из-за простоты, надежности и низких затрат при обслуживании [8, 9]. В связи с тем, что в примесях очень часто содержатся частицы, обладающие электрическими свойствами, с целью повышения эффективности очистки применяют поля электрической приро-

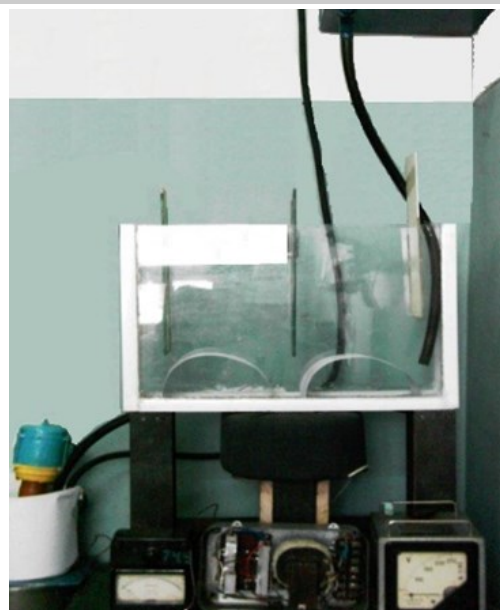
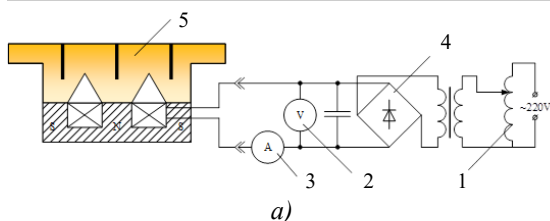
ды [10, 11]. Магнитное поле позволяет коагулировать ферромагнитные частицы и те, обладая после этого большей массой, оседают под действием силы тяжести и магнитной силы в несколько раз быстрее. Остальные частицы, находящиеся в СОЖ, цепляются за быстрооседающие ферромагнитные и увлекаются вместе с ними, что повышает эффективность очистки в целом. Несмотря на то, что такие устройства применяют давно, до сих пор не изучены вопросы, связанные с наложением силовых полей [12].

Цель исследований – определение эффективности очистки СОЖ от механических примесей в магнитном отстойнике, путем принудительной коагуляции в магнитном поле.

**Условия, материалы и методы исследований.** Для проведения работы была сконструирована лабораторная установка (рисунок 1).

Предлагаемая конструкция магнитной системы дает возможность варьировать количество витков  $W$  в обмотке электромагнита. При ее разработке принимали во внимание, что согласно рекомендациям [13], отношение общей высоты отстойников  $h$  к их поперечным размерам  $L$  должно быть не меньше 4...5. Сужение этого отношения может привести к тому, что большая часть магнитной силы будет расходоваться на создание поля за пределами отстойника. Кроме того, учитывали, что возле стенок отстойника напряженность магнитного поля будет значительно больше, чем в его центральной части, следовательно, значительная часть поперечного пересечения отстойника будет работать с малой интенсивностью, снижая производительность процесса.

Исследования по определению эффективной рабочей зоны отстойника проводили на специально сконструированной установке



а)

б)

Рисунок 1 – Экспериментальная установка для определения эффективности очистки СОЖ от механических примесей в магнитном отстойнике: (а) схема; (б) фотография; (в) измерение магнитной индукции электроизмерительным прибором для контроля магнитных полей ЭМ4305:

1 – регулировочный трансформатор ЛАТР; 2 – вольтметр; 3 – амперметр; 4 – блок выпрямительных диодов; 5 – магнитный отстойник

Основные параметры магнитопровода отстойника:

длина магнитопровода	650 мм;
ширина магнитопровода	120 мм;
высота магнитопровода	360 мм;
ширина полюса	80 мм;
высота окна обмотки	280 мм;
ширина окна обмотки	190 мм;
межполюсный шаг	270 мм;
марка провода	ПЭВ-1;
диаметр обмоточного провода	1,27 мм;
плотность тока в обмотке	2,5 А/мм <sup>2</sup> ;
удельное сопротивление провода	0,0175 Ом·м;
сопротивление обмотки	45,1 Ом;
коэффициент заполнения	0,05;
число витков катушки	2800 витков;
максимальный ток	30 А;
напряжение питания	0...220 В;
потребляемая мощность	453 Вт.

(рисунок 2). Параметры изменения магнитной индукции  $B$  определяли электроизмерительным прибором для контроля магнитных полей ЭМ4305 (см. рисунок 1 в).

Наиболее сложным и малоизученным оста-

ется процесс коагуляции частиц. Экспериментальные исследования для определения влияния на него различных факторов (величина и градиент напряженности магнитного поля, высота аппарата, концентрация частиц) проводили в статическом режиме. Концентрация частиц была выбрана в соответствии с реальным содержанием механических примесей в СОЖ (см. табл.). Загрязнение СОЖ проводили весовым способом.

Изменение величины напряженности поля  $H$ , а, следовательно, и его градиент  $a \text{ grad } H$  в экспериментах регулировали варьированием тока  $I$  регулировочным трансформатором в обмотке электромагнита. Связь силы тока с напряженностью поля описывает закон полного тока.

**Анализ и обсуждение результатов исследований.** По данным эксперимента по определению эффективной рабочей зоны отстойника были построены зависимости изменения магнитной индукции  $B$  от высоты рабочей зоны магнитного отстойника  $Y$  и изменения магнитной индукции  $B$  от длины магнитопровода  $a$ . Результаты исследований свидетельствуют, что величина магнитной индукции поля  $B$  пропор-

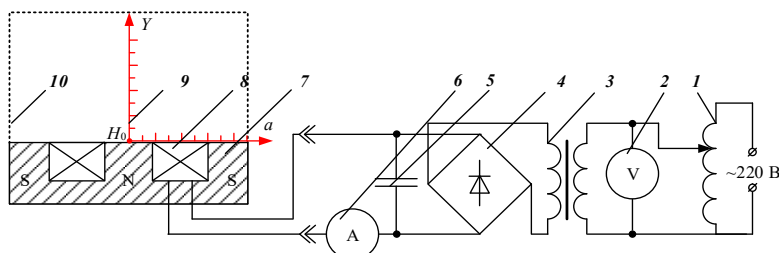


Рисунок 2 – Схема установки для определения эффективной рабочей зоны магнитного отстойника: 1 – регулировочный трансформатор ЛАТР; 2 – вольтметр; 3 – понижающий трансформатор 220/12; 4 – диодный мостовой выпрямитель; 5 – сглаживающий конденсатор; 6 – амперметр; 7 – магнитопровод электромагнитная катушка; 9 – измерительная шкала; 10 – рабочая камера отстойника

Таблица – Исходные данные для проведения экспериментальных исследований по изучению коагуляции частиц в неоднородном магнитном поле

Концентрация магнитных частиц ( $\delta_M$ ), г/л	Средний размер частиц ( $d_c \cdot 10^{-5}$ ), м	Напряжение на обмотке ( $U_1$ ), В	Ток на обмотки ( $I_2$ ), А
0,3	2,4 – 3,7	20 – 90	5 – 30
0,4	2,4 – 3,7	20 – 90	5 – 30
0,5	2,4 – 3,7	20 – 90	5 – 30

циональная квадрату расстояния от исследуемой точки до полюса электромагнита  $H_0$ . На расстоянии 300 мм и далее магнитная сила почти не действует на частицу (рисунок 3), поэтому высота  $Y$  отстойника должна быть не более 300 мм. Самая низкая индукция магнитного поля наблюдается на середине катушки (рисунок 4).

Анализ зависимости изменения размера флоккул механических примесей в СОЖ при различных значениях силы тока в обмотке (рисунок 5), установленной в результате экспериментального изучения процесса коагуляции частиц в неоднородном магнитном поле, пока-

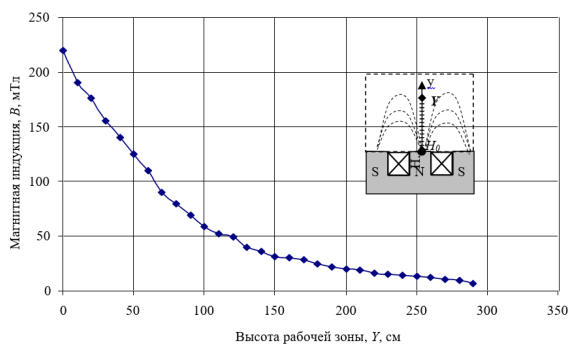


Рисунок 3 – Зависимость изменения магнитной индукции  $B$  от высоты  $Y$  рабочей зоны

зал, что расстояние, на котором наблюдается этот эффект, – сложная функция, зависящая от силы тока в обмотке  $I$  (напряженности поля  $H$ ) и концентрации частиц в СОЖ.

В целом на основании экспериментальных исследований было установлено следующее:

уменьшение тока в обмотке влечет за собой уменьшение длины флоккул;

магнитная коагуляция имеет место при концентрации частиц в СОЖ более 0,3 г/л, при меньшем содержании она не наблюдается вследствие значительных расстояний между частицами;

эффект коагуляции отмечен во всей области действия магнитного поля, при этом со снижением концентрации уменьшается и длина флоккул.

Проведение подобного анализа позволяет повысить эффективность использования магнитного поля для интенсификации процесса улавливания ферромагнитных примесей из СОЖ. На работу устройства влияют не только его геометрические размеры и время отстаивания, но и величина, а также распределение магнитного поля в рабочей камере отстойника. Так как распределение его индукции обратно пропорционально квадрату расстояния до полюса, эффективное потребление электроэнергии обусловлено геометрическими размерами отстойника, особенно его высотой. Помимо распределения магнитного поля следует учитывать сред-

ний размер примесей и их концентрацию. Правильно подобранная величина напряженности поля обеспечит принудительную коагуляцию, что позволит уменьшить время пребывания СОЖ в отстойное и/или его геометрические размеры.

Для повышения эффективности очистки СОЖ от посторонних примесей разработана новая конструкция магнитного отстойника (заявка на полезную модель была подана на рассмотрение в ФИПС). Он состоит из рабочей камеры с входным и выходным патрубками; магнитопровода, собранного из III – образных

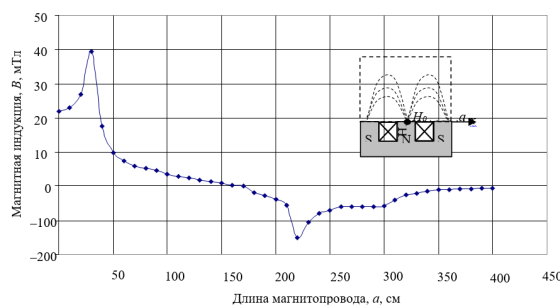


Рисунок 4 – Зависимость изменения магнитной индукции  $B$  от длины  $a$  магнитопровода

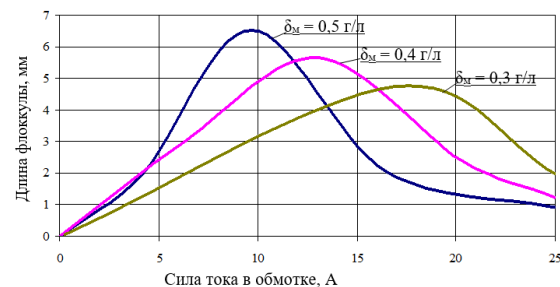


Рисунок 5 – Зависимость изменения размера флоккул механических примесей в СОЖ при различных значениях силы тока в обмотке

пластин, которые объединены в секции; в местах крепления секций установлены немагнитные втулки; в пазах секций магнитопровода закреплена электрическая обмотка, которая соединена с источником постоянного тока.

Предложенное устройство работает следующим образом: при подключении электрической обмотки 5 к источнику постоянного тока образуется магнитное поле в рабочей камере 2, которая служит отстойником. Загрязненная СОЖ подается через входной патрубок 1 в рабочую камеру 2, где происходит осаждение магнитных частиц под действием сил магнитного поля к полюсам магнитопровода 4. Очищенная СОЖ подступает в выходной патрубок 3. Наличие воздушных зазоров между секциями магнитопровода 4, созданных немагнитными втулками 6, обеспечивает охлаждение обмотки 5. Благодаря простоте в изготовлении и использовании,

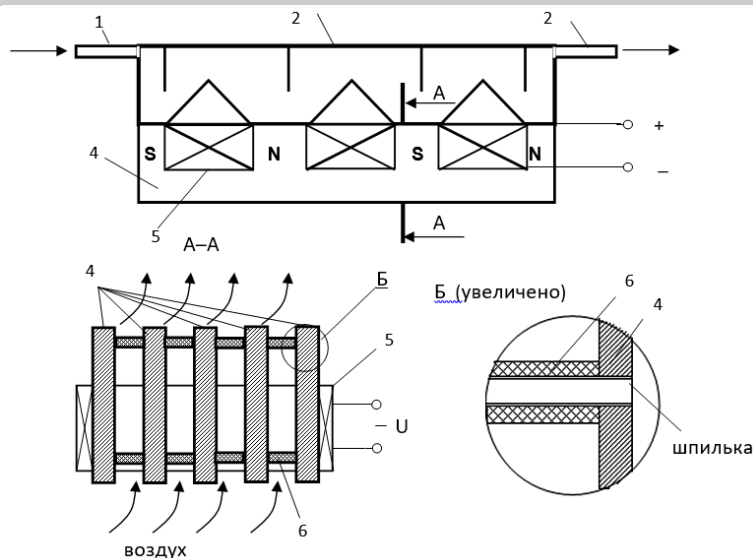


Рисунок 6 – Схема отстойника с Ш – образной формой сердечника электромагнита:  
1 – входной патрубок; 2 – рабочая камера; 3 – выходной патрубок; 4 – магнитопровод;  
5 – обмотка; 6 – немагнитные втулки

надежности и эффективности, такая конструкция должна найти достойное применение в сельском хозяйстве страны.

Использование этой электромагнитной системы в конструкции отстойника позволит снизить металлозатраты на 40 % и одновременно повысить качество очистки СОЖ от механических примесей. Охлаждение обмотки позволит использовать магнитный отстойник на полную мощность и повысить срок его службы.

**Выводы.** В результате исследований установлены зависимости изменения размера флоккул механических примесей в смазывающе-охлаждающих жидкостях при различных значениях силы тока в обмотке электромагнита. Показано, каким образом необходимо выбирать

параметры магнитного отстойника, чтобы его эффективность была высокой при сохранении малых габаритов и небольшого потребления электроэнергии. Полученные результаты по повышению эффективности очистки СОЖ в магнитных отстойниках позволяют оптимизировать использование энергоресурсов и электроэнергии для повышения качества труда в сельскохозяйственном производстве, а также в создании энергосберегающих и экологических технологий в агропромышленном комплексе.

**Сведения об источнике финансирования.**

Статья подготовлена при финансовой поддержке Государственного совета Республики Крым молодым учёным Республики Крым.

**Литература**

1. Tarleton, E.S. Wakeman R.J. Solid-Liquid Separation: Equipment Selection and Process. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. P. 465.
2. Методы повышения стойкости метчиков / И.Ю. Игнаткин, С.К. Федоров, А.В. Щедрин и др. // Вестник НГИЭИ. 2019. № 11 (102). С. 57-66.
3. Классификация технологий упрочнения, нанесения покрытий и восстановления деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей / С.Н. Шарифуллин, Н.Р. Адигамов, П.А. Тополянский и др.// Вестник Казанского ГАУ. 2019. Т. 14. № 3. С. 128-132.
4. Avdeyev B., Vyngra A., Bordiug A. Testing the efficiency of abrasive treatment of reconditioned parts using coolant cleaning in a magnetic sump // MATEC Web of Conferences. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019", 2019. Vol. 298. P. 00115.
5. Масюткин Д.Е., Сороколетов П.В. Использование магнитного поля для повышения эффективности очистки вязких сред // Новая наука: Стратегия и векторы развития. в 3 ч. Стерлитамак: АМИ, 2016. Ч.2. С. 212-218.
6. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей: монография / Е.Е. Александров, И.А. Кравец, Е.Н. Лысыков и др. Харьков: НТУ «ХПИ». 2006. 544 с.
7. Investigation of the orientation of floccules in magnetic sump during cleaning of cooling lubricants / B. A. Avdeyev, V. B. Masyagin, R. R. Dema, et al. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 2018. № 1050. P. 012005.
8. Коробочка, А.Н. Тихонцов А.М., Брылев Е.А. Очистка технологических сред при обработке металлов резанием. Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 1992. 127 с.
9. Budnik V., Chernyi S. Future Development of the World Ocean Mining for the Industry // Procedia Engineering. 2016. vol. 150. Pp. 2150-2156.
10. Особенности образования аэродисперсных систем при использовании СОЖ на машиностроительных предприятиях / П.А. Мельников, Н.М. Бобровский, А.Н. Попов и др.// Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 3. С. 87–91.
11. Avdeyev B., Prosvirnin V., Dema R. Calculation of magnetic devices cleaning coolants in the agro-industrial complex // MATEC Web of Conferences. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018". 2018. Vol. 224. P. 05003.

12. Дьяконов О.М. Шламы металлообрабатывающего производства. Часть 2. Физико–механические свойства // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 272–277.

13. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. 268 с.

**Сведения об авторах:**

Масюткин Евгений Петрович – кандидат технических наук, ректор; e-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Авдеев Борис Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; e-mail: dirigeant@mail.ru

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Россия

**EXPERIMENTAL STUDY OF COAGULATION OF PARTICLES IN A MAGNETIC SEDIMENTATION**

**Masyutkin E.P., Avdeev B.A.**

**Abstract.** In agriculture, a large number of different lubricating and cooling liquids are used in the operation, maintenance and repair of agricultural machinery. In the process of use, technical fluids become contaminated with foreign impurities and require periodic cleaning. Magnetic sedimentation tanks are well suited for this. The studies were carried out in order to determine the parameters (the magnitude and gradient of the magnetic field strength, the height of the apparatus, the concentration of particles), at which coagulation of particles is observed in a non-uniform magnetic settler. The experiments were carried out on a laboratory setup for studying coagulation in the working area of a magnetic sump. For a given magnetic system, the geometric dimensions of the apparatus were determined in such a way that the magnetic field acts in the entire working volume of the sump and effectively traps foreign metal impurities. The value of the magnetic induction of the field  $B$  is proportional to the square of the distance from the investigated point to the pole of the electromagnet  $H_0$ . At a distance of 300 mm and further, the magnetic force has almost no effect on the particle, so the height of the sump should be less. The lowest magnetic induction is observed in the middle of the coil. A decrease in the current in the winding entails a reduction in the length of the floccule; magnetic coagulation takes place when the concentration of particles in the coolant is more than 0.3 g/l, with a lower content, it is not observed due to significant distances between the particles; the effect of coagulation is noted in the entire area of action of the magnetic field, while the length of the flocules decreases with a decrease in concentration. The distance at which the effect of coagulation between particles is observed is determined by a complex function that depends on the current in the winding, the field strength, their distance from the pole of the electromagnet, and also on the size of the particles.

**Key words:** magnetic sump, magnetic field, coagulation, magnetic field strength, impurities, cleaning.

**References**

1. Tarleton, E.S. Wakeman R.J. Solid-Liquid Separation: Equipment Selection and Process. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. P. 465.

2. Methods for increasing the resistance of taps. [Metody povysheniya stoykosti metchikov]. / I.Yu. Ignatkin, S.K. Fedorov, A.V. Shehedrin and others. // *Vestnik NGIEI. – The Herald of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University*. 2019. № 11 (102). P. 57-66.

3. Classification of technologies for hardening, coating and restoration of parts of fuel equipment for diesel engines. [Klassifikatsiya tekhnologiy uprochneniya, naneseniya pokrytiy i vosstanovleniya detaley toplivnoy apparatury dizelnykh dvigateley]. / S.N. Sharifullin, N.R. Adigamov, P.A. Topolyanskiy and others. // *Vestnik Kazanskogo GAU. – The Herald of Kazan State Agrarian University..* 2019. T. 14. № 3. P. 128-132.

4. Avdeev B., Vyngra A., Bordiug A. Testing the efficiency of abrasive treatment of reconditioned parts using coolant cleaning in a magnetic sump. // MATEC Web of Conferences. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019", 2019. Vol. 298. P. 00115.

5. Masyutkin D.E., Sorokoletov P.V. *Ispolzovanie magnitnogo polya dlya povysheniya effektivnosti ochistki vyazkikh sred.* // *Novaya nauka: Strategiya i vektory razvitiya. v 3 ch.* [Using a magnetic field to improve the efficiency of cleaning viscous media. // *New Science: strategy and development vectors, in 3 parts*]. Sterlitamak: AMI, 2016. Ch.2. P. 212-218.

6. *Povyshenie resursa tekhnicheskikh sistem putem ispolzovaniya elektricheskikh i magnitnykh poley: monografiya.* [Increasing the resource of technical systems by using electric and magnetic fields: monograph]. / E.E. Aleksandrov, I.A. Kravets, E.N. Lysikov and others. Kharkov: NTU "KhPI". 2006. P. 544.

7. Investigation of the orientation of flocules in magnetic sump during cleaning of cooling lubricants / B. A. Avdeyev, V. B. Masyagin, R. R. Dema, et al. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 2018. № 1050. P. 012005.

8. Korobochka A.N., Tikhontsov A.M., Brylev E.A. *Ochistka tekhnologicheskikh sred pri obrabotke metallov rezaniem.* [Cleaning of technological media during metal cutting]. Voronezh: Voronezhskiy gos. un-t, 1992. P. 127.

9. Budnik V., Chernyi S. Future development of the world ocean mining for the industry. // *Procedia Engineering*. 2016. vol. 150. P. 2150-2156.

10. Features of the formation of aerodispersed systems when using coolant at machine-building enterprises. [Osobennosti obrazovaniya aerodispersnykh sistem pri ispolzovanii SOZh na mashinostroitelnykh predpriyatiyakh]. / P.A. Melnikov, N.M. Bobrovskiy, A.N. Popov and others. // *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta. - Vector of science of Tolyatti State University*. 2011. № 3. P. 87–91.

11. Avdeyev B., Prosvirnin V., Dema R. Calculation of magnetic devices cleaning coolants in the agro–industrial complex // MATEC Web of Conferences. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018". 2018. Vol. 224. P. 05003.

12. Dyakonov O.M. Shlamy metallobratyvyayushchego proizvodstva. Chast 2. Fiziko-mekhanicheskie svoystva. [Sludge from the metalworking industry. Part 2. Physical and mechanical properties. *Lite i metallurgiya. - Casting and metallurgy*. 2010. № 4. P. 272–277.

13. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. *Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов.* [Tribology. Physical foundations, mechanics and technical applications: a textbook for universities]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2000. P. 268.

**Authors:**

Masyutkin Evgeniy Petrovich – Ph.D. of Technical sciences, rector; e-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Avdeev Boris Aleksandrovich – Ph.D. of Technical sciences, associate professor of Ship electrical equipment and production automation Department; e-mail: dirigeant@mail.ru

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia

**Acknowledgements.** Information about the source of funding. The article was prepared with the financial support of the State Council of the Republic of Crimea by young scientists of the Republic of Crimea.