

**ВЛИЯНИЕ КАДМИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КАТОДНОЙ МЕДИ МАРКИ М00****<sup>1</sup>М.Б. Акрамов, <sup>1</sup>С. Зубайдов, <sup>1</sup>А.С. Кодиров, <sup>2</sup>Х.О. Норкулов, <sup>2</sup>Дж.М. Анваров**<sup>1</sup> Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ,<sup>2</sup> Душанбинский филиал НИТУ МИСиС

В статье приведены результаты исследования изменений электрических характеристик катодной меди легированной кадмием. Определено уменьшение электропроводности легированных образцов по сравнению с электропроводностью чистой меди. Повышение температуры сопровождается увеличением удельного электрического сопротивления образцов меди легированной кадмием от 0 до 1,25%. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость коэффициента удельного электрического сопротивления легированных образцов меди с кадмием. Результаты можно применить в производстве электротехнических материалов на основе меди.

**Ключевые слова:** медь, модификация, электропроводность, модель, уравнения регрессии.

**ТАЪСИРИ КАДМИЙ БА ЧАРАЁНГУЗАРОНИИ МИСИ КАТОДИИ НАВЪИ М00****М.Б. Акрамов, С. Зубайдов, А.С. Қодиров, Х.О. Норқулов, Ҷ.М. Анваров**

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқи тағйирёбии хусусиятҳои электрикии миси катодӣ бо кадмий оварда шудааст. Чараёнгузаронии намунаҳо нисбат ба чараёнгузаронии миси тоза коҳиш меёбад. Бо баландшавии ҳарорати намунаҳо муқовимати ҳоси электрикии намунаҳои кадмий ҳамоҳанг (аз 0 то 1,25%) меафзояд. Дар натиҷа полиномияҳои ба даст оварда шудаанд, ки чараёнгузаронии намунаҳоро вобаста аз ҳарорат тавсиф мекунанд. Натиҷаҳои ба дастомадари дар истеҳсоли маводҳои электротехникии дар асоси мис истифода бурдан мумкин аст.

**Калимаҳои калидӣ:** мис, тағйирдиҳӣ, электргузари, модел, муодилаҳои регрессионӣ.

**THE EFFECT OF CADMIUM ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CATHODE COPPER GRADE M00****M.B. Akramov, C. Zubaydov, A.S. Kodirov, X.O. Norkulov, J.M. Anvarov**

The article presents the results of a study on changes in the electrical properties of cathode copper alloyed with cadmium. As the temperature of the samples increases, the electrical resistivity of copper with cadmium (0–1.25%) also increases. Based on the experimental data, polynomial equations were obtained that describe the dependence of electrical conductivity on temperature. The results can be applied in the production of copper-based electrical materials.

**Keywords:** copper, modification, electrical conductivity, model, regression equations.

**Введение**

Изучено влияния кадмия на электрические свойства меди. Кроме серебра, цинка и кадмия металлы в составе меди как примеси уменьшает его электропроводность в несколько раз, в случае добавления кадмия в медь, электропроводность меди уменьшается всего на несколько процентов. Добавление в медь 0,5% кадмия снижает ее электропроводность всего на 2 %. Поэтому, нами как легирующий элемент выбран кадмий. В работе приведены результаты изменений удельного электрического сопротивления экспериментально легированных образцов, уменьшения электропроводности образцов по сравнению с электропроводностью чистой катодной меди и температурная зависимость удельного электрического сопротивления образца легированной кадмием (0,1%). Построены математические модели зависимостей и определены эмпирические уравнения, которые необходимы металлургам медно-кадмиевых сплавов для производства электротехнических материалов на основе меди.

Материалы, применяемые в электротехнике, должны обладать: высокой электропроводностью и теплопроводностью; высокой стойкостью против коррозии и образования защитных плёнок, хорошей дугостойкостью и термостойкостью. При производстве такой марки плавка ведется в защитной среде без доступа воздуха и используются чистые сырьевые материалы. В перечисленных условиях полученная медь на основе содержания не менее 99, 95 % меди. Электрическая проводимость такой меди согласно установленной Международной электротехнической комиссией IEC (International Electrotechnical Commission) электрическое сопротивление такой меди равно 0,017241 Ом мм<sup>2</sup> на метр [1, 2].

В работах В.З. Кисунько [3] и А.В. Сулицина [4] приводятся результаты эксперимента, где перегрев расплава и последующее его быстрое охлаждение способствуют улучшению структуры. Разные элементы в качестве примесей снижают электропроводность меди.

Обобщенные данные по некоторым элементам, где уменьшается электропроводность меди приведены на рисунке 1.

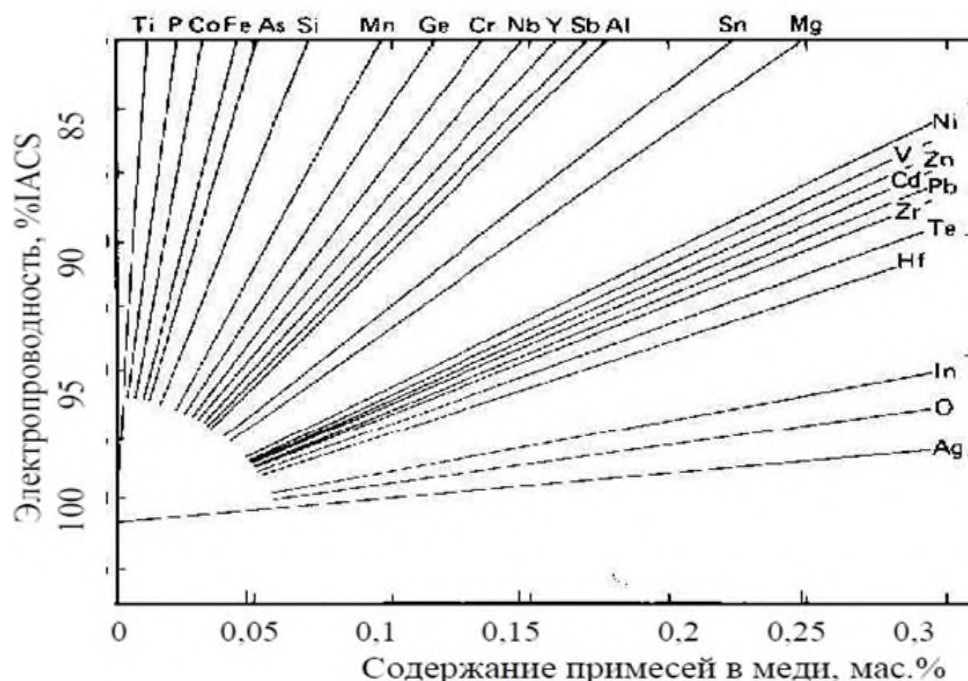


Рисунок 1 – Зависимость электропроводности меди от содержания примесей и их концентрации в основе

Изучив литературные данные, поставили задачу: «Исследования электрических свойств модифицировано-легированных сплавов меди с кадмием». В работе приведены результаты исследования изменения электрических характеристик образцов сплавов меди модифицировано-легированных с кадмием.

### Материалы методы исследования

Исследования проводились в лабораториях КЭЗ ОАО «Алюминий Казахстан» (КЭЗ – Казахстанский Электролизный завод) и в лабораториях металлургии МИСИС Душанбе. Методы получения модифицировано-легированных сплавов подробно приведены в наших предыдущих статьях [5, 6]. Всего нами отлиты 9 штук цилиндрических образцов сплавов меди диаметрами 7мм, где концентрация кадмия варьируются от 0,05 до 1,25 %. А также использовали лигатуры Cu-Cd с содержанием кадмия 0,8–1,5 масс. %. После волочение полученных образцов для анализов подготовлены 9 экспериментальных образцов с диаметрами в 1мм и длиной 1,3 – 1,5 метров. В качестве нулевого образца использовали медь катодную марки М00.

Измерение электрического сопротивления проводилась с применением электрического моста и мультиметра UT -72 В с программным обеспечением. После измерения рассчитано удельное электрическое сопротивление образцов.

### Результаты и обсуждения

С увеличением концентрации кадмия, УЭС (удельное электрическое сопротивление) образцов увеличивается. В таблице 1 приведено изменение УЭС полученных образцов медных сплавов модифицированно-легированные кадмием.

Таблица 1 – УЭС образцов медных сплавов модифицированно-легированных кадмием в зависимости от концентрации кадмия

Cd%	0	0,05	0,15	0,3	0,6	0,8	1,05	1,15	1,2	1,25
УЭС, Ом м	18	18,9	19,8	20,88	21,61	21,81	21,87	22,86	24,01	24,86

Применяя полученные данные построили график зависимости УЭС (нОм м) от концентрации модифицирующе - легирующего элемента кадмия. На рис.2. приведена зависимость УЭС от концентрации кадмия при комнатной температуре. Разработана математическая модель зависимости (Сплошная кривая).

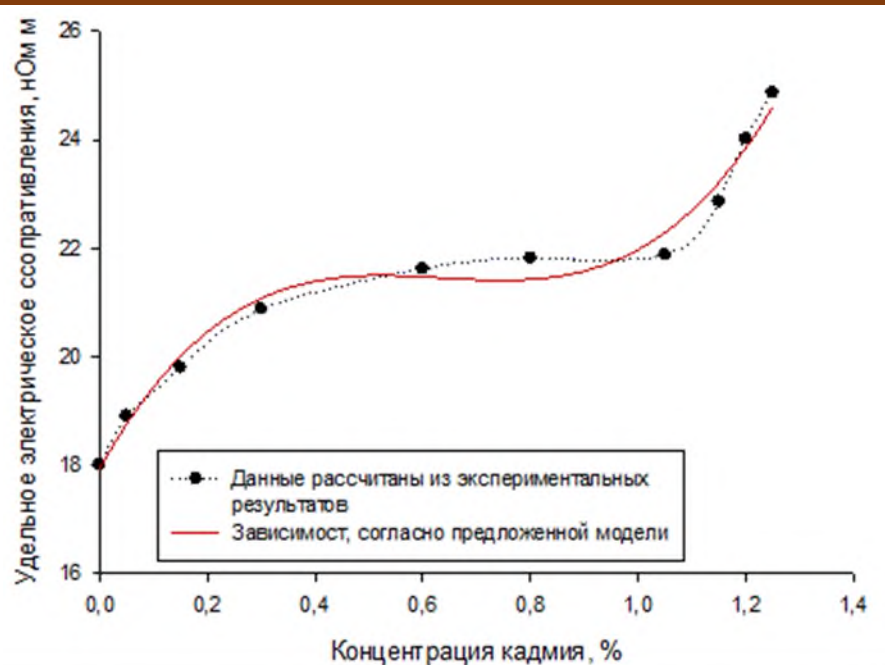


Рисунок 2 – Зависимость УЭС от концентрации кадмия при комнатной температуре. Сплошная кривая соответствует расчётным значениям согласно модели

Для определения доли влияния кадмия на электропроводность меди построен график зависимости электропроводности экспериментальных образцов относительно электропроводности меди марки М00. Разработана математическая модель зависимости в виде гиперболической кривой и определены коэффициенты уравнения модели (рис. 3.).

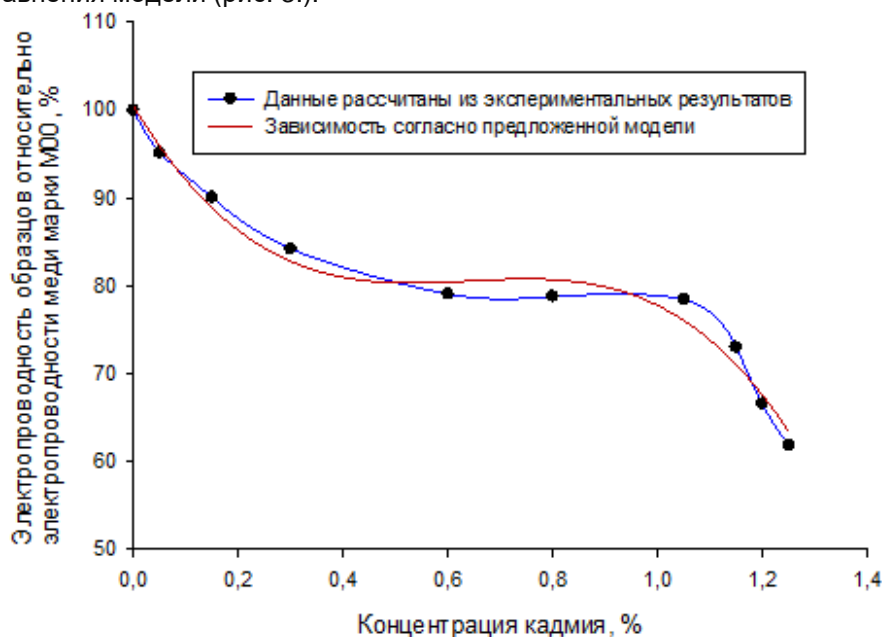


Рисунок 3 – Зависимость электропроводности экспериментальных образцов относительно электропроводности меди марки М00 от концентрации кадмия, %

Многие проводники из модифицированного кадмия эксплуатируются в условиях повышенной температуры, например, провода троллейбусов. Для выяснения температуры на электрические свойства модифицированной меди нами измерено электрическое сопротивление образца легированный 1,0 % - ним кадмием и рассчитано увеличение УЭС от повышения температуры (рис. 4). Кривая разработанной математической модели приведена сплошной кривой.

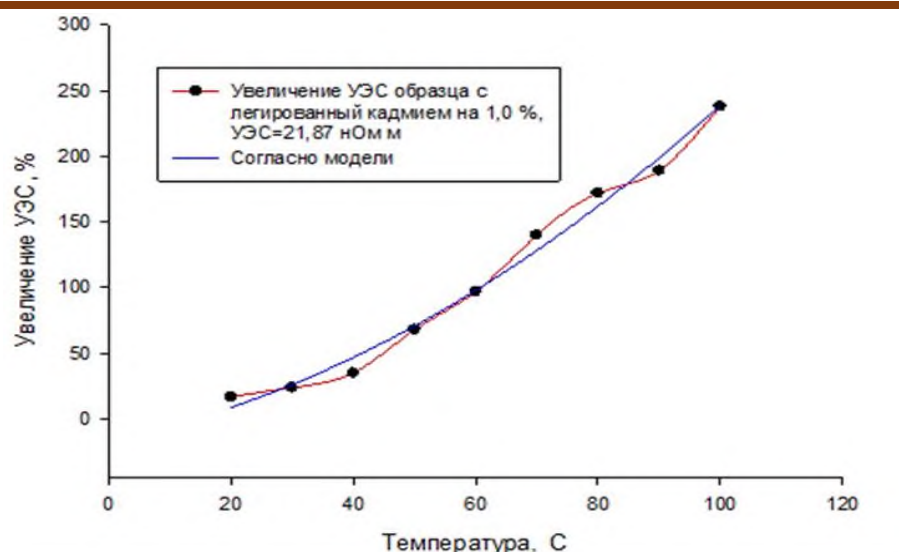


Рисунок 4 – УЭС экспериментального образца меди модифицированного кадмием от температуры. Концентрация кадмия 1,0%

Результаты эксперимента и расчетов показывают, что с увеличением температуры, УЭС образцов также увеличивается. Величина увеличения УЭС и уменьшение электропроводности зависят от концентрации кадмия.

Некоторыми авторами в журналах «Материаловедение» и «Электрохимия», изменения электропроводности меди связывают с изменением его структурных составляющих [7 - 9]. Можно встретить работы, где изучены свойства меди с кобальтом и влияние растворов на характеристики меди [10 - 11]. Работы, посвященные изучению сплавов меди модифицировано-легированных кадмием очень мало.

Согласно диаграмме состояния Cd – Cu в двойных системах могут образоваться до четырех химических соединений:  $\text{Cu}_2\text{Cd}$ ,  $\text{Cu}_4\text{Cd}_3$ ,  $\text{Cu}_5\text{Cd}_8$ ,  $\text{CuCd}_3$  (Рис. 5). Химическое соединение  $\text{Cu}_5\text{Cd}_8$  образуется при температуре 563 °С. Другие соединения ( $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ) образуются по перитектическим реакциям соответственно при температурах 549, 547 и 314 °С. Эвтектика наблюдается при 544 и 314 °С и концентрациях кадмия 47,3 и 97,9 % (ат). Растворимость кадмия составляет 2,56% при 650°C и 0,33% при 1055 °С и 0,26% при 300 °С.

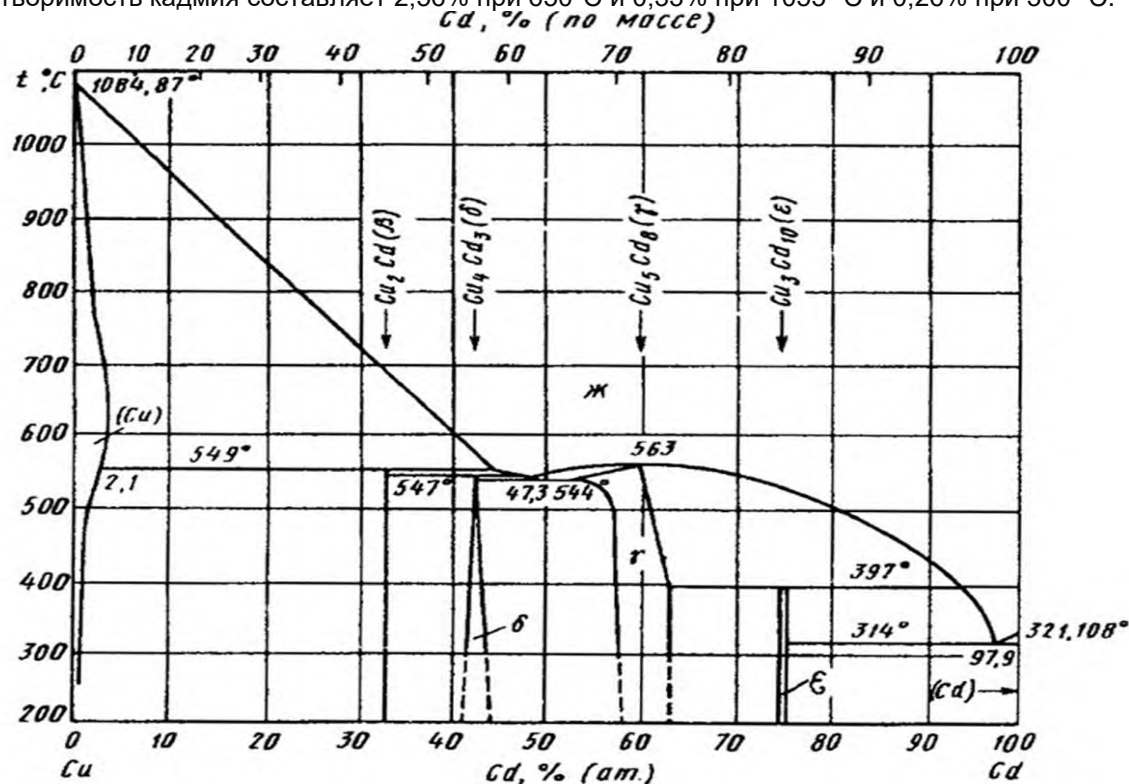


Рисунок 5 – Диаграмма состояния кадмий-медь

Используя полученные графики и программу «Сигма плот» нами построены математические модели зависимостей которые приведены в Таблице 2.

Таблица 2 - Математические модели зависимостей и их коэффициенты

№ пп	Наименование зависимостей	Уравнения математической модели	Коэффициент регрессии, R	Вид зависимостей
1	Зависимость УЭС образцов от концентрации кадмия	$\rho = 17,94 + 17,74 n - 28,83 n^2 + 15,12 n^3$	0,992	Гиперболическая
2	Зависимость электропроводности экспериментальных образцов относительно электропроводности меди от концентрации кадмия, %.	$\sigma = 100,47 - 99,55 n + 160,55 n^2 - 83,72 n^3$	0,991	Гиперболическая
3	Зависимость УЭС экспериментального образца меди легированного кадмием от температуры. Концентрация кадмия 1,0%.	$\rho = - 16,02 + 0,93 n + 0,016 n^2$	0,995	Параболическая

Анализируя полученные данные можно предполагать, что при малых количествах кадмия удельное электрическое сопротивление меди возрастет пропорционально увеличению количества атомов. Медь при плавке в воздухе образует оксидные и сульфидные пленки. При кристаллизации образовавшиеся оксиды выделяются в виде образований  $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ , которые образуют сетку по границам зерен меди, которые снижают его пластические характеристики.

Кроме того, введение кадмия в расплав меди снижает межфазное натяжение на границе зародышевой фазы – кристаллизующийся расплав, уменьшает размер критического зародыша, увеличивает количество центров кристаллизации и способствует получению мелкозернистой структуры в твердом растворе.

## Заключение

Анализ результатов эксперимента и расчётных значений электропроводности показывает, что модифицировано-легированные сплавы меди кадмием также снижают её электропроводность, но в меньшей степени по сравнению с другими элементами. В связи с этим кадмий можно рекомендовать в качестве модифицирующего и легирующего компонента при производстве электротехнических материалов на основе меди.

*Рецензент: Носиров Н.К. — д.т.н., главный научный сотрудник Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии.*

## Литература

1. Quinet M. Influence of organic additives on the initial stages of copper electrodeposition on polycrystalline platinum / M. Quinet, F. Lallemand, L. Ricq and others // *Electrochimica Acta*. – 2009. – Vol. 54. – P. 1529-1536. 11. Donepudi, V.S.
2. Suarez D.F. Nodulation of electrodeposited copper in the presence of thiourea / D.F. Suarez, F.A. Olson // *J. App. Electrochem.* – 1992. – Vol. 22. – P. 1002-1010. 9. Holzle, M.H. Copper deposition onto Au (111) in the presence of thiourea / M.H. Holzle, C.W. Apsel, T. Will, D.M. Kolb // *J. Electrochem. Soc.* – 1995. – Vol. 142. – P. 3741. 131
3. Кисунько В.З. Термоскоростное модифицирование алюминиевых расплавов / В. З. Кисунько И.А. Новохватский, А.И. Погорелов и др. // *изв. АН СССР. Металлы*. –1980. – № 1. –С. 128–130.
4. Сулицин А.В. Теоретические и технологические основы производства литых заготовок из электротехнической меди: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.04 / Сулицин Андрей Владимирович. – Екатеринбург, 2017. – 311 с
5. Миров И.О. Влияние кремния и легирования на механические свойства сплавов алюминия системы // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. -2023.- Вып. № 2 (62). - С. 87 - 94.
6. Миров И.О., Содатдинов Ш.С., Акрамов М.Б. Рентгеноспектральный анализ образцов до эвтектических сплавов алюминия системы Al-Si-Me.- /Миров И.О., Содатдинов Ш.С., Акрамов М.Б. // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. -2022.- Вып. № 4 (60). - С. 76-80.
7. Yusoff M. Mechanical alloying and sintering of nanostructured tungsten carbide-reinforced copper composite and its characterization / M. Yusoff, R. Othman, Z. Hussain // *Materials and Design*. – 2011. – № 32. – P. 3293–3298.



8. Holzle M.H. Copper deposition onto Au(111) in the presence of thiourea / M.H. Holzle, C.W. Apsel, T. Will, D.M. Kolb // J. Electrochem. Soc. – 1995. – Vol. 142. – P. 3741. 131

9. Donepudi V.S. Electrodeposition of copper from sulfate electrolytes: effects of thiourea on resistivity and electrodeposition mechanism of copper / V.S. Donepudi, R. Venkatachalapathy, P.O. Ozemoyah and others // Electrochem. Solid-State Lett. – 2001. – Vol. 4. – P. C13.

10. Fabricius G. Influence of thiourea on the nucleation of copper from acid sulphate solutions / G. Fabricius, K. Kontturi, G. Sundholm // Electrochimica Acta. – 1994. – Vol. 39. – P. 2353-2357.

11. Chassaing E. Effect of organic additives on the electrocrystallization and the magnetoresistance of Cu-Co multilayers / E. Chassaing // J. Electrochem. Soc. – 2001. – Vol. 148. – P. C690-694.

#### МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Акрамов Муҳаммад Бозорович н.и.ф.- м, дотсент	Акрамов Мухаммад Бозорович к.ф.- м.н., доцент	Akramov Muhammad Bozorovich Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor
Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нав АМИТ	Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ	Center for Innovative Development of Science and New Technologies
E-mail: <a href="mailto:akramov60@mail.ru">akramov60@mail.ru</a>		
TJ	RU	EN
Зубайдов Саидахмад Д.и.и.	Зубайдов Саидахмад Д.э.н.	Zubaydov Saidahmad Doctor of Economics,
Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нав АМИТ	Центр инновационного развития науки и новых технологий НАНТ	Center for Innovative Development of Science and New Technologies
E-mail: <a href="mailto:zubaydov57@mail.ru">zubaydov57@mail.ru</a>		
TJ	RU	EN
Қодиров Анвар Саидкулович Д.и.т.	Қодиров Анвар Саидкулович Д.т.н.	Qodirov Anvar Saidkulovich Doctor of Technical Sciences
Директори Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нави АМИТ	Директор Центра инновационного развития науки и новых технологий НАНТ	Director of Center of Innovative Development of Science and New Technologies National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: <a href="mailto:dr.kodirov@mail.ru">dr.kodirov@mail.ru</a>		
TJ	RU	EN
Норкулов Холтура Олимшоевич Муаллими калон	Норкулов Холтура Олимшоевич Старший преподаватель	Norkulov Kholtura Olimshoevich Senior Lecturer
Филиали ДМТТ "МИСИС" дар ш. Душанбе.	Душанбинский филиал Национального исследовательского технологического университета МИСИС в городе Душанбе.	The Dushanbe branch of the National Research Technological University MISaA in Dushanbe.
E-mail: <a href="mailto:hol_norkulov@inbox.ru">hol_norkulov@inbox.ru</a>		
TJ	RU	EN
Анваров Чахонгир Муминҷонович	Анваров Джахонгир Муминджонович	Anvarov Jahongir Muminjonovich
Унвончуи ДМТТ "МИСИС" дар ш. Москва	Соискатель НИТУ «МИСИС» в г. Москва	Applicant at MISaA in Moscow
E-mail: <a href="mailto:jonga.64@bk.ru">jonga.64@bk.ru</a>		