



ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕЖПОЛЮСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ СЕПАРАТОРА УМС-4М

А. А. ЕВДОКИМОВ,

аспирант, Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т. С. Мальцева
(641300, Курганская обл., Кетовский р-н, с. Лесниково),

В. И. ЧАРЫКОВ,

доктор технических наук, профессор, Курганский государственный университет
(640669, г. Курган, ул. Гоголя, д. 25)

Ключевые слова: электромагнитный сепаратор, магнитная индукция, магнитная сила, концентратор, металломагнитная частица, рабочая зона, зависимость.

Разработка и создание ресурсосберегающих машин и технологий для очистки смазочно-охлаждающих жидкостей на сегодняшний день является одной из главных задач. По результатам анализа существующих конструкций в Курганской ГСХА разработан электромагнитный сепаратор УМС-4М, предназначенный для очистки жидких материалов от металломагнитных включений. Отличительной особенностью данной установки является то, что для извлечения металломагнитных частиц используются концентраторы магнитного поля, позволяющие создать высокоградиентное неоднородное магнитное поле. Зона сепарации расположена в замкнутом контуре, работающем на постоянном токе. Для расчетного определения магнитной индукции в межполюсном пространстве сепаратора применяется метод наименьших квадратов. Экспериментальное значение индукции магнитного поля определялось путем измерения в межполюсном пространстве сепаратора миллитесламетром ТП2-2У. Значение индукции магнитного поля без концентратора $B_{\max} = 130$ мТл, $B_{\min} = 42$ мТл; с концентратором $B_{\max} = 130$ мТл, $B_{\min} = 94$ мТл. Анализ распределения индукции магнитного поля в межполюсном зазоре сепаратора показывает, что использование концентратора магнитного поля увеличивает индукцию магнитного поля на 57 %. Проведенные исследования показали, что максимальное значение магнитной индукции располагается возле полюсных наконечников, а концентратор магнитного поля позволяет распределять магнитную индукцию не только по длине рабочего канала (желоба), но и по высоте. На основе результатов работы разработан электромагнитный сепаратор УМС-4М для очистки СОЖ, который принят в эксплуатацию на сельхозпредприятии «Крестьянское хозяйство» Узункольского района Костанайской области Республики Казахстан и машиностроительном предприятии ООО «Курганский метизный завод» «СИБМАШ» г. Курган.

THE ANALYSIS OF THE MAGNETIC FIELD INDUCTION DISTRIBUTION IN THE INTERPOLAR AREA OF THE UMS-4M SEPARATOR

A. A. EVDOKIMOV,

graduate student, Kurgan State Agricultural Academy of T. S. Maltsev

(641300, Kurgan reg., Ketovskii dist., Lesnikovo),

V. I. CHARYKOV,

doctor of technical sciences, professor, Kurgan State University

(25 Gogolya Str., 640669, Kurgan)

Keywords: electromagnetic separator, magnetic induction, magnetic force, hub / concentrator, mechanical part, work area, dependence.

The design and creation of the resource-saving machines and technologies for cleaning the coolants is one of the main tasks today. In the Kurgan State Agricultural Academy through the analysis of the existing constructions there was developed an UMS-4M electromagnetic separator which was designed for the purification of the liquid materials from the metal-magnetic inclusions. A distinctive feature of this installation is the usage of the magnetic field concentrators to extract the metallomagnetic particles which allows creating high-gradient inhomogeneous magnetic field. The separation zone is located in a closed contour that runs on direct current. The method of the least squares is applied for the calculation of the magnetic induction in the interpolar space of the separator. The experimental value of the magnetic field induction was determined by measuring it in the interpolar space of the separator using the milliteslametr TP2-2U. The experimental values of the magnetic field induction without a concentrator are $B_{\max} = 130$ mTl, $B_{\min} = 42$ mTl; with a concentrator $B_{\max} = 130$ mTl, $B_{\min} = 94$ mTl. The calculated values of the magnetic field induction without a concentrator are $B_{\max} = 130$ mTl, $B_{\min} = 42.86222$ mTl; with a concentrator $B_{\max} = 130$ mTl, $B_{\min} = 93.29312$ mTl. The analysis of the distribution of the magnetic field induction in the interpolar gap of the separator shows that using the magnetic field hub helps the magnetic induction to increase by 57 %. The studies which were carried out have shown that the maximum value of the magnetic induction is located near the pole tips and the magnetic field concentrator can distribute the magnetic induction not only along the length of the working channel (gutter), but also along the height of it. As the result of the work the electromagnetic separator UMS-4M was developed for the purification of the coolants. It was put into running exploitation at the agricultural enterprise farm ("Krestyanskoye Khozyaistvo") Uzunkol District, Kostanai region, Kazakhstan Republic and at the Ltd. (LLC) engineering company "Kurgan Hardware Plant" "SibMash" Kurgan.

Положительная рецензия предоставлена И. В. Черных доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой Уральского федерального университета.



Возрастающие требования к точности изготовления и ремонта деталей выдвигают на первый план проблему рационального применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), которые являются одним из главных факторов увеличения производительности и обеспечения высокого качества продукции [1].

Незначительная часть применяемых СОЖ (10–20 %) в процессе эксплуатации безвозвратно теряется на испарение, унос, проливы и утечки. Основная же их часть (80–90 %) в условиях эксплуатации претерпевает сложные физико-химические (термические, окислительные и т. д.) изменения состава и свойств: от простого загрязнения внешними примесями и внутренними продуктами износа до глубоких химических превращений, приводящих, в конечном итоге, к ухудшению эксплуатационных свойств [2].

Загрязненная СОЖ приводит к резкому снижению производительности труда и эксплуатационных свойств деталей станков, к неисправимому браку изделий из-за возникновения трещин, царапин, сколов и даже разрушения металла.

Существующие способы и методы очистки СОЖ весьма энергоемки, требуют сложных и дорогостоящих установок, кроме того имеют низкую производительность и не позволяют получить высокую степень очистки от металломагнитных частиц.

Наиболее перспективным способом очистки СОЖ является сепарирование, недостатки которого — низкое качество от малых металломагнитных частиц из-за конструктивного исполнения концентраторов магнитного поля не позволяющих очищать СОЖ в пределах всего рабочего канала.

На основании существующих проблем очистки СОЖ и с целью повышения качества сепарации в лаборатории кафедры «Электрификации и автоматизации сельского хозяйства» Курганской ГСХА была разработана и изготовлена экспериментальная установка электромагнитного сепаратора УМС-4М (рис. 1) [3, 4]. Отличительной особенностью данной установки является то, что для извлечения метал-

ломагнитных частиц используются концентраторы магнитного поля (рис. 2), имеющие различные параметры. Зона сепарации расположена в замкнутом контуре, работающем на постоянном токе.

Электромагнитный сепаратор состоит из основания и опорных стоек, на которых установлена наклонная магнитная система, меняющая угол наклона от 0 до 45°, содержащая общий концентратор магнитного поля 1 (рис. 2), несколько П-образных магнитопроводов. На нижней части рабочего канала (желоба) 2 выполненного из немагнитного материала (нержавеющая сталь, композитный материал и др.), закреплены полюсные наконечники 3 выполненные в форме зигзага на верхней поверхности, разделенные немагнитными вставками 4. Полюсные наконечники 3 позволяют создать неоднородное магнитное поле с направленной магнитной силой. На полюсном наконечнике 3 закреплены сердечники 5, на которых расположены намагничивающие катушки 6. Магнитный поток замыкается концентратором магнитного поля 1. В верхней части электромагнитного сепаратора располагается загрузочное устройство 7, а в нижней части приемник 8. В рабочем канале располагается концентратор магнитного поля 1, геометрическая форма которого соответствует прямоугольной форме рабочего канала (желоба) 2.

Электромагнитный сепаратор работает следующим образом.

При подаче постоянного напряжения на катушки 6 П-образных электромагнитов, на концентраторе магнитного поля 1, за счет полюсных наконечников 3 создается неоднородное магнитное поле с высоким значением магнитной индукции, и зона сепарации пронизывает по всей длине и ширине рабочего канала (желоба) 2 магнитным потоком. СОЖ подается в зону сепарации и протекает равномерным слоем по концентратору магнитного поля 1. В зоне сепарации механические частицы притягиваются к полюсу в направлении сходимости магнитных силовых линий и оседают на концентраторе магнитного поля 1. Очищенная СОЖ поступает в приемник 8. Очистку концентратора магнитного поля от механических частиц осуществляют путем смывания частиц водой после сепарации. Подачу СОЖ регулировали вентилем, установленным на загрузочном устройстве.

Цель и методика исследований.

Одним из важных и определяющим параметром в конструировании электромагнитных сепараторов является величина индукции магнитного поля в рабочем зазоре сепаратора. Магнитная сила, действующая на металломагнитную частицу, в магнитном поле, находится по формуле [5]:

$$F_i = -\frac{V}{2\mu_0} \times \text{grad} B^2, \quad (1)$$

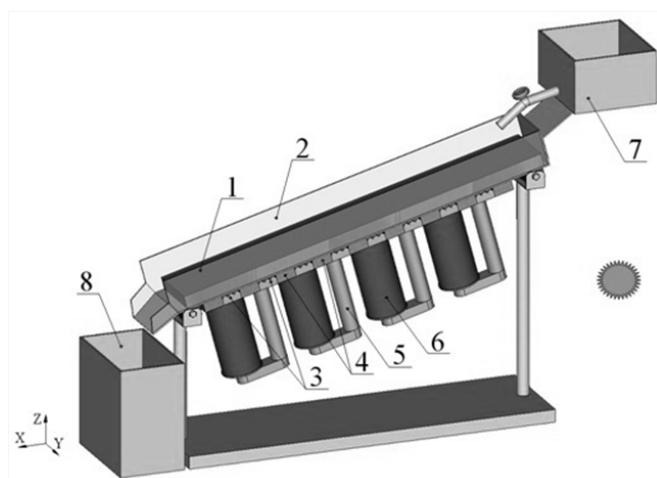


Рисунок 1
Электромагнитный сепаратор УМС-4М: 1 — концентратор магнитного поля; 2 — желоб (лоток); 3 — полюсные наконечники; 4 — немагнитные вставки; 5 — сердечники; 6 — катушки намагничивания; 7 — загрузочное устройство; 8 — приемник

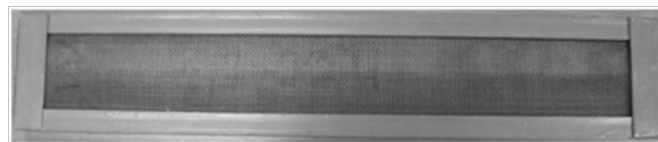


Рисунок 2
Концентратор магнитного поля



где B — магнитная индукция, Тл;
 V — объем частицы, м³;
 μ — относительная магнитная проницаемость среды;
 μ_0 — магнитная проницаемость в вакууме, Гн/м.

Как следует из формулы (1), для определения магнитной силы необходимо знать магнитную индукцию «В» в магнитном поле желоба. Ее можно определить из зависимости [5]:

$$B = B_{\max} e^{\frac{d_i}{d_n}}, \quad (2)$$

где $B_{\max}$ — максимальное значение магнитной индукции, Тл;

d_i — расстояние точки измерения магнитной индукции от активного полюса, м;

d_n — эмпирический коэффициент, м.

В выражении (2) неизвестной величиной является коэффициент d_n .

Определим его с помощью метода наименьших квадратов [6], для чего преобразуем выражение (2) путем переноса $B_{\max}$ в левую часть.

Обозначив $\frac{B_i}{B_{\max}} = x_i, \frac{1}{d_n} = a$, получим уравнение:

$$x = e^{-ay}. \quad (3)$$

Чтобы найти коэффициент a , прологарифмируем выражение (3):

$$\ln x = -ay. \quad (4)$$

Введя новую переменную $\ln x = z$ получаем уравнение прямой:

$$z = -ay. \quad (5)$$

Для нахождения величины коэффициента a по методу наименьших квадратов нужно, чтобы сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений z_i от вычисленных по эмпирической зависимости от $z = -ay_i$ была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n [z_i + ay_i]^2 = \min. \quad (6)$$

В ходе эксперимента измерения магнитной индукции «В» в рабочей зоне проводились миллитесламетром типа ТП2-2У (рис. 3), который предназначен для измерения магнитной индукции постоянных и переменных магнитных полей, а также однократных импульсов магнитного поля в диапазоне 0,1...1999 мТл [7].

Измерения магнитной индукции в рабочей зоне проводились с концентратором магнитного поля и без него с интервалом через 2,5 мм, в положениях переключателя прибора в пределах измерения 200 мТл.

Положение зонда прибора в межполюсном зазоре фиксируется при помощи специального штатива с микрометрическим приспособлением (рис. 4).

В подвижном гнезде 1 этого приспособления закрепляется держатель датчика. Подвижное гнездо 1 перемещается в рамке 2 микрометрическим винтом 3. Величина перемещения гнезда с датчиком фиксируется по линейной миллиметровой шкале 4.

Результаты исследований.

Магнитная индукция «В» в межполюсном пространстве электромагнитного сепаратора изменяется по экспоненциальному закону (2).

Для определения магнитной силы F_M необходимо сначала определить магнитную индукцию «В». Для этого воспользуемся табл. 1, в которой экспериментально определена зависимость магнитной индукции с концентратором магнитного поля и без концентратора магнитного поля.

После обработки данных в табл. 1 по методу наименьших квадратов получим следующее значение величины коэффициента a .



Рисунок 3
Миллитесламетр портативный универсальный ТП2-2У

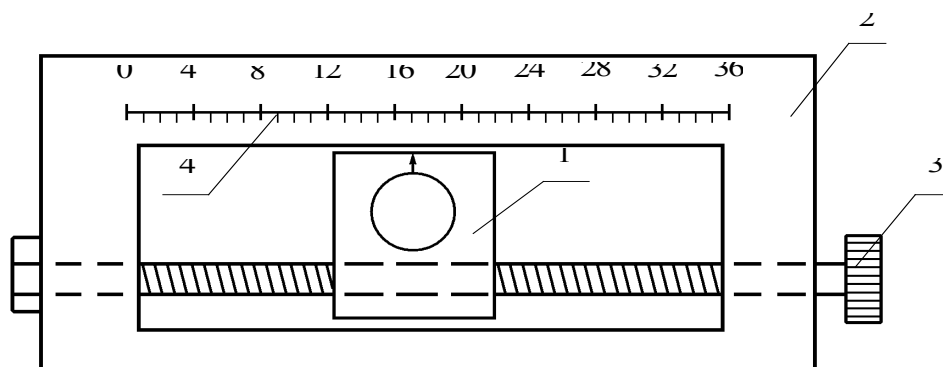


Рисунок 4
Рамка для держателя датчика измерения магнитной индукции



Таблица 1
Результаты измерений магнитной индукции при $U = 220$ В

С концентратором магнитного поля									
d_i , мм	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
B_i , мТл	130	119	112	106	102	98	96	95	94
Без концентратора магнитного поля									
d_i , мм	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
B_i , мТл	130	79	67	60	56	52	48	45	42

Таблица 2
Расчетное значение магнитной индукции

y_i	$e^{\frac{d_i}{d_n}}$	B_i	$B_{\text{экс}}$
С концентратором магнитного поля			
0	1	130	130
2,5	0,942521598	122,5278	119
5	0,891297396	115,8687	112
7,5	0,844220365	109,7486	106
10	0,804220365	104,5486	102
12,5	0,764104887	99,33364	98
15	0,74687684	97,09399	96
17,5	0,721416322	93,78412	95
20	0,717639412	93,29312	94
Без концентратора магнитного поля			
0	1	130	130
2,5	0,845223365	101,879	79
5	0,714402537	84,872	67
7,5	0,603829717	70,497	60
10	0,510370985	59,865	56
12,5	0,431377482	53,079	52
15	0,364610327	48,943	48
17,5	0,308177167	45,865	45
20	0,260478543	42,86222	42

С концентратором магнитного поля:

$$a = -\frac{\sum_{i=1}^9 y_i z_i}{\sum_{i=1}^9 y_i^2} = -\frac{24,97622}{1275} = 0,01958919,$$

следовательно, искомый коэффициент

$$d_n = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,018} = 51,048 \text{ мм}$$

Без концентратора магнитного поля:

$$a = -\frac{\sum_{i=1}^9 y_i z_i}{\sum_{i=1}^9 y_i^2} = -\frac{86,3414}{1275} = 0,06771874,$$

следовательно, искомый коэффициент

$$d_n = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,06771874} = 14,7669611 \text{ мм}$$

Определим расчетным путем значения магнитной индукции по формуле (2) и сравним их с экспериментальными данными. Для этого составим табл. 2 расчетных значений магнитной индукции.

По полученным данным (табл. 2) построим зависимости индукции магнитного поля от расстояния до полюсного наконечника на оси межполюсного пространства электромагнитного сепаратора УМС-4М.

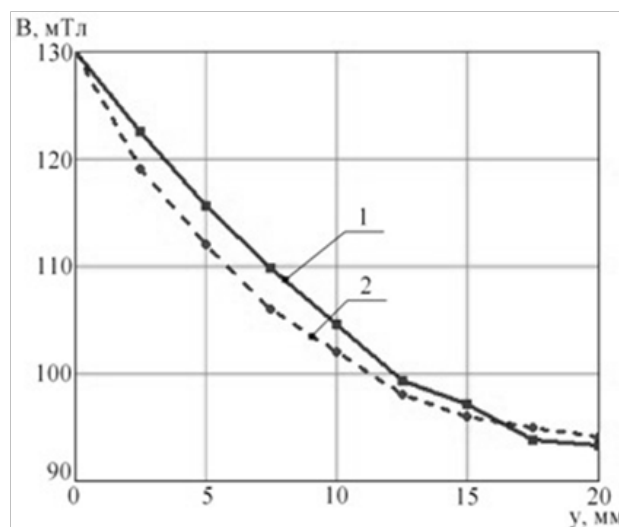


Рисунок 5
Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до полюсного наконечника на оси межполюсного пространства с концентратором магнитного поля: 1 — теоретическая (расчетная); 2 — экспериментальная

Анализ распределения индукции магнитного поля в межполюсном зазоре сепаратора (рис. 5 и 6) показывает, что при использовании концентратора магнитного поля, увеличивает индукцию магнитного поля на 57 %.

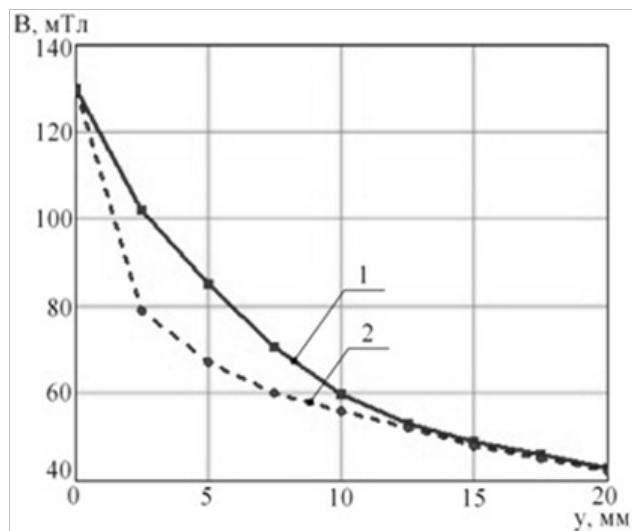


Рисунок 6

Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до полюсного наконечника на оси межполюсного пространства без концентратора магнитного поля: 1 — теоретическая (расчетная); 2 — экспериментальная

Сопоставление теоретических (1) и экспериментальных (2) зависимостей показало, что их расхождение не превышает 10 %, при погрешности измерений не более 5 %, что позволяет использовать полученные данные в практических расчетах и считать их адекватно отражающими физические процессы.

Выводы. Рекомендации.

1. Проведенные исследования показали, что максимальное значение магнитной индукции располагается возле полюсных наконечников, а концентратор магнитного поля позволяет распределять магнитную индукцию не только по длине рабочего канала (желоба), но и по высоте.

Литература

- Евдокимов А. А., Чарыков В. И. Очистка смазочно-охлаждающих жидкостей на машинно-технологических станциях электромагнитным сепаратором // Достижение науки — агропромышленному производству : материалы ЛП Международ. науч.-техн. конф. Челябинск : ЧГАА, 2013. С. 253–256.
- Черножуков Н. И., Крейн С. Э., Лосиков Б. В. Химия минеральных масел. М. : Гостоптехиздат, 1959. 416 с.
- Зуев В. С., Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Митюнин А. А., Копытин И. И. Электромагнитный сепаратор : пат. № 2516608 РФ; заявл. 06.11.2012; опубл. 20.05.2014. Бюл. № 14.
- Зуев В. С., Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Митюнин А. А., Копытин И. И. Установка электромагнитной сепарации : пат. № 132740 РФ; заявл. 06.11.2012; опубл. 27.09.2013. Бюл. № 27.
- Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Соколов С. А. Теоретический анализ работы электромагнитного сепаратора УМС-4М // Вестник Ульяновской ГСХА. 2014. № 1 (25). С. 146–152.
- Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М., 1958. 334 с.
- Копытин И. И., Евдокимов А. А., Митюнин А. А. Методика измерения электромагнитного поля в рабочих зонах сепараторов на примере работы миллитесламетра // Аграрные регионы : тенденции и механизмы развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Курган : КГСХА, 2012. С. 387–390.

References

- Evdokimov A. A., Tcharykov V. I. The cleaning of the coolants at the machine-technological stations with the help of the electromagnetic separator // Advances in science for the agroindustrial production : materials of the LPI International scientific-engineering conference. Chelyabinsk : CHGAA, 2013. P. 253–256.
- Chernozhukov N. I., Crane S. E., Losikov B. V. Chemistry of the mineral oils. M. : Gostoptekhizdat, 1959. 416 p.
- Zuev V. S., Tcharykov V. I., Evdokimov A. A., Mityunin A. A., Kopytin I. I. Electromagnetic Separator : Patent № 2516608 Russian Federation; appl. 06.11.2012; publ. 20.05.2014. Bull. № 14.
- Zuev V. S., Tcharykov V. I., Evdokimov A. A., Mityunin A. A., Kopytin I. I. Electromagnetic separation installation : Patent № 132740 Russian Federation; appl. 06.11.2012; publ. 27.09.2013. Bull. № 27.
- Tcharykov V. I., Evdokimov A. A., Sokolov S. A. Theoretical analysis of the electromagnetic separator UMS-4M work // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2014. № 1 (25). P. 146–152.
- Linnik U. V. The least square method, and the foundations of the mathematics and statistics theory of the observations processing. M., 1958. 334 p.
- Kopytin I. I., Evdokimov A. A., Mityunin A. A. Methods of measuring the electromagnetic field in the working areas of separators on the example of the milliteslametr work // Agricultural regions : tendencies and mechanisms of the development : materials of the International scientific-practical conference. Kurgan : KGSKHA, 2012. P. 387–390.

Таблица 3
Технические характеристики сепаратора УМС-4М

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Производительность	л/ч	100–120
Напряжение переменного тока, подаваемое на выпрямительное устройство	В	220
Напряжение постоянного тока, подаваемое на катушки намагничивания	В	198
Магнитная индукция на концентраторах	мТл	100–130
Периодичность очистки	ч	2–3
Угол наклона магнитной системы	град (°)	0–45
Масса сепаратора	кг	45

2. На основании проведенных исследований был разработан и изготовлен электромагнитный сепаратор УМС-4М со следующими техническими характеристиками (табл. 3).

3. Результаты исследований позволяют дать рекомендации при инженерных расчетах электромагнитного сепаратора и могут быть использованы при проектировании различных технологических линий на предприятиях.

4. На основе результатов работы разработан электромагнитный сепаратор УМС-4М для очистки СОЖ, который принят в эксплуатацию на сельхозпредприятии «Крестьянское хозяйство» Узункольского района Костанайской области Республики Казахстан и машиностроительном предприятии ООО «Курганский метизный завод» «СИБМАШ» г. Курган.