

**Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева
Национальной академии наук Кыргызской Республики**

ISSN 1694-6634

e-mail: MegaCom17@mail.ru

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ФИЗИКА

ИЛИМИЙ ЖУРНАЛЫ

2024, №2

Кыргызстан, г. Бишкек

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ФИЗИКА

Учредитель:

Институт физики им. академика
Ж.Жеенбаева Национальной
академии наук Кыргызской
Республики

Журнал зарегистрирован в
Министерстве юстиции Кыргызской
Республики.

Свидетельство о регистрации №1418
от 13 июня 2008г.

ISSN 1694-6634

Редакционная коллегия:

Главный редактор, д. ф.-м. н.,
член-корр. НАН КР

Зам. главного редактора, д. ф.-м.
н., профессор

Ответственный секретарь,
к. ф.-м. н.

Жеенбаев Н. Ж.

Касмамытов Н. К.

Ласанху К. А.

Члены редколлегии:

А. А. Кутанов

Т. С. Рамазанов

М. М. Кидибаев

Э. М. Мамбетакунов

Б. В. Шульгин

Т. Н. Нурахметов

С. Джуманов

М. Имаев

А. А. Назаров

В. Н. Фоломеев

Р. М. Султаналиева

Н. К. Джаманкызов

Г. Дж. Кабаева

А. Т. Татыбеков

С. Г. Джабаров

В. Ю. Иванов

К. Х. Хайдаров

К. Шаршеев

У. К. Мамытбеков

Г. Ж. Доржуева

Дж. А. Исмаилов

Б. Б. Саякбаева

Б. К. Рахадиллов

Академик НАН КР (Кыргызстан)

Академик НАН РК (Казахстан)

Академик НАН КР (Кыргызстан)

Член-корр. НАН КР (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Казакстан)

д. ф.-м. н., профессор (Узбекистан)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Россия)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

член-корр. НАН КР (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

д. ф.-м. н., профессор (Кыргызстан)

д. т. н. (Кыргызстан)

д. ф.-м. н. (Азербайджан)

к. ф.-м. н. (Россия)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

д. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (Кыргызстан)

к. т. н. (Кыргызстан)

к. ф.-м. н. (техн. секр-рь) (Кыргызстан)

PhD, профессор (Казахстан)

Адрес редакции:

720071, Кыргызская Республика,
г. Бишкек, проспект Чуй, 265-а

Тел.: +(312) 64-62-90

Факс: +(312) 43-11-69, 43-11-71

E-mail: MegaCom17@mail.ru

УДК 666.3.017-65.549.632

НИТРИД КРЕМНИЙ ЛЕГИРОВАННЫЙ КАРБИДОМ КРЕМНИЕМ

Ласанху К. А., Касмамьтов Н. К., Матяш И. В.

Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, 720071, г. Бишкек, проспект Чуй 265-а
e-mail: MegaCom17@mail.ru

Аннотация. В статье описано влияние легирования карбида кремния на физико-химические и физико-механические свойства полученных нитридо-кремниевых керамических материалов после реакционного спекания в электропечи в среде газообразного чистого азота.

Ключевые слова: карбид кремний, нитрид кремний, реакционное спекание, газообразный азот, порошки.

SILICON NITRIDE DOPED WITH SILICON CARBIDE

Lasankhu K. A., Kasmamytov N. K., Matyash I. V.

Institute of physics named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 265-a Chui Avenue
e-mail: MegaCom17@mail.ru

Abstract: The article describes the effect of *silicon carbide doping* on the physicochemical and physicomechanical properties of the obtained nitrido-silicon ceramic materials after reaction sintering in an electric furnace in a pure nitrogen gas medium.

Keywords: *silicon carbide, silicon nitride, silicon carbide, reaction sintering, nitrogen gas, powders.*

Технология получения керамических материалов на основе рационально-спекенного нитрита кремния (Si_3N_4) заключается в азотирование нано- и ультрадисперсных формированных различными методами порошков кремния в среде газообразного азота при температуре до 1700К в процессе которого порошок кремния при взаимодействии с азотом превращаются в различную модификацию Si_3N_4 .

В лаборатории «Порошковых материалов» Института физики Национальной академии наук Кыргызской Республики разработали метод получения нитридо-кремниевой керамики, которая состоит из следующих технологических операций, показанный на рисунке 1[1-4].

Целью исследования является изучения влияния ультрадисперсного порошка карбида кремния (SiC) на физико-химические и физико-механические свойства нитридо-кремниевой композиционной керамики.

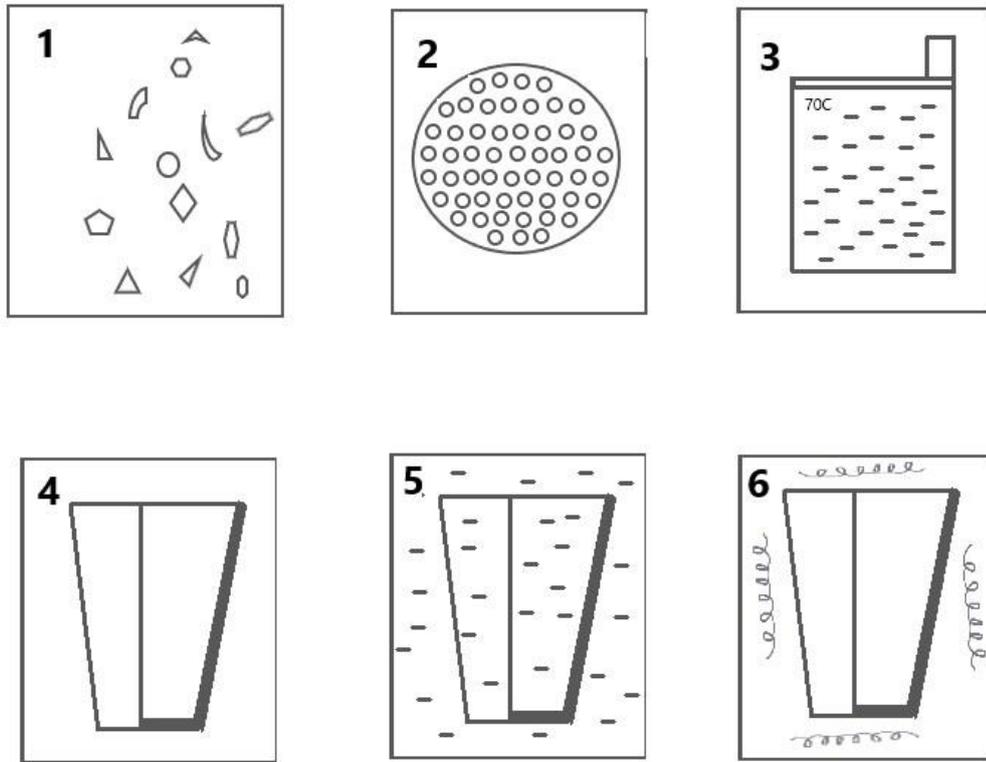


Рис. 1. Способ получения нитридо-кремниевых материалов легированный нано- и ультра порошками карбида кремния: 1-отбор сырья, 2-помол порошка (сырья) до требуемых размеров, 3-получения шликерной массы, 4-формовка изделия (шликерное литье), 5- предварительное удаления связки из изделия, 6-реакционное спекания ниднитокремниевое опытного изделия.

Необходимо учитывать, что изготовление требуемой формы и размеров нитридо-кремниевое изделия легированного карбидом кремния на основе $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ получают непосредственно в виде готового изделия, в связи с этим следует учитывать, что свойства опытных нидридо-кремниевых керамик, полученные при формовке изделия должны реализовываться в процессе их технологического изготовления (до спекания в электропечи). Впоследствии такого технологического процесса готовое изделие не требует механической обработки. Такая технология дает возможность отсутствие усадки или увеличение размеров в процессе реакционного синтеза, поскольку увеличение объёма полученного материала происходит за счёт заполнения внутренних пор заготовки всего объёма, частично легированием порошка карбида кремния. При получении изделия из порошков различного состава мы использовали метод шликерное литье, которому отводится первое место [1, 4-6].

Кристаллохимическая реакция взаимодействие атома азота с компактным смесью порошков ультрадисперсного кремния и добавленного порошка карбида кремния имеет ряд особенностей и в значительной степени зависит от многих факторов способствующих данному процессу получения конечного изделия на основе нитрида кремния и карбида кремния. Так же на скорость реакции,

образования нано-, ультра- микроструктуры и свойства нитридо-керамики влияет дисперсность, плотность, присутствие различных примесей в порошке, температура спекания, давления азота в камере-реакторе и химический состав газообразного азота, экзотермический эффект реакции, и масштабный фактор зависящий от массы и формы изделия, который в свою очередь влияет на диффузионные процессы при протекании кристаллохимической реакции [4, 7, 8].

Для исследования были получены ряд опытных образцов на основе нитрида кремния легированный карбидом кремния. Для исследования были получены опытные образцы цилиндрической формы с размером $45 \times (2+i)$ мм, где i отклонения радиуса цилиндрического опытного образца, в среднем $\pm 1 \div 2$ мм изображённого на рисунке 2.

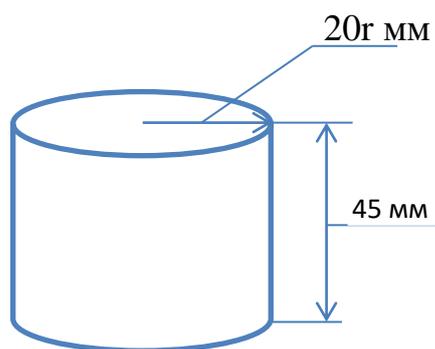


Рис. 2. Цилиндрические опытные образцы на основе нитрида кремни и легированные карбидом кремния.

Целью исследовательской работы это изучения физико-механический и физико-химических свойств композиционной нитридо-кремниевой керамики легированный карбидом. В нитридо-кремниевые опытные образцы, полученные при реакционном спекании в газообразном азоте, добавлялись порошки SiC с разным процентным содержанием шликерной массы, что указано в таблице 1.

Таблица 1 – Опытные нитридо-кремниевые образцы легированные карбидом кремнием SiC

№ п/п	Состав образца	Количество примесей Al ₂ O ₃ , %
1	Si ₃ N ₄ +SiC	0
2	Si ₃ N ₄ + SiC	0,5
3	Si ₃ N ₄ + SiC	1,0
4	Si ₃ N ₄ + SiC	2,0
5	Si ₃ N ₄ + SiC	5
6	Si ₃ N ₄ + SiC	10,0

Полученные опытные композиционные нитридо-кремниевые опытные изделия легированные карбидом кремния имели содержание от 0 до 10% порошка SiC по массе.

После получения опытных нитридо-кремниевых изделий была изучена термостойкость опытных изделий. Термостойкость нитридо-кремниевого материала является одним из важнейших качественных показателей, как известно на основе термостойкости определяется его область применения в конкретных условиях, что способствует определению зависимости внешних влияющих факторов на эксплуатационные свойства. При эксплуатации нитридо-кремниевых керамических материалов в области высоких температур и резким изменением температуры в широком диапазоне в местах эксплуатации, появляются в изделии термические микронапряжения, которые могут быть разрушающими, если данные микронапряжения начнут коррелировать с температурным фактором.

Чтобы определить зависимость корреляции значения возникающих термических напряжений от температуры, которое приводит к разрушению всего изделия, мы рассчитывали количественную меру сопротивления термического напряжения композиционного нитридо-кремниевого опытного изделия легированного карбидом кремния. Количественную меру сопротивления термического напряжения, которая считается максимальная разность температур между изотермическими поверхностями, при котором происходит полное разрушение композиционного нитридо-кремниевого опытного образца при определенных условиях теплопередачи. При разрушении композиционного нитридо-кремниевого опытного образца значения термического напряжения, так же является в данном случае предел прочности материала. Для определения максимальной разности температур, которое приводит к разрушению композиционного нитридо-кремниевого изделия рассчитывали по следующей математической формуле 1:

$$\Delta t_{max} = R * S \quad (1)$$

где Δt_{max} – максимальная разность температуры между изотермическими поверхностями;

R – сопротивления изделия термическому напряжению;

S – факторы геометрической формы изделия.

Сопротивления композиционного нитридо-кремниевого опытного изделия термическое напряжение R зависит от условий протекания нагрева и охлаждения, а так же от свойств изделия в целом. Такие физико-механические и химические свойства нитридо-кремниевых материалов как геометрическая форма, размеры и условия теплопередачи определяет время образования трещин, разрушений в изделии [9].

Для композиционных нитридо-кремниевых опытных изделий термостойкость определяли методом последовательных теплосмен (циклов)

путем нагрева 800-1550°C до образования на поверхности микротрещин и разрушений. Для термического нагрева использовали электропечь марки СНВЭ-12.5/14,5-Н1 (Редмет 30, Россия) с графитовыми нагревателями.

Композиционные нитридо-кремниевые опытные образцы нагревались в интервале температур от 800°C до 1500°C с температурным шагом в 100°C. Каждые 100°C производилось ее охлаждения в холодной воде. После термического отжига каждый композиционный нитридо-кремниевый образец проходил дополнительное измерение по изменению рельефа поверхности с помощью оптического микроскопа на определение и наличия микротрещин и разрешения на поверхности опытного нитридо-кремниевого изделия. Критерием определения термической стойкости служило количество теплосмен до появления микротрещин или разрушения опытного образца. Полученные экспериментальные данные по теплостойкости приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Термическая стойкость нитридо-кремниевого изделия легированного карбидом кремнием SiC

№ п/п	Температура нагрева, °C	Количество теплосмен (Критерия термостойкости)	Изменения поверхности (рельефа) изделия
1	800	10	Изменения нет
2	900	10	Изменения нет
3	1000	10	Изменения нет
4	1100	10	Изменения нет
5	1200(1300)	8-10	опытный образец с 10 % (SiC) образовалось мелкие трещины
6	1300	10	опытный образец с 10 % (SiC) образовалось мелкие трещины
7	1400	10	Изменения нет
8	1500	10	Изменения нет

Как видно из таблицы 2 испытание композиционных нитридо-кремниевых опытных образцов на термостойкость до температуры 1550°C показали себя довольно хорошо. Причина появления микротрещины при температуре между 1200-1300°C у опытного образца осталось непонятным, так как дальнейшей деструкции композиционного нитридо-кремниевого опытного образца легированного SiC не происходило. Для полной информации будут проведены дополнительные методы исследования.

Заключение. Разработан комплексный метод определения термомеханических свойств полученных нитридо-кремниевых изделий легированного порошком карбида кремния SiC. Полученные опытные композиционные нитридо-кремниевые материалы легированные карбидом кремнием на основе шламовых отходов порошка кремния реакционно-синтезированных в среде чистого газообразного азота обладают высокими конкурентоспособными физическими свойствами и термической стойкостью до 1500°C, без каких либо критичных изменений и свойств образца.

Для полной картины физико-механических и физико-химических свойств опытных образцов требуется дополнительных исследований различными методами, что будет описаны в следующих научно-исследовательских работах.

Список литературы

1. Макаров В. П., Касмамытов Н.К., Ласанху К. А. Пат. № 1766 KG. Способ получения керамического композиционного материала из отходов кремниевого производства // – Заявка № 201440066.1; Приоритет 18.06.2014; Зарегистрировано 31.07.2015. <http://base.patent.kg/iz.php?action=search>
2. Ласанху, К. А., Касмамытов Н. К. Влияние графитового волокна на фазовый состав. Рентгеноструктурный анализ // Интеграция наук. – М., 2017. – Вып. 7 (11). – С. 59–63. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29988206>
3. Ласанху, К. А. Физико-химические свойства композиционных материалов легированных графитовым волокном // Современ. науч. исслед. и разработки. – Астрахань, 2017. – Вып. № 5 (13). – С. 197–202. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29444570>
4. Ласанху, К. А. Нитридокремниевые фазы в керамических материалах // Физика / НАН КР. – Бишкек, 2018. – № 1. – С. 110–115.
5. Lasankhu, K. A., Kasmanyatov N. K. Physical and chemical stability of ceramocompositions materials on the basis of waste of semiconductor production // Физика / НАН КР. – Бишкек, 2013. – № 3.–С. 28–35.
6. Ласанху, К. А. Касмамытов Н. К., Матяш И. В., Макаров В. П. Синтез опытных образцов Si₃N₄ с добавлением порошка Al₂O₃ // Физика / НАН КР. – Бишкек, 2024. – № 1. – С. 3-9.
7. Кайрыев, Н. Ж., Касмамытов Н. К., Ласанху К. А. Модельные исследования азотирование порошков кремния методом реакционного спекания // Сборник тр. XI Исык-Кул. междунар. школы-конф. по радиац. физике твердого тела (SCORPh-2015). – Бишкек, 2015. – С. 135–140.
8. Кайрыев, Н. Ж., Касмамытов Н. К., Ласанху К. А. Расчетные характеристики нагрева и процесса реакционного спекания кремния в среде азота методом численного анализа // Сборник тр. XI Исык-Кул. междунар. школы-конф. по радиац. физике твердого тела (SCORPh-2015). – Бишкек, 2015. – С. 140–150.

9. Баринов С. М., Иванов Д. А., Фомина Г. А. Термостойкость и характеристики термостойкости алюмооксидного материала со слоистой гранульной структурой // Огнеупоры. – 1996. №3. – С. 9-12.

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ОКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ

Ашымканов К.Ш., Сагынбаев А.А., Уралиев А.А., Шабаетв Ж.А.

Институт Физики им.академика Ж.Жеенбаева Национальной Академии наук,
720071, Кыргызская Республика, Бишкек, проспект Чуй 265а
e-mail: ashymkan@mail.ru

Аннотация: Представлены новые результаты исследований поглощения миллиметровых волн в атмосфере в условиях высокогорья. Обсуждаются временные изменения поглощения атмосферы на волне от 1,0 мм до 10,0мм для условий высокогорья. Получены численные параметры взаимной корреляции между поглощением сигнала на высотах 3800 и 1660 метров над уровнем моря.

Ключевые слова: миллиметровые волны, поглощение атмосферы, дальность связи, электромагнитная совместимость средств связи.

INVESTIGATION OF THE ABSORPTION OF MILLIMETER WAVES IN ATMOSPHERIC TRANSPARENCY WINDOWS IN HIGH-ALTITUDE CONDITIONS

Ashymkanov K.Sh., Sagynbayev A.A., Muraliev A.A., Shabaev J.A.

Academician J.Jeenbaev Institute of Physics of the National Academy of Sciences,
265a Chui Avenue, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic

Abstract: New results of studies on the absorption of millimeter waves in the atmosphere in high-altitude conditions are presented. Temporal changes in atmospheric absorption at a wavelength from 1.0 mm to 10.0 mm for high-altitude conditions are discussed. Numerical parameters of the mutual correlation between signal absorption at altitudes of 3800 and 1660 meters above sea level are obtained.

Keywords: millimeter waves, atmospheric absorption, communication range, electromagnetic compatibility of communication means.

Во многих странах 5G уже активно используют в разных сценариях, начиная с дистанционных операций на настоящих пациентах и заканчивая беспилотными автомобилями. Эта новая реальность (пусть и не в нашей стране) подталкивает рынок к следующей гонке – гонке за 6G [1-2].

6G позволит значительно увеличить производительность и пропускную способность сетей за счет дополнительных частотных диапазонов: мм-волн ГГц и суб-ТГц. Получается широкая полоса, которая может обеспечить пропускную способность до 1 терабита в секунду. А это максимально низкая задержка передачи данных (до 1 микросекунды) и высокая надежность связи. Шестое поколение в теории поможет и дальше развивать промышленные сценарии, которые пока обслуживает 5G. Это интеллектуальная робототехника и, конечно, автономные автомобили. Изменится процесс коммуникации людей между собой и с техникой. Можно будет общаться друг с другом с помощью голограмм, а устройствами управлять силой мысли. Казалось бы, для экологической обстановки эти новшества вряд ли полезны. Но аналитики обещают, что сети 6G будут более энергоэффективными благодаря возможности отключать компоненты и снижать мощность при уменьшении нагрузки на сеть. Контролировать ситуацию сможет искусственный интеллект, который будет встроен во все протоколы. Одной теорией ученые не ограничиваются. В Китае успешно запустили на орбиту спутник 6G, который передавал данные со скоростью 40 гигабит в секунду. Исследователи Сианьского института оптики и точной механики Китайской академии наук утверждают, что это большой шаг в сторону межпланетной (!) связи. Математики РУДН предложили новую схему для сетей 5G, которая оптимизирует доступ к разным сегментам сети. Число ожидающих начала выполнения или прерванных неприоритетных задач уменьшилось вдвое, при этом вероятность обрыва связи для них не превышает 0,1%. Результаты опубликованы в журнале *Mathematics*. Два ключевых сценария сетей 5G — сверхширокая мобильная связь (eMBB) и ультранадежная межмашинная связь со сверхнизкими задержками (URLLC). eMBB впервые появилась в сетях 4G, она обеспечивает большую полосу пропускания данных и небольшие задержки. Новшество 5G — URLLC. Этот «кусочек», или слайс, сети передает данные очень быстро. Именно он позволяет реализовать приложения Интернета вещей, тактильный Интернет и другие новейшие технологии. Поэтому в случаях, когда использование URLLC и eMBB пересекается, приоритет отдается первому. От этого падает качество приложений, которые используют eMBB. Математики предложили новую схему распределения ресурсов сети, чтобы оставить URLLC в приоритете, но при этом не потерять в качестве eMBB. «Новые сценарии использования требуют очень высоких скоростей, большого количества подключенных устройств и приложений со сверхнизкой задержкой и высокой надежностью. Сценарии eMBB ориентированы на людей и предполагают доступ к мультимедийному контенту, сервисам и данным. Они требуют широкого охвата, высокой плотности пользователей и высокой скорости передачи данных. Для сосуществования нескольких сценариев нужно одновременно предоставлять сервисы с различными требованиями к качеству обслуживания. Радиорелейные линии связи являются одним из лучших вариантов организации опорных сетей передачи данных. Наиболее популярные способы применения РРЛ: 1) Организация опорной сети передачи данных

вдоль газо- и нефтепроводов. 2) Организация транспортной сети для центров управления и диспетчеризации (ЦОФ, АБК) в горнодобывающей промышленности. 3) Организация транспортных каналов между базовыми станциями (БС) в сетях сотовой связи. В условиях организации канала связи «в чистом поле» радиорелейные линии имеют ряд преимуществ, по сравнению с традиционными волоконно-оптическими линиями связи. Там, где прокладка кабеля может нести высокие капитальные затраты и затруднять обслуживание в случае аварийной ситуации, РРЛ является идеальным выбором. При этом пропускная способность таких линий будет от 20 Гбит/с. Преимущества РРЛ перед ВОЛС: а) Низкие капитальные затраты на реализацию; б) Развёртывание и модернизация в короткие сроки в условиях сложного рельефа; в) Оперативное обнаружение и устранение неисправностей; г) Возможность резервирования и увеличения пропускной способности по мере необходимости. Все оборудование радиорелейной связи можно условно разделить на две категории: работающие в лицензируемом и в не лицензируемом диапазоне частот. Давайте разберемся в чем их принципиальные отличия: Лицензируемые диапазоны частот 6-38 ГГц : 1) Максимальное расстояние — 80 км (оптимально 40 км), 2) Тип размещения — Full Outdoor, Full Indoor, 3) Максимальная скорость передачи данных на одной антенне — до 4 Гбит/с, 4) Ширина полосы — до 112 МГц. Не лицензируемые диапазоны частот 40 ГГц (Q-band)-60 ГГц (V-band)- 70/80 ГГц (E-band) : а) Максимальное расстояние — 10 км, б) Тип размещения — Full Outdoor, в) Максимальная скорость передачи данных на одной антенне — до 20 Гбит/с, г) Ширина полосы — до 2000 МГц. Таким образом, в зависимости от поставленной задачи выбирается наиболее подходящее по характеристикам оборудование и частоты. Чаще всего выбирается оборудование, работающее в диапазоне частот 6-38 ГГц, т.к. представляет идеальный баланс между дальностью связи и скоростью передачи данных. В настоящей работе представлены новые результаты по поглощению миллиметровых волн в тропосфере в условиях высокогорья. Впервые были выполнены расчеты поглощения в окнах прозрачности атмосферы по данным международной стандартной атмосферы на широте 45 градусов для высоты 3800 метров над уронем моря и радиозондовым данным Кыргызгидромета. Получены численные характеристики поглощения для длин волн : 2,2; 3,3; 4,1; 8,6мм, которые соответствуют окнам прозрачности миллиметрового диапазона. Эти расчеты были выполнены на основе алгоритмов и программ, разработанных в ИРЭ РАН (Зражевский А.Ю и их сотрудников [3-6]. Выбор высоты 3,8км связан с планами экспериментального измерения затухания сигнала, где передающее устройство расположено на указанной высоте, а приемная часть на уровне 1,66км на расстояниях прямой видимости [4]. В качестве примера на Рис.1 представлена зависимость поглощения сигнала от длины волны для условий лета и зимы на высоте 3,8км.

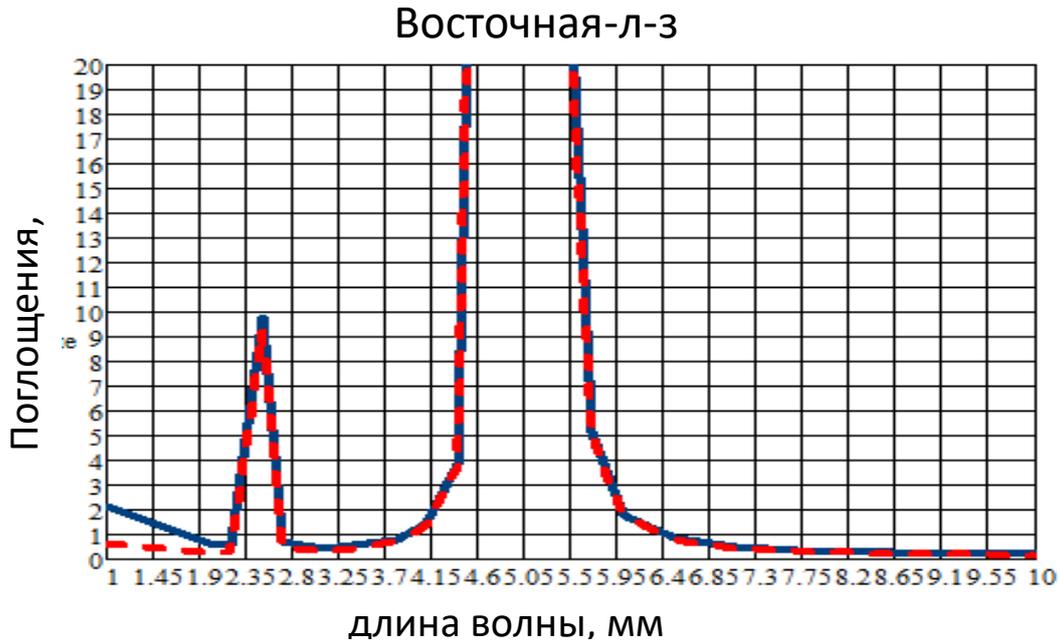


Рис. 1. Зависимость поглощения сигнала от длины волны для летних и зимних условий погоды на высоте 3,8км.

Как видно, график показывает два ярко выраженные максимумы поглощения сигнала : на длине волны 2,5мм и 5мм. При этом, на 1-ой точке- 9,78дБ, а на второй-170,04дБ. Эти цифры означают на невозможность радиосвязи на этих частотах. Окна прозрачности на миллиметровых волнах соответствуют на длинах волн : 2,2мм; 3,1мм; 4,1мм и 8,6мм. Разница значений летних и зимних поглощений сигнала в окнах прозрачности небольшие : 0,3дБ; 0,06дБ; 0,06дБ и 0,05дБ соответственно. Здесь и далее на графиках : синии линии соответствует летним значениям поглощения, а красные – зимним. На Рис. 2 показана такая же зависимость для высоты 1,66км.

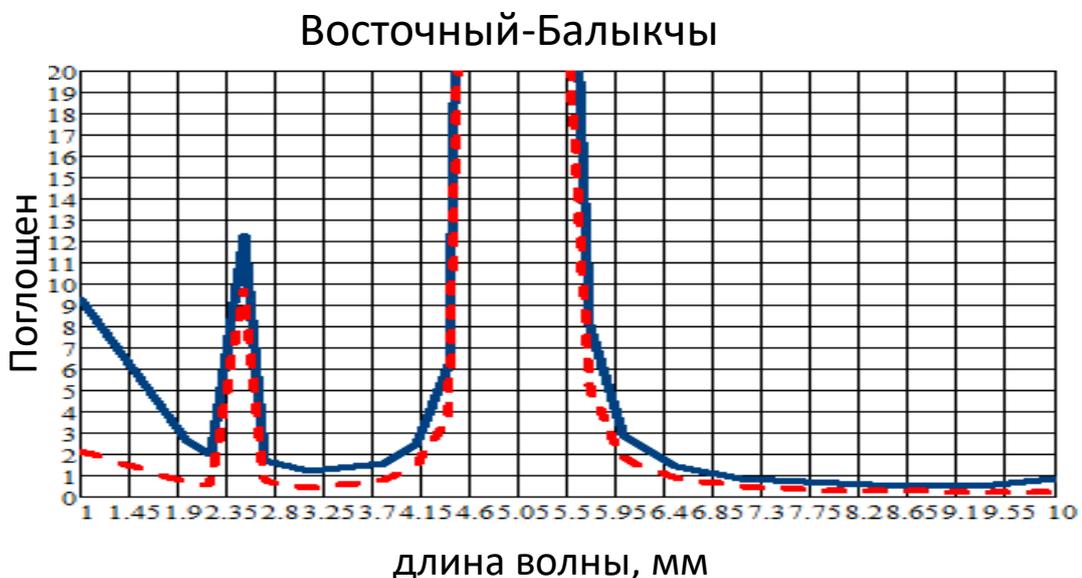


Рис. 2. Зависимость поглощения сигнала от длины волны для летних и зимних условий погоды на высоте 1,66км.

Видно, что поглощение здесь имеет некоторое сходство с графиком на Рис. 1

Как уже было показано, на высоте 3,8км разница между летними и зимними величинами поглощения были незначительными. Здесь эти различия более существенные : 1,2дБ; 0,53дБ; 0,19дБ и 0,1дБ. Для сравнения величин поглощения на Рис. 3 предложены затухания между двумя высотами для условий лета, а на Рис. 4 для зимы.

Восточный-Балыкчы

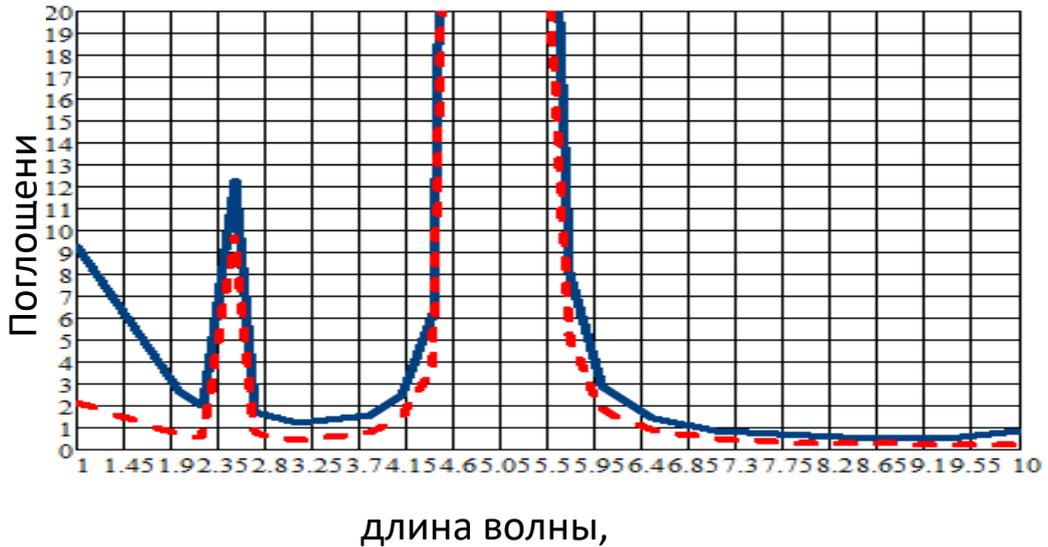


Рис. 3. Зависимость поглощения сигнала от длины волны для летних условий между высот 3,8км и 1,66км.

Летом на обеих высотах есть различия в величинах поглощения : 1,44дБ; 0,75дБ; 1,01дБ и 0,2дБ.

Восточный-Балыкчы зима

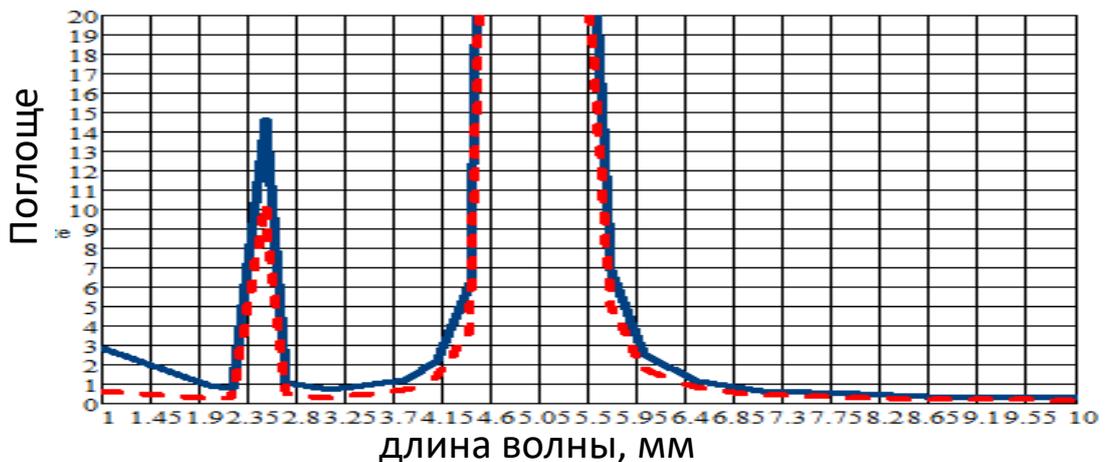


Рис. 4. Зависимость поглощения сигнала от длины волны для зимних условий между высот 3,8км и 1,66км.

Зимой разница между величинами на указанных высотах снижаются : 0,54дБ; 0,36дБ; 0,88дБ и 0,13дБ. Сравнение зависимости поглощения сигнала на высоте 3,8км для летних условий погоды от длины волны, полученных на основе стандартной атмосферы и радиозондовых данных Кыргызгидромета показана на Рис. 5

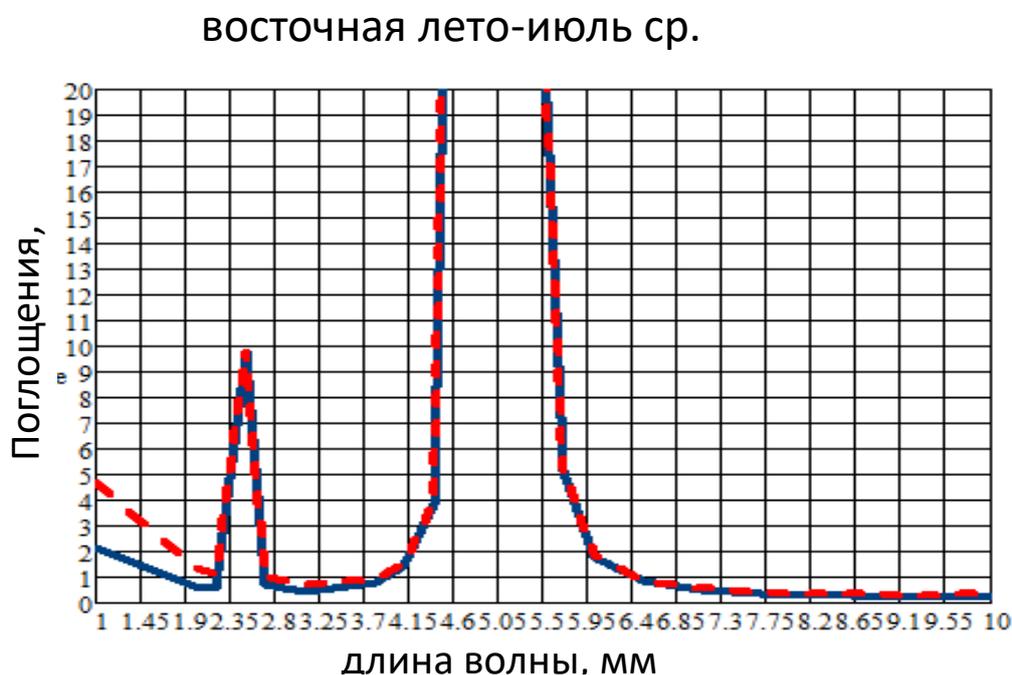


Рис. 5. Сравнение зависимости поглощения сигнала от длины волны для летних условий на высоте 3,8км (данные стандартной атмосферы и Кыргызгидромета).

Как видно, различие в величинах поглощения незначительные : 0,53дБ; 0,25дБ; 0,08дБ и 0,06дБ. Полученные количественные величины поглощения в условиях высокогорья Кыргызстана авторы намерены проверить прямыми измерениями затухания радиосигнала на волне 8мм на трассе РРС “Восточный” и РРС “Балыкчы”.

Список литературы

1. Интернет ресурсы : www.leo.ru
2. Интернет ресурсы : www.6gflaship.com
3. Ашымканов К.Ш. Радиофизические характеристики атмосферы Северного Кыргызстана в КВЧ диапазоне, Бишкек, Илим, 2011
4. U.S. Standart Atmosphere Supplements, 1966, D.S. Washington
5. Зражеский А.Ю. и др. Журнал Радиоэлектроника, 2012, №10
6. Ашымканов К.Ш., Шабаетов Ж. Исследования затухания радиосигнала в атмосферных газах высокогорья, Международная конференция «Радиационная физика», Бишкек, 2023.

УДК 621.373.826

ГРАВИРОВКА ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ НА ДЕРЕВЯННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂-ЛАЗЕРА С $\lambda = 10,6$ МКМ

И.А.Снимщиков, А.А. Кутанов, Н. Сыдык уулу

Институт физики им. академика Ж.Ж. Жеенбаева,
Национальная Академия наук, Чуй проспект 265-а, Кыргызская Республика

Аннотация. Исследовано получение полутоновых изображений на деревянной поверхности путем гравировки CO₂-лазером с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм на двухкоординатной установке, управляемой от компьютера. Показана необходимость предварительной гамма-коррекции изображения для улучшения передачи полутонов лазерной гравировки на древесной поверхности. Для выполнения тестовых гравировок было подготовлено полутоновое изображение, содержащее линейный градиент яркости от 0% (черное) до 100% (белое). Изображение было стандартизовано до 11-польной шкалы яркостей, от 0% до 100%. Получены результаты гравировки на деревянной поверхности тестовых полутоновых образцов с различными значениями γ . Применение коррекции изображения с $\gamma = 1,6 - 2,8$ позволяет выровнять передачу полутонов. Получен динамический диапазон гравированных тестовых изображений порядка $0,3D$. Изготовлены портреты лазерной гравировкой на древесной поверхности с применением CO₂-лазера мощностью 18 Вт при длительности импульсов 80 мксек с растром 40 линий/дюйм. Лазерная гравировка полутоновых изображений на дереве найдет различные применения: изготовление портретов, сувениров, рекламной продукции, декоративно-прикладное искусство.

Ключевые слова: лазерная гравировка, полутоновые изображения, гамма-коррекция, CO₂-лазер.

ENGRAVING HALF-TONE IMAGES WITH PRE-CORRECTION ON A WOODEN SURFACE USING CO₂-LASER RADIATION WITH $\lambda = 10.6$ μm

I.A. Snimshikov, A.A. Kutanov, N. Sydyk uulu,

Institute of Physics named after academician Zh.Zh. Zheenbaeva NAS KR,
Bishkek, Chui Avenue 265-a

Abstract. The halftone images on wooden surface engraving by CO₂-laser with wavelength $\lambda = 10,6$ μm on a two-coordinate equipment controlled by a computer are studied. The need for gamma correction of the image to improve the transmission of halftones of laser engraving on a wood surface is shown. To perform test engraving, a halftone image was prepared containing a linear brightness gradient from 0% (black) to 100% (white). The image was standardized to an 11-field gray scale, from 0% to 100%. The results of engraving test halftone samples with different γ values on a wooden surface were obtained. The use of precorrection of image with $\gamma = 1,6 - 2,8$

allows to improve the transmission of halftones. A dynamic range of the engraved images of the order of 0.3D was obtained. Portraits by laser engraving on a wood surface using an 18 W CO₂-laser with pulse duration of 80µs and a raster of 40 lines/inch were made. Laser engraving of halftone images on wood will find various applications: making portraits, souvenirs, advertising products, arts and crafts.

Keywords: laser engraving, halftone image, gamma correction, CO₂-laser.

Введение. Современные лазерные технологии используются для обработки широкого спектра материалов, включая автоматизированные процессы гравировки и маркировки на различных производствах. Одним из интересных применений лазеров является гравировка полутоновых изображений на дереве с использованием CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм. Этот метод обеспечивает точное и детальное воспроизведение изображений с высокой разрешающей способностью на деревянной поверхности, натуральном материале, привлекательном для человека. Нанесение полутоновых изображений лазерным излучением на древесной поверхности придает изделиям уникальность и неповторимость. Отладка технологии лазерной гравировки полутоновых изображений на дереве является актуальной задачей для различных применений: изготовление портретов, сувениров, рекламной продукции, декоративно-прикладное искусство, гравировка на производстве.

Лазерная гравировка полутоновых изображений на деревянной поверхности. Под воздействием импульсов сфокусированного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм на поверхности деревянного образца выжигаются темные точки небольшой глубины, которые служат основой для построения полутонового изображения. Полутона можно сформировать одним из методов растривания изображений. В силу того, что за счет обгорания краев, реальный размер точек получается больше размера сфокусированного пятна лазера, полученные изображения выглядят гораздо темнее оригинала, аналогично эффекту растискивания в полиграфии [1, 2]. Для его компенсации изображение подвергают предварительной коррекции.

Предварительная коррекция изображения. В компьютерном представлении яркость каждой точки полутонового изображения представлена числом от 0 до 255 (при 8-битном кодировании). Для того чтобы высветлить потемневшие участки и повысить различимость деталей на них, подготовленное изображение перед выводом на лазерное оборудование следует подвергнуть коррекции, когда яркость темных элементов усиливается преимущественно по сравнению со светлыми. Для этой цели подходит гамма-функция [3] вида

$$V_{out} = A \cdot V_{in}^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

где V_{in} – исходное значение яркости точки, V_{out} – яркость после коррекции, γ – показатель, A – коэффициент. Значение γ определяет степень

преобразования яркостей. Когда $\gamma = 1$, яркость не изменяется. Для наших целей полезен диапазон $\gamma > 1$, когда яркость точек увеличивается.

Для выполнения тестовых гравировок подготовлено полутоновое изображение (рис. 1, а), содержащее линейный градиент яркости от 0% (черное) до 100% (белое). Изображение было создано до 11-польной шкалы яркостей от 0% до 100% (рис. 1, б).

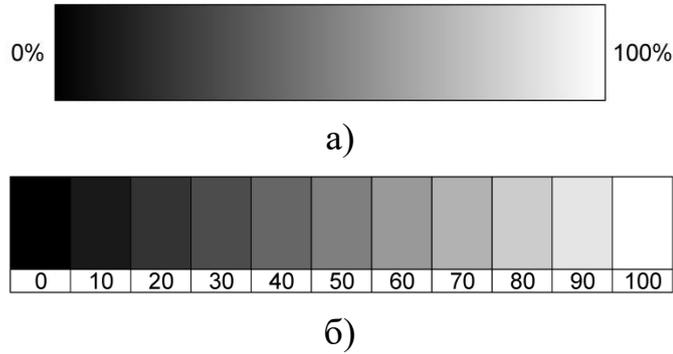


Рис. 1. Тестовое изображение для гравировки с градациями яркости.

На рисунке 2 приведены результаты гравировки на деревянной поверхности тестовых полутоновых образцов с различными значениями γ . Длина волны CO_2 -лазера $\lambda = 10,6$ мкм, мощность 18 Вт, длительность импульсов 80 мксек, растр 40 линий/дюйм.

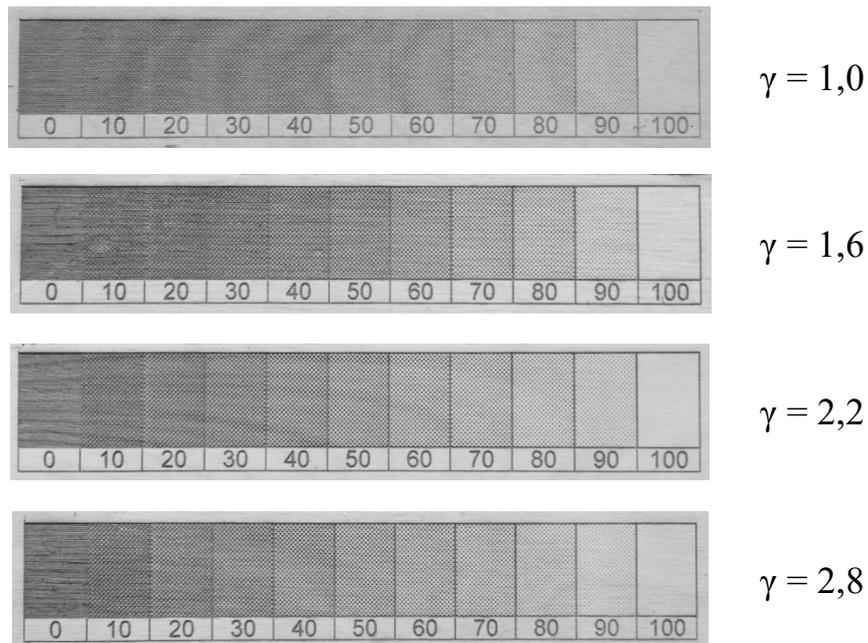


Рис. 2. Фотографии тестовых гравировок на деревянной поверхности с различными значениями γ .

Снимок образца, где $\gamma = 1$, т.е. в отсутствие коррекции, показывает преобладание темных тонов. Применение предварительной коррекции с $\gamma = 1,6 - 2,8$ позволяет выровнять передачу полутонов.

Оценка динамического диапазона. Деревянные поверхности не являются достаточно светлым фоном для полутоновой гравировки. С другой стороны, выжженные лазером точки также недостаточно темные, чаще коричневые. Эти факторы ограничивают динамический диапазон полутоновых изображений [4]. Для устройств ввода и отображения динамический диапазон D оценивают как

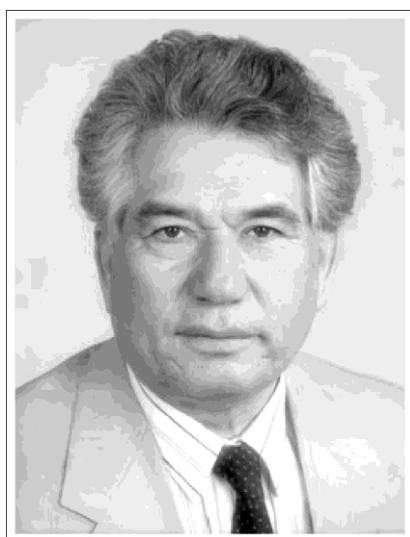
$$D = \log_{10} \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (2)$$

где V_{max} и V_{min} – максимальное и минимальное измеренные значения яркости соответственно. На гравированных тестовых образцах (рис. 2) динамический диапазон составил $D = 0,24 - 0,3$ (пишут также $0,24D \dots 0,3D$).

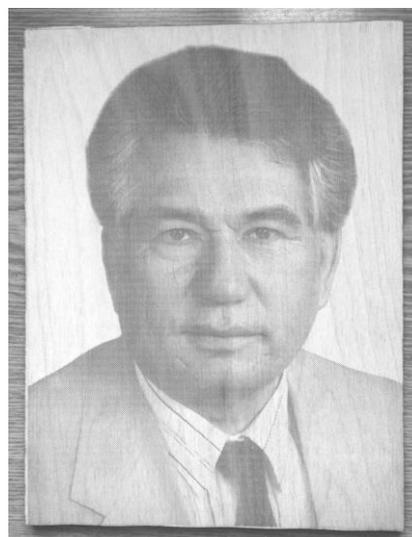
Прикладные результаты. На рисунке 3 приведены примеры лазерной гравировки полутонового изображения на деревянной поверхности размером 180×240 мм. Полутоновый растр 40 линий/дюйм сформирован в программе Adobe PhotoShop v.8.0. Длина волны лазера $\lambda = 10,6$ мкм, мощность 18 Вт, длительность импульсов 90 мксек. Использовалась фокусирующая линза с фокусным расстоянием $F = 25,4$ мм.

Приемлемое распределение полутонов достигнуто коррекцией исходного изображения с показателем $\gamma = 1,6$ (рис. 3, б) и $\gamma = 2,2$ (рис. 3, г). Динамический диапазон составил $0,28D$ и $0,27D$ соответственно.

Портреты человека, изготовленные лазерной гравировкой на древесной поверхности, натуральном материале, передают его тепло, и тем самым привлекают внимание людей.



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Исходные фотографии Чынгыза Айтматова (а), и академика Ж.Ж. Жеенбаева (в), и их портреты, гравированные лазером на деревянной поверхности (б, г).

Заключение. Отлажена технология получения полутоновых изображений на деревянной поверхности путем гравировки CO_2 -лазером с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Улучшение передачи полутонов изображения при лазерной гравировке достигается при помощи предварительной гамма-коррекции. Полученные значения показателя γ близки к значению $\gamma = 2,2$, принятому в ОС Windows для устройств отображения [5]. Полутоновые изображения на дереве характеризуются невысоким динамическим диапазоном порядка $0,3D$. Лазерной гравировкой изготовлены уникальные портреты на деревянной поверхности. Лазерная гравировка полутоновых изображений на дереве найдет различные применения на отечественном рынке: изготовление сувениров, рекламная продукция, декоративно-прикладное искусство, маркировка на производстве.

Список использованных источников:

1. Журнал «Формат» – http://www.kursiv.ru/kursivnew/format_magazine/archive/10/6.php
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Растискивание>
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Гамма-коррекция>
4. Динамический диапазон – <https://dzen.ru/a/Y-vdxFea5D5GKpVb>
5. Гамма в цифровой допечатной подготовке – <https://igor-bon.ru/gamma.htm>

УДК 510.53(575.2)

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТКЛИК НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ СРЕДНИХ ШИРОТ НА НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОКЕАНЕ

Гайнутдинова Р.Д., Крымская Д.Н.

Институт физики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская Республика

epfk@rambler.ru, dina.krymskaya@yandex.ru

Аннотация. Приводятся результаты оценок вклада факторов природного и антропогенного происхождения в долгопериодную изменчивость температуры нижней атмосферы. Рассматриваются причины региональных климатических изменений приземной температуры, обусловленные изменением солнечной активности и температуры океана. Показано влияние процессов в океане на атмосферные процессы в регионе Центральной Азии.

Ключевые слова: атмосфера, температура, солнечная активность, климат, океан.

TEMPERATURE RESPONSE OF THE LOWER ATMOSPHERE OF MID-LATITUDES TO NON-STATIONARY PROCESSES IN THE OCEAN

R.D. Gainutdinova, D.N. Krymskaya

Institute of Physics of NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic

epfk@rambler.ru, dina.krymskaya@yandex.ru

Summary. Results of estimations of contribution factors of natural and anthropogenous origin to long-period variability of temperature of the lower atmosphere are given. The causes of regional climatic changes in surface temperature due to changes in solar activity and ocean temperature are considered. Influence of processes in the ocean on atmospheric processes in the region of Central Asia is shown.

Key words: atmosphere, temperature, solar activity, climate, ocean.

Введение. Общеизвестно, что крупномасштабные изменения температуры в атмосфере связаны с изменениями температуры поверхностного слоя океана. За счет вращения Земли в атмосфере формируется так называемый зональный поток, на который влияют все изменения температуры в поверхностном слое океана. Влияние изменений температуры поверхности океана на состояние температурного режима приземной атмосферы континентальных материков, в частности, европейской и азиатской части суши, происходит посредством этого воздушного зонального потока. Исследования американских ученых показали, что медленные долгопериодные изменения солнечной активности с периодами в 30-50 лет и более проявляются с той же периодичностью в изменениях температурного режима поверхностного слоя океана /1/. Так, вековой (100-летний) максимум солнечной активности был отмечен в 1995-1998 годы, при

этом через 2-3 года был зафиксирован максимум температуры поверхностного слоя Атлантического океана.

Зональный поток атмосферы, увлекаемый вращением Земли с запада на восток, подхватывает нагретые или охлажденные потоки воздуха над поверхностью Атлантики и переносит их на материк. Соответственно температурный режим материковой суши определяется долгопериодными колебаниями температурного режима поверхности океана. Последний, в свою очередь, определяется изменениями солнечной активности и в существенной степени зависит от амплитуды ее вековых колебаний.

Анализ экспериментальных данных. Естественные колебания климата связаны с изменением температуры поверхности океана. Ряд ученых считает, что основным фактором, определяющим эти колебания, являются изменения температуры поверхности океана, поскольку теплоемкость океана несопоставимо выше, чем у атмосферы. Незначительные колебания температуры поверхности океана на уровне более 0,1 градуса вызывают существенные изменения температуры атмосферы над океаном и материками. Расчеты показывают, что вклад океана в нагрев атмосферы сопоставим с энергетическим вкладом Солнца.

Исследования последних лет показали, что современные изменения климата, в существенной его части, являются следствием изменений температуры поверхности океана. Для выявления этого факта необходимо связывать фазы и вариации океанических течений, а так же температуры поверхностных вод океана с циклическими вариациями радиационного режима Солнца.

На рис. 1 приведены среднемесячные и декадные аномалии температуры, осредненные по трем океанам (глобальный океан) - Индийскому, Тихому, Атлантическому океанам, а также и вариации солнечной радиации в верхней атмосфере и на уровне моря (шкала справа) по данным исследований, проведенных в NASA группой специалистов по исследованию связи климата с солнечной активностью /1/. Из этих данных виден высокий уровень корреляции между изменениями температуры поверхности океана и 11-летним циклом солнечной активности.

На изменения температурного режима вод Атлантического и Тихого океанов существенное влияние оказывают крупные океанические течения, явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Если влияние Гольфстрима относительно постоянное, то влияние явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья носит периодический характер на коротких временных интервалах в 2-3 года, но их вклад в климатические изменения температуры атмосферы довольно значительный.

Общеизвестно, что климатическая система атмосферы Земли зависит от множества как природных, так и техногенных факторов. Из природных факторов необходимо отдельно рассматривать влияние природного фактора океанического течения Эль-Ниньо на изменения температурного режима атмосферы в различных регионах северного полушария. Надо полагать, что процессы в атмосфере Центральной Азии в определенной мере будут определяться процессами в океане, такими как Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Это

подтверждается экспериментальными наблюдениями за эффектами влияния этих явлений на атмосферные процессы в Центральной Азии, в частности, в Кыргызстане.

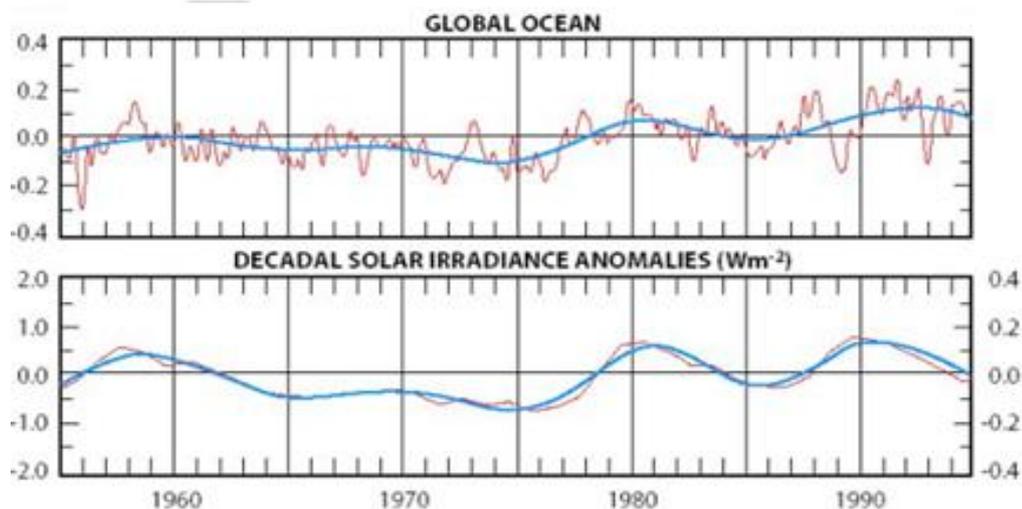


Рис. 1. Среднемесячные и декадные аномалии и осредненные температуры поверхности глобального океана и вариации солнечной радиации за 40-летний период.

Рассмотрим вопрос о связи Эль-Ниньо с колебаниями концентрации углекислого газа CO_2 . На рис. 2 приводятся межгодовые вариации ежегодного прироста CO_2 по данным станции Мауна-Лоа (Гавайи) – среднемесячные (кривая 1); сглаженные по 12 точкам (кривая 2) и линейный тренд (кривая 3) и изменения температуры в Тихом океане в области Niño 3.4.1 /2/. Из этих данных видно, что максимумы в колебаниях индекса Эль-Ниньо предшествуют колебаниям концентрации углекислого газа CO_2 , т.е. первоначально происходят возмущения в поверхностной температуре океана, о чем свидетельствуют изменения в индексе ONI (Oceanic Niño Index), а затем спустя некоторое время происходят возмущения в вариациях концентрации углекислого газа CO_2 .

В работе /3/ показано, что CO_2 не является одним из главных факторов парникового эффекта. Водяные пары H_2O в равной, а может и в большей степени, ответственны за парниковый эффект в атмосфере. Более того, в работах /4,5/ было показано, что повышению концентрации CO_2 первоначально предшествует повышение температуры, т.е. вначале идет процесс потепления, а только уже затем происходит повышение концентрации CO_2 . С другой стороны, океанологи утверждают, что при нагревании поверхности океана даже на небольшую величину в $0,1^\circ\text{C}$ в атмосферу выбрасывается такое количество CO_2 , которое в десятки и сотни раз больше, чем выбросы всех вместе взятых на планете промышленных предприятий.

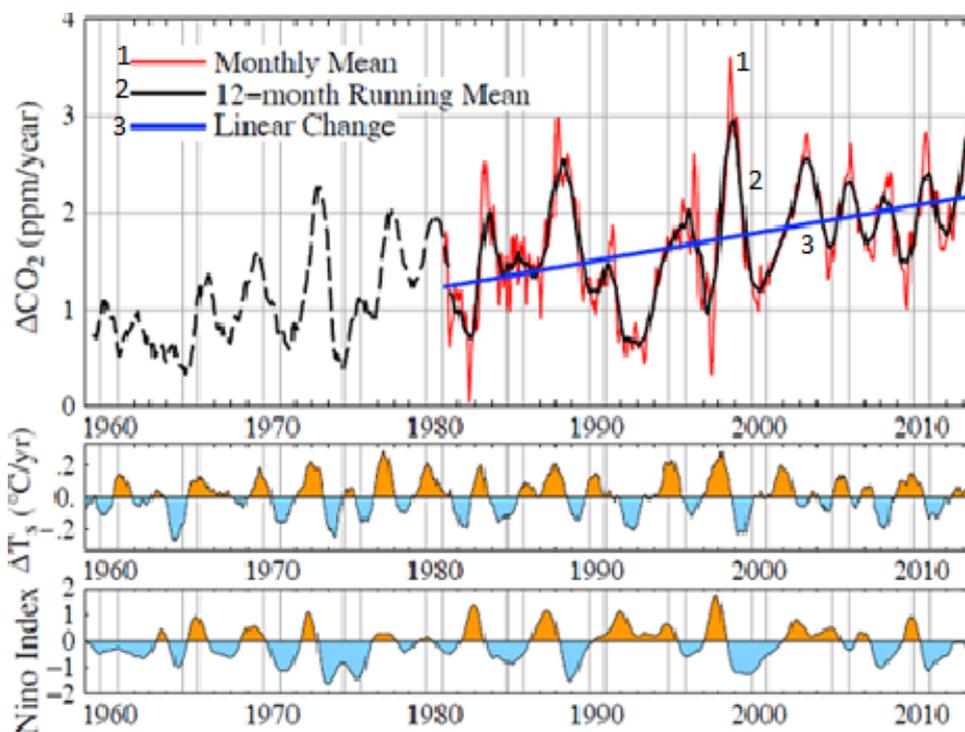


Рис. 2. Межгодовые вариации ежегодного прироста CO_2 по данным станции Мауна-Лоа (Гавайи) и изменения температуры океана в области Niño 3.4.1.

В этой связи необходимо отметить, что ученые в области физики атмосферы, метеорологии, геофизики, климатологии, собравшиеся на конференцию Комиссии ООН по изменению климата в декабре 2009 г. в Копенгагене, не смогли принять единую декларацию по изменению климата на Земле и по квотам выбросов парниковых газов, поскольку мнения ученых поделились на два лагеря. Одни утверждали, что потепление будет продолжаться и далее, другая часть ученых выступала с доказательствами, что никакого потепления не будет, а, наоборот, следуя за спадом вековой солнечной активности и, соответственно, понижением температуры поверхности океана, температура приземной атмосферы будет снижаться.

По многолетним данным вариаций приземной температуры по Кыргызстану в последние 3-4 года отмечается стабилизация ее роста и даже некоторое ее понижение, хотя при этом концентрация CO_2 продолжает медленно расти. Среднегодовая температура по данным МС Бишкек, начиная с 2005 по 2009 г., стабилизировалась, и дальнейший рост температуры не прогнозируется.

Рассмотрим температурный отклик нижней атмосферы на нестационарные процессы в океане. Исследованию механизму влияния Эль-Ниньо на приземную температуру атмосферы посвящен ряд работ. Изменения термодинамического режима атмосферы связаны с изменением температуры поверхности океана. Специалистами показано, что вклад океана в нагрев атмосферы сопоставим с энергетическим вкладом Солнца. При этом необходимо связывать фазы и вариации океанических течений, а так же

температуры поверхностных вод океанов с циклическими вариациями солнечного радиационного режима.

В настоящее время одной из актуальных задач является исследование влияния явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, периодически возникающих в тропической зоне Тихого океана, на межгодовые вариации температурного режима атмосферы. Известно, что климатический феномен Эль-Ниньо имеет циклический характер и проявляется в крупномасштабных отклонениях от привычной циркуляции в атмосфере и океане. Его индикатором является положительная аномалия температуры поверхности океана в центре и на востоке тропической зоны Тихого океана.

Для явления Эль-Ниньо значение океанического индекса ONI (Oceanic Niño Index), характеризующее среднее за 3 месяца отклонение температуры поверхностных вод океана (ΔT) от нормы, составляет $\Delta T > 0,5^\circ\text{C}$. Противоположной фазой, сменяющей явление Эль-Ниньо, служит цикл Ла-Нинья, который, соответственно, характеризуется необычно прохладной водой в том же регионе океана. Для явления Ла-Нинья значение океанического индекса $\Delta T < -0,5^\circ\text{C}$.

В работах [6,7] был исследован эффект влияния явления Эль-Ниньо на атмосферные процессы Центральной Азии и повышение поверхностной температуры оз. Иссык-Куль в июле-августе 2015 г., когда наблюдалось самое мощное явление Эль-Ниньо за всю историю наблюдений.

Проведем анализ межгодовых вариаций многолетнего ряда температуры приземной атмосферы по данным МС Тянь-Шань и Бишкек с 1950 по 2017 гг. На рис. 3 приведены вариации среднегодовой температуры приземной атмосферы по данным МС Тянь-Шань и Бишкек и индекса ONI. Анализ рисунка показывает, что положительным аномалиям отклонений среднегодовых температур от среднескользящей соответствует период действия явления Эль-Ниньо, и наоборот, отрицательные отклонения соответствуют периодам действия явления Ла-Нинья.

Совпадение положительных экстремумов в вариациях среднегодовой температуры по обеим метеостанциям в 50% случаев приходится на период влияния явления Эль-Ниньо. Отрицательные экстремумы температуры в 30% случаев соответствуют периоды действия в океане явления Ла-Нинья. Из рисунка видно, 2003 и 2013 годы не входят в эту статистику. Это может быть связано с региональными особенностями термодинамического режима нижней атмосферы, в частности, влиянием Западно-Сибирского антициклона.

В 2013 году Центральноазиатский регион был подвержен влиянию Южно-Азиатского тропосферного антициклона. Этим можно объяснить отсутствие влияния Эль-Ниньо и Ла-Нинья на атмосферные процессы Центральной Азии в вышеуказанные годы. Подобные результаты были получены в работе [7].

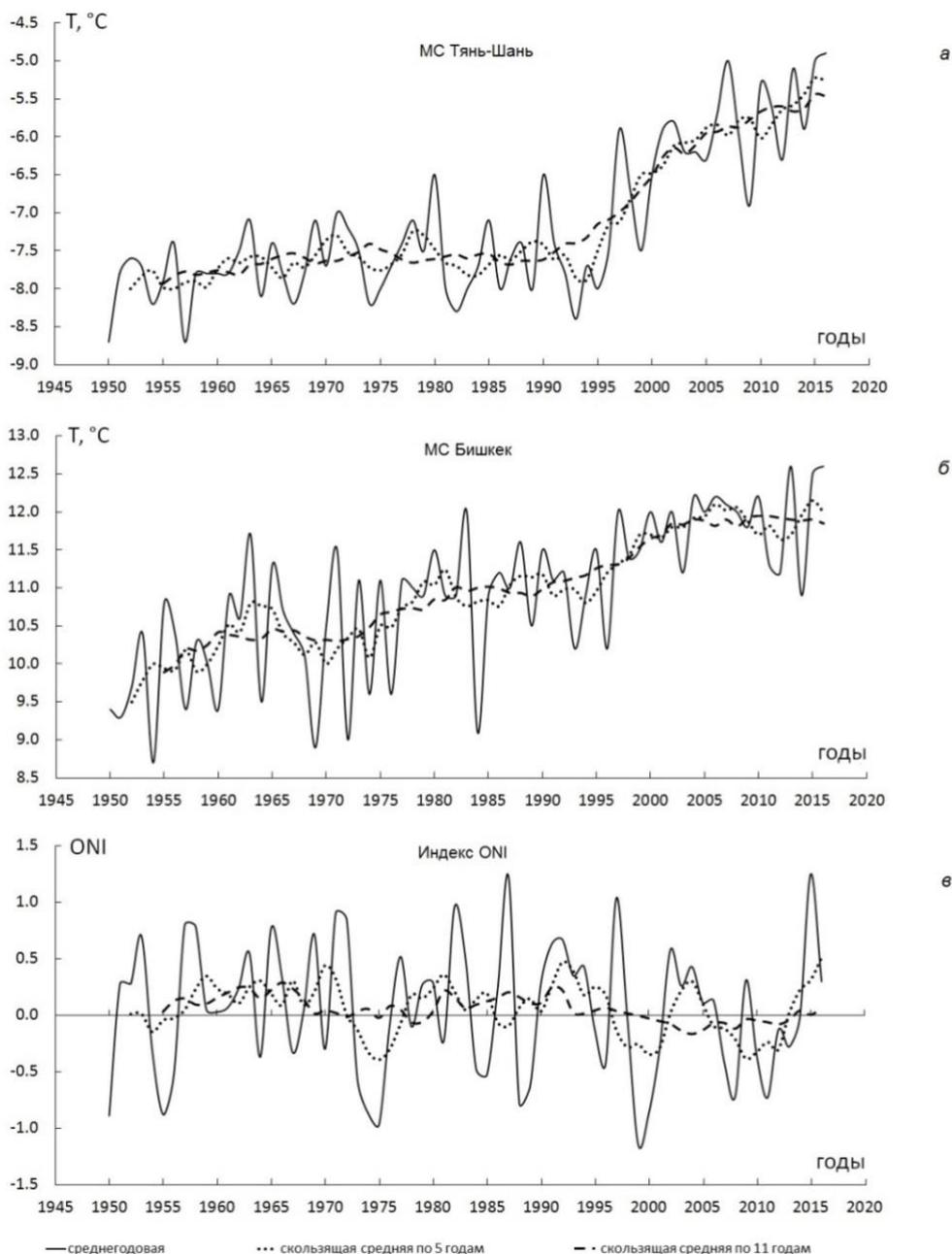


Рис. 3. Межгодовые вариации среднегодовой температуры воздуха по данным МС Тянь-Шань и Бишкек и океанического индекса ONI.

Заключение. На основе анализа экспериментального материала за 66-летний период о температурном режиме атмосферы по данным МС Тянь-Шань и Бишкек и индекса ONI выявлено влияние на приземную температуру и атмосферные процессы Кыргызстана природных явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Показано, что в межгодовых вариациях положительным аномалиям среднегодовых температур соответствует период действия явления Эль-Ниньо, а отрицательным аномалиям – явление Ла-Нинья.

Список использованных источников

1. Report of the NASA LWS Sun-Climate Task Group, 2003.
2. Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo. Global surface temperature change. // Rev. Geophys., 2010. 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
3. Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Взаимодействие климата и углеродного цикла в 20-21 веках по расчетам с глобальной климатической моделью // Вычислительные технологии, т. 11, 2006, с.156-165.
4. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Роль природных и антропогенных факторов в климатических изменениях параметров атмосферы // Известия НАН КР – Бишкек, 2010, №1, с. 72-76.
5. Сорохтин О.Г. Парниковые газы в атмосфере не вызывают потепление климата // Наука в России, 2001, № 4, с.40-47.
6. Крымская Д.Н., Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Эффекты влияния океана и атмосферных центров действия на температурный режим нижней атмосферы Центральной Азии // Физика, Бишкек, 2016, № 2, с.17-21.
7. Каримов К.А., Крымская Д.Н., Гайнутдинова Р.Д. Эффект Эль-Ниньо в динамике атмосферных процессов Центральной Азии – Труды XXII Межд. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Россия, Томск, 2016, с. 472-475.

УДК: 662.732

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННОГО ПРОЦЕССА В УГОЛЬНОМ ПИРОЛИЗЕРЕ

А.А.Асанов¹, Н.К.Джаманкызов¹, Б.Т.Мекенбаев¹, Н.Т.Ниязов¹

¹ УИА академик Ж. Жеенбаев атындагы физика Институту, Бишкек,
Кыргыз Республикасы

¹ Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева НАН, Бишкек,
Кыргызская Республика

e-mail: asanov52@mail.ru, nasip49@gmail.com, mekenbt@mail.ru,
niazovnt@mail.ru

Аннотация. Моделирование тепло-массо обменных процессов было выполнено с использованием математической модели, которая включает в себя уравнение теплового баланса между твердым теплоносителем и частицами угля.

Предложены математические формулы для температур компонентов смеси в зависимости от времени их движения в реакторе, что позволило определить время наступления равновесного значения температуры компонентов смеси в зависимости от их геометрических и теплофизических параметров. Это свою очередь позволяет управлять процессом пиролиза. Полученные результаты моделирования могут быть использованы при проектировании пиролизных машин и при решении ряда других инженерных задач.

Ключевые слова: твердый теплоноситель; полукокс; пиролиз; уголь; температура; теплообмен; моделирование.

ON ONE METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN A COAL PYROLYZER

A.A.Asanov¹, N.K.Dzhamankyrov¹, B.T. Mekenbaev¹, N.T. Niyazov¹

¹Institute of Physics. Academician Zh. Zheenbaev National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek
e-mail: asanov52@mail.ru, nasip49@gmail.com, mekenbt@mail.ru,
niazovnt@mail.ru

Annotation. Modeling of heat-mass exchange processes was performed using a mathematical model that includes the heat balance equation between the solid coolant and coal particles.

Mathematical formulas are proposed for the temperatures of the components of the mixture depending on the time of their movement in the reactor, which made it possible to determine the time of onset of the equilibrium temperature of the components of the mixture depending on their geometric and thermophysical parameters. This, in turn, allows you to control the pyrolysis process. The obtained simulation results can be used in the design of pyrolysis machines and in solving a number of other engineering problems.

Keywords: solid coolant; semi-coke; pyrolysis; coal; temperature; heat transfer; modeling.

Введение. В связи с ростом цен на импортное топливо одним из приоритетных направлений развития республики является обеспечение энергетической безопасности за счет использования местных ресурсов. Решением этой проблемы может стать использование угля и горючих сланцев. Кыргызстан обладает огромными запасами дешевого местного топлива – угля [1-3].

Тем не менее, потребности топливно-энергетического комплекса республики покрываются за счет снижения объемов добычи местного угля и увеличения объемов импорта нефти, природного газа и угля для северных регионов республики [1, 4].

Экономический и технологический потенциал таких углей может быть реализован путем использования их как сырья для получения экологически «чистых» топливных продуктов с повышенными потребительскими свойствами. В этом случае выбросы вредных веществ при использовании таких продуктов из угля в разы ниже, чем в случае прямого их сжигания [1, 4].

Создание новых, экологически чистых продуктов переработки бурых углей, и вовлечение их потенциала в экономику страны, предопределили необходимость разработки технических систем для их производства. Важная роль в таких системах отводится пиролизным установкам [4-6].

В последнее время наблюдается устойчивая тенденция увеличения интереса как к твердым продуктам термической переработки угля, так и к

жидким или газообразным [2,3]. Недостаточная изученность технологии высокоскоростного пиролиза угля является основной причиной ее не востребоваемости в производстве. Отмеченные обстоятельства определяют актуальность проблемы разработки научно обоснованной теории, расчета и проектирования пиролизных установок со шнековыми напорными органами для скоростного полукоксования углей [1, 6].

Результаты моделирования нагрева дисперсных материалов представлены во многих работах, в том числе в работах [2,3, 7-11]. В [2, 3, 7] получено результатов на основе уравнения теплового баланса с помощью численного эксперимента установлено, что мелкая фракция сланца (1–7 мм) прогревается в течение 30–60 с и в дальнейшем становится источником тепла для более крупных частиц. При этом в интервале времени 500–600 секунд после подачи исходного сланца наступает режим теплового равновесия и происходит последующий процесс низкотемпературной карбонизации в режиме изотермической выдержки. В работах [2, 3, 11] представлена одномерная стационарная численная модель пиролиза угля твердым теплоносителем в движущемся слое, где показано, что размер частицы существенно влияет на скорость нагрева, а доля шихты является определяющим фактором пиролиза.

В основе идеи рассмотрения теплопередачи между частицами и жидкостью в пористой среде лежит одночастичный подход, т. е. ситуация рассмотрена для одной частицы. Соответствующие значения масштаба длины и скорости совместно с геометрической функцией достаточны, чтобы сопоставить результаты, полученные для одиночной частицы, с результатами для упаковки [2, 3, 11, 12].

В то время как смешанные частицы движутся в пиролизере со скоростью u_p , частицы угля нагреваются частицами теплоносителя. Термическое разложение происходило при нагревании частиц угля.

Перенос тепла в слое теплоносителя, который окружает частицы угля, настолько высок, а размер частиц угля достаточно мал, поэтому процесс считается изотермическим [13].

1. Уравнение теплового баланса запишем в виде:

$$m_{сл}c_{сл}(T_{сл} - T_{сл0}) = m_{тн}c_{тн}(T_{тн0} - T_{тн}) + Y_t\Delta H/Y_0, \quad (1)$$

где $m_{сл}, c_{сл}, T_{сл0}, T_{сл}$ - массовый расход (кг/с), теплоемкость, начальная температура и температура угля; $m_{тн}, c_{тн}, T_{тн0}, T_{тн}$ - массовый расход (кг/с), теплоемкость, начальная температура и температура теплоносителя.

Равновесная температура определяется из уравнения (1),

$$T_p = \frac{m_{тн}c_{тн}T_{тн0} + m_{сл}c_{сл}T_{сл0} + m_{сл}\Delta H Y_t/Y_0}{m_{тн}c_{тн} + m_{сл}c_{сл}}. \quad (2)$$

При $t=0$

$$T_{p0} = \frac{m_{тн}c_{тн}T_{тн0} + m_{сл}c_{сл}T_{сл0}}{m_{тн}c_{тн} + m_{сл}c_{сл}}. \quad (3)$$

При $t= \infty$

$$T_{p\infty} = \frac{m_{\text{ТН}}c_{\text{ТН}}T_{\text{ТН0}} + m_{\text{СЛ}}c_{\text{СЛ}}T_{\text{СЛ0}} + m_{\text{СЛ}}\Delta H}{m_{\text{ТН}}c_{\text{ТН}} + m_{\text{СЛ}}c_{\text{СЛ}}}. \quad (3)$$

Теперь системе будем подводить температуру $-T_p$. Тогда уравнение баланса (1) с помощью уравнения (2) можно преобразовать к виду

$$m_{\text{СЛ}}c_{\text{СЛ}}(T_{\text{СЛ}} - T_p) = -m_{\text{ТН}}c_{\text{ТН}}(T_{\text{ТН}} - T_p). \quad (4)$$

Или запишем в виде

$$(T_{\text{СЛ}} - T_p) = -k(T_{\text{ТН}} - T_p), \quad (5)$$

где

$$k = \frac{m_{\text{ТН}}c_{\text{ТН}}}{m_{\text{СЛ}}c_{\text{СЛ}}}. \quad (6)$$

В данном случае система охлаждается на величину температуры $-T_p$ (рис.1). При этом температура теплоносителя будут равна на $T_{\text{ТН}} - T_p$, а угля $T_{\text{СЛ}} - T_p$. В этом случае уравнение баланса будут имеет вид (5).

Анализ и моделирование

Пиролизер с подвижным слоем нагревался до определенной температуры, чтобы компенсировать потери тепла. После того, как теплоноситель была нагрета до желаемой температуры, горячий теплоноситель и уголь подавались в пиролизер с подвижным слоем с помощью шнековых питателей. Высокотемпературная зола и частицы угля смешивались под действием силы тяжести с помощью перегородок в смесительной секции, которая была оборудована в верхней части пиролизера [2, 3].

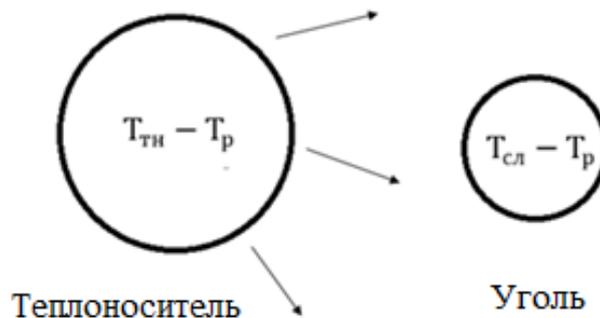


Рис.1. Модель системы.

В то время как смешанные частицы движутся в пиролизере со скоростью u_p , частицы угля нагреваются частицами теплоносителя. Термическое разложение происходило при нагревании частиц угля [11].

1. При нагреве частиц угля, кероген переходит в пластическое состояние, при этом выделяется смола, впоследствии распадающаяся на смесь жидких углеводородов - газ и кокс.

Следовательно, уравнение (1) становится [11, 13]

$$\frac{dY_t}{dz} = K_0 \text{Exp}\left(-\frac{E}{T_{\text{СЛ}}}\right) \frac{Y_0 - Y_t}{Y_0}, \quad (7)$$

где Y_0 - массовая концентрация керогена в частицах угля, K_0 - константа скорости разложения керогена; $T_{\text{СЛ}}$ - температура угля.

Уголь и теплоноситель предполагаются сферическими частицами диаметром $d_{сл}$ и $d_{тн}$. Частицы угля окружены соседними частицами теплоносителя в пиролизере. Площадь контакта между двумя сферическими частицами угля и теплоносителя зависит от размера частиц, деформации при нагреве, рабочих параметров и т. д. [11, 14]. Подход Лыкова [11] дает оценку радиуса контакта, а именно $d_{кон} = 0,2d_{сл}$. Исходя из этого, через R_{ac} выразим отношение площади контакта к площади поверхности угля.

Будем рассматривать единичной объём смешенной массы Θ коэффициентом поры ε . Тогда объемы теплоносителя $V_{тн}$ и угля $V_{сл}$ будет записаны как

$$V_{тн} = \frac{\theta(1 - \varepsilon)}{(1 + \theta)},$$

$$V_{сл} = \frac{1 - \varepsilon}{(1 + \theta)}.$$

Для каждой единичного объема, массы теплоносителя и угля может быть записана как $M_{тн}=m/(1+m)$ и $M_{сл}=1/(1+m)$, где m представляет собой отношение масс теплоносителя к углю в пиролизере, которая определяется по выражению:

$$m = \theta \frac{\rho_{тн}}{\rho_{сл}},$$

где $\rho_{сл}$ и $\rho_{тн}$ плотности угля и теплоносителя.

Площадь поверхности теплоносителя и угля может быть записана как

$$S_{тн} = \frac{6}{d_{тн}} \frac{\theta(1 - \varepsilon)}{(1 + \theta)},$$

$$S_{сл} = \frac{6}{d_{сл}} \frac{1 - \varepsilon}{(1 + \theta)}.$$

Конвективный теплообмен между теплоносителем и частицами угля определяется уравнением

$$dq_{кон} = \frac{2k_{сл}k_{тн}}{k_{сл} + k_{тн}} S_{сл} R_{кон} \frac{(T_{тн} - T_p) - (T_{сл} - T_p)}{d_{сл} + d_{тн}} d\tau, \quad (8)$$

где $k_{уг}$ и $k_{тн}$ теплопроводности частиц, теплоносителя и угля.

2. Конвекционный теплообмен между воздухом и частицами угля можно описать как

$$dq_v = \frac{\lambda}{\delta} S_{сл} (1 - R_{кон}) ((T_{тн} - T_p) - (T_{сл} - T_p)) d\tau, \quad (9)$$

где λ – теплопроводность воздуха и δ - толщина воздушной прослойки в поре, $T_{тн}$ - температура теплоносителя.

Для расчета теплообмена удобнее пользоваться коэффициентом теплоотдачи или критерием Нуссельта [15]

$$\delta = \frac{d_{сл}}{Nu}.$$

Радиационный теплообмен между поверхностью теплоносителя и угольных частиц зависит от разницы температур и представлено в виде

$$dq_{\text{рад}} = \beta \sigma S_{\text{сл}} (1 - R_{\text{кон}}) ((T_{\text{тн}} - T_{\text{р}})^4 - (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})^4) d\tau, \quad (10)$$

где σ - константа Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · °К⁴), и β - излучательная способность частицы. Уравнение радиационного теплообмена, для работы принято значение 0,8.

Таким образом, для решения задачи о выделении тепла в пиролизере получим следующее уравнения

$$m_{\text{сл}} c_{\text{сл}} d(T_{\text{сл}} - T_{\text{р}}) = dq_{\text{кон}} + dq_{\text{в}} + dq_{\text{рад}}, \quad (11)$$

$$m_{\text{тн}} c_{\text{тн}} d(T_{\text{тн}} - T_{\text{р}}) = -(dq_{\text{кон}} + dq_{\text{в}} + dq_{\text{рад}}), \quad (12)$$

$$dY_{\text{т}} = -K_0 \text{Exp} \left(-\frac{E}{T_{\text{уг}}} \right) \frac{Y_0 - Y_{\text{т}}}{Y_0} d\tau. \quad (13)$$

При начальных условиях $t=0, z=0, Y_{\text{т}}=0, T_{\text{тн}} = T_{\text{тн}0}, T_{\text{сл}} = T_{\text{сл}0}, T_{\text{р}} = T_{\text{р}0}$.

Постановка выше полученные формулы в уравнение (11) нам дает изменение тепла в сланце и теплоносителе

$$m_{\text{сл}} c_{\text{сл}} \frac{d(T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})}{d\tau} = A((T_{\text{тн}} - T_{\text{р}}) - (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})) + B((T_{\text{тн}} - T_{\text{р}})^4 - (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})^4); \quad (14)$$

$$m_{\text{тн}} c_{\text{тн}} \frac{d(T_{\text{тн}} - T_{\text{р}})}{d\tau} = -A((T_{\text{тн}} - T_{\text{р}}) - (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})) - B((T_{\text{тн}} - T_{\text{р}})^4 - (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})^4);$$

где

$$A = \frac{2k_{\text{сл}}k_{\text{тн}}}{k_{\text{сл}} + k_{\text{тн}}} \frac{S_{\text{сл}}R_{\text{кон}}}{d_{\text{сл}} + d_{\text{тн}}} + \frac{\lambda \text{Nu} S_{\text{сл}} (1 - R_{\text{кон}})}{d_{\text{сл}}},$$

$$B = \beta \sigma S_{\text{сл}} (1 - R_{\text{кон}}).$$

Используя выражение (5) дифференциальное уравнение (14) приведем к виду

$$m_{\text{сл}} c_{\text{сл}} \frac{d(T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})}{d\tau} = -\frac{A(k+1)}{k} (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}}) - B \frac{(k^4 - 1)}{k^4} (T_{\text{сл}} - T_{\text{р}})^4. \quad (15)$$

Пример: Характеристики теплоносителя: $\rho_{\text{тн}}=1550$ кг/м³; $c_{\text{тн}}=840$ Дж/кгК; $k_{\text{тн}}=0,29$; $T_{\text{тн}0}=1093$ К. Характеристики угля: $\rho_{\text{сл}}=1250$ кг/м³; $c_{\text{сл}}=1520$ Дж/кгК; $k_{\text{тн}}=0,19$; $T_{\text{сл}0}=293$ К.

В данном случае $T_{\text{р}0}=975,1$ К, $T_{\text{р}\infty}=936,5$ К.

Результаты численного решение уравнений (2), (7) показаны на рис. 2 и 3.

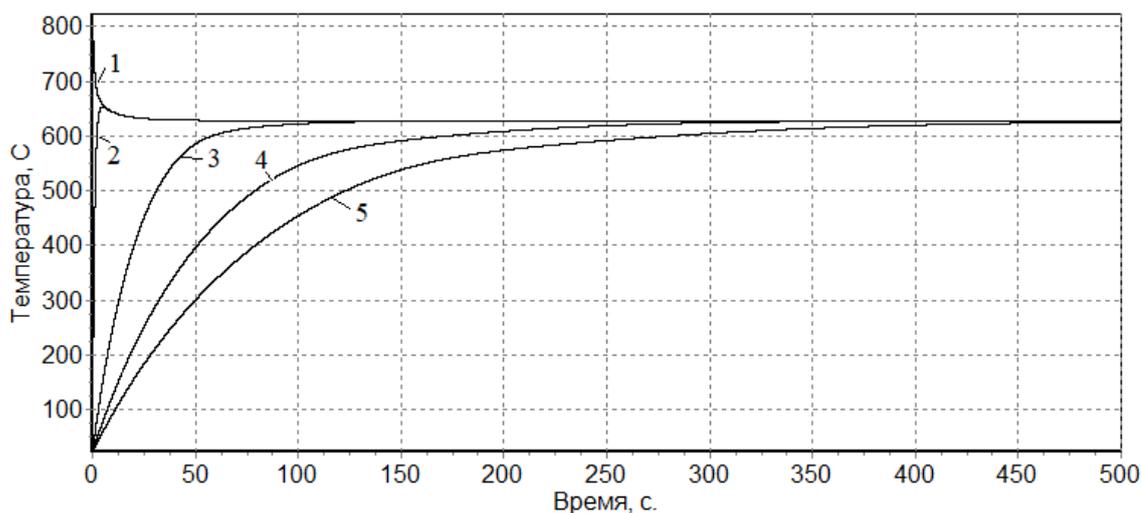


Рис. 2. Распределение температуры теплоносителя (1-диаметр частиц теплоносителя – 0,001 м) и угля при разных диаметрах частиц (2- 0,001 м, 3 - 0,005 м, 4- 0,008 м, 5 – 0,010 м).

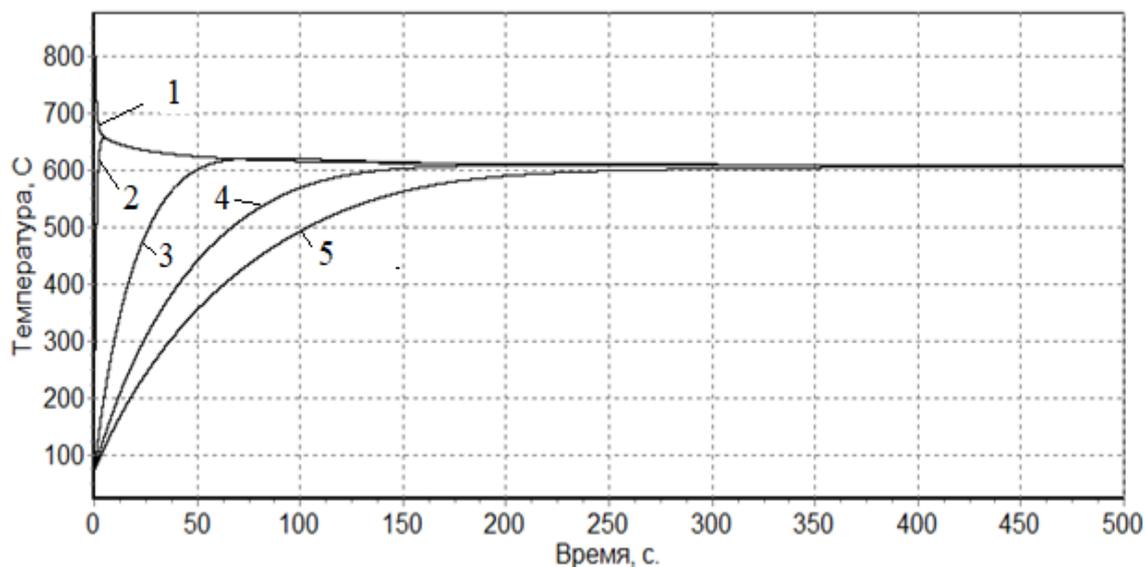


Рис. 3. Распределение температуры теплоносителя (1-диаметр частиц теплоносителя – 0,001 м) и угля при $\theta=4$ (диаметрах частиц угля: 2- 0,001 м, 3 - 0,005 м, 4- 0,008 м, 5 – 0,010 м).

На рис. 2, 3 показаны распределение температуры частиц угля при различном соотношении теплоносителя и угля в смеси. Зола является источником тепла для пиролиза. Чем больше теплоносителя, которая служит источникам тепла, тем выше температура пиролизера.

При этом улучшается теплоотдача между частицами смеси. Таким образом, результаты расчетов показывают, что температура частиц угля увеличивается с увеличением соотношения компонентов твердого теплоносителя и угля.

На этих рисунках показаны осевое распределение температуры частиц угля разного диаметра. Видно, что диаметр угля существенно влияет на

скорость нагрева в расчетах модели, так как важным параметром, определяющим площадь теплопередачи, является размер частиц угля. Очевидно, чем меньше размер частиц, тем больше площадь теплопередачи. Механизмы теплопередачи, связаны с размером частиц угля, более мелкие частицы угля будут нагреваться до более высокой температуры. Также можно увидеть, что увеличение содержания теплоносителя в смеси повышает время пиролиза угля.

Выходными данными являются время завершения пиролиза τ_i , каждой отдельной фракции при $\theta=6$, представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Время завершения пиролиза каждой отдельной фракции

Диаметр частиц сланца	Время
0,001м	6 с.
0,003м	45 с.
0,005м	140 с.
0,008м	350с.
0,01м	500с.

Разработана математическая модель пиролиза угля твердым теплоносителем в приближении, учитывающем разложение минеральных летучих веществ, которые дают возможность быстро рассчитать материальные и энергетические потоки, выявить и оценить факторы, влияющие на нагрев.

Предложенная модель учитывала все основные механизмы теплопередачи, такие как через теплопроводность при контакте между частицами в смеси, молекулярный теплопроводность воздушной прослойки и лучистый теплообмен.

Найденные формулы описывают поведение температур частиц теплоносителя и топлива-угля в зависимости от времени и дают возможность получать числовые значения показателей, характеризующих процесс термической переработки угля и может быть использована для оптимизации процесса полукоксования ископаемого угля.

Список литературы

1. Асанов А.А. Энергоэффективное использование углей Кыргызстана / А.А. Асанов. Бишкек: из-во «Инсанат», 2018.- 292 с.
2. Асанов А.А. Расчетно-теоретическое исследование механизмов теплообмена в процессе пиролиза угля / А.А. Асанов, Н.К.Джаманкызов, Б.Т.Мекенбаев // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2023. № 4 (68). С. 1730-1738.
3. Джаманкызов Н.К. Нагрев сыпучих материалов твердыми

- теплоносителями / Н.К. Джаманкызов, А.А.Асанов, Ю.Х. Исманов, Н. Т. Ниязов, Б.Т. Мекенбаев// Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2023. Т. 23. № 12. С. 68-78.
4. Асанов А. А. Переработка угля — основа новых технологий и энергетики Кыргызстана. — Бишкек : ИЦ «Текник», 2011 — 215 с.
 5. Асанов А.А. Развитие современных угольных технологий в Кыргызстане [Текст] / А.А. Асанов, А.А.Асанова, К.К.Орозов // Горный журнал (Россия). - М.: МГСУ. №6.2016. - С. 61- 65.
 6. Волков Э.П. Моделирование энерготехнологических процессов / Э.П. Волков, Г.Я. Герасимов. М., РАН, 2021. – 226 с.
 7. Simonov V. F. Development of algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent / V. F. Simonov, A. N. Mrakin, A. A. Selivanov, A. A. Morev, and O. V. Afanas'eva // Chemical and Petroleum Engineering.- Vol. 52.- Nos. 9–10.- January, 2017. (Russian Original Nos. 9–10, Sept.–Oct., 2016).
 8. Зройчиков Н.А. Экспериментальное исследование массообменных процессов при пиролизе горючего сланца в установках с твердым теплоносителем / Зройчиков Н.А., Потапов О.П., Фадеев С.А., Двоскин Г.И., Хасхачих В.В // Надежность и безопасность энергетики. - 2016.- №4.-С. 29-35.
 9. Морев А.А. Перспективные направления и способы переработки сернистых горючих сланцев Поволжья / А.А. Морев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/viewid=11638> (дата обращения: 26.02.2024).
 10. Герасимов Г. Я. Термическая деструкция твердого топлива в реакторе-пиролизере барабанного типа / Г. Я. Герасимов, Г. К. Тер-Оганесян // Физика горения и взрыва. - 2001.- т. 37.- № 3.- 70-75 с.
 11. Liang P. Simulation of coal pyrolysis by solid heat carrier in a moving-bed pyrolyzer / P. Liang, Z. Wang, J. Bi // Fuel.- №87. - 2008. - P. 435-442.
 12. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. М.: Физматлитература, 1962.- 456 с.
 13. Vanpuuyveld D.R. Dynamic modeling of retort thermodynamics of oil shales / D.R. Vanpuuyveld // Oil Shale. - 2007.-Vol.24.- No.4.- P. 509-525.
 14. Симонов В.Ф. Математическое описание блока полукоксования сернистых горючих сланцев поволжья в псевдооживленном слое/ В.Ф. Симонов, В.Г. Прелатов, А.А. Морев // Вестник СГТУ. 2011. № 1(54). Выпуск 3. С. 73-80.
 15. Баскаков А. П. Изучение теплообмена между частицами твердого мелкозернистого теплоносителя в засыпке / А. П. Баскаков, С. К. Корочкина. // Тепло- и массоперенос. Общие вопросы теплообмена. М.: Госэнергоиздат, 1963. - С. 660-667.

УДК 666.3

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ГЛАЗУРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОФАРФОРОВОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ

^{1,2} Касмамьтов Н.К., ¹Ласанху К.А., ¹Макаева К.М.

1-Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева НАН КР,
2- Кафедра физики и микроэлектроники ЕТФ Кыргызско-Российского
славянского университета им. Б.Н. Ельцина, г. Бишкек,
nurkas@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты по разработке и получению глазурованных высоковольтных фарфоровых керамик на основе местного сырья месторождений Кыргызской Республики. Приведены результаты исследований основных эксплуатационных свойств обожжённой высоковольтной фарфоровой керамики. Изготовлены различной конфигурации полупромышленные изделия, применяемые в энергосекторе Кыргызской Республики.

Ключевые слова: сырье, состав керамической массы, технология, высоковольтная фарфоровая керамика, свойства.

OBTAINING AND PROPERTIES OF GLAZED ELECTRO-PORCELAIN CERAMICS BASED ON LOCAL RAW MATERIALS

^{1,2} Kasmamytov N.K., ¹Lasankhu K.A., ¹Makaeva K.M.

1- Institute of physics named after academician J. Jeenbaev NAS KR,
2- Department of Physics and Microelectronics ETF Kyrgyz-Russian Slavic
University named after B.N. Yeltsin, Bishkek

Annotation. The work presents the results of the development and production of glazed high-voltage porcelain ceramics based on local raw materials from deposits of the Kyrgyz Republic. The results of studies of the main operational properties of fired high-voltage porcelain ceramics are presented. Semi-industrial products used in the energy sector of the Kyrgyz Republic have been manufactured in various configurations.

Key words: raw materials, composition of ceramic mass, technology, high-voltage porcelain ceramics, properties.

Введение

Интенсивное развитие электроэнергетики в Кыргызской Республике и её современные вызовы в энергосекторе требует в ближайшей перспективе иметь свои отечественные разработанные электроизоляционные материалы, причём в широком ассортименте и масштабе. Организация отечественного производства по выпуску высоковольтных фарфоровых керамик (ВФК) на основе местного сырья позволит в энергосекторе Кыргызстана осуществить импортозамещение

привозных электротехнических материалов на отечественные ВФК на основе местного минерального сырья. В настоящее время все виды электротехнических диэлектриков на 100% завозятся в Кыргызскую Республику из-за рубежа по мировым рыночным ценам. Энергосектор Кыргызской Республики в год из-за рубежа закупает электротехнических изделий более чем на 200 млн. сом. В связи с этим становится актуальным создание своих электроизоляционных материалов на основе местного сырья, учитывая интенсивное развитие гидроэнергетики, ЛЭПов, малых ГЭС, а также различных возобновляемых источников энергии.

Производство фарфоровых электротехнических изделий является одним из старейших и поэтому наиболее освоенных [1,2]. Технология производства фарфора позволяет использовать широко распространенные и недорогие виды минерального (природного) сырья, а также вторичное сырье. Отметим, что в Кыргызской Республике имеется в достаточном количестве все виды минерального сырья [7] для производства электротехнической высоковольтной керамики.

Спрос на электротехнические фарфоровые изделия в нашей республике очень высок, например, только наименований изделий порядка десяти тысяч. В этой связи для успешного устойчивого развития энергосистемы Кыргызстана и её независимости от других стран в Институте физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР были начаты научные исследования по выявлению пригодности местного минерального сырья месторождений Кыргызской Республики для разработки новых составов керамических масс ВФК на основе местного сырья и изучению их эксплуатационных свойств. Наряду с этим параллельно были начаты исследования по разработке керамической массы глазури, предназначенных для нанесения покрытий на поверхность опытных ВФК на основе местного сырья.

Современные вызовы устойчивого развития энергосистемы Кыргызстана требуют, изучить возможности получения ВФК на основе местного минерального сырья месторождений Кыргызской Республики, что будет способствовать развитию керамической промышленности Кыргызской Республики по выпуску собственной электротехнической керамики на базе местного сырья.

Основная цель работы: разработка новых керамических масс ВФК и получения соответствующих составов глазури с использованием местного минерального сырья месторождений Кыргызской Республики. Исследовать основные эксплуатационные свойства опытных составов глазурованных ВФК. Разработать технологические основы получения различных конфигураций изделий ВФК на основе местного сырья, применяемые в энергосекторе Кыргызской Республики.

Материалы и методика исследований

Опытные керамические массы различных составов ВФК приготавливались на основе компонентов местного сырья в виде керамической смеси методом «мокрого помола» в шаровой мельнице.

В таблицах 1 и 2 соответственно приведены разработанные опытные составы керамических масс ВФК и глазури на основе местного сырья месторождений Кыргызской Республики с добавками привозного сырья из России и Украины.

Таблица 1- Массовый состав новой керамической массы опытных ВФК на базе местного сырья

№	Сырьевые материалы	Керамическая масса, % мас.
1	Фарфоровый камень Уч-курт	70-75
2	Каолин Чоко-Булак	15-18
3	Глина украинская	8-10

Конечная тонина помола составляла 2-2,5% мас. Влажность шликерной керамической массы смеси ВФК в процессе помола поддерживали в пределах 50-55 % по массе, с требуемым добавлением воды. После завершения помола и ее обогащения, полученный шликер ВФК обезвоживали до остаточной влажности 22-24 %, которую далее вылеживали в течении 15 суток при нормальных условиях для улучшения гомогенности и однородности твердой и жидкой составляющих керамической массы, которая в свою очередь улучшило пластические свойства керамической массы.

Таблица №2 - Массовый состав глазури, нанесенный на поверхность опытной ВФК

№	Сырьевые компоненты глазури	Процентное содержание, %мас.
1	Полевой шпат (Вишневогорский)	35-40
2	Фарфоровый камень Уч-курт	15- 20
3	Циркониевый концентрат ($ZrO_2:SiO_2$)	10- 12
4	Доломит Ак- таш	13- 15
5	Кварцевый песок	16-19

Для проведения испытаний образцов ВФК на основные эксплуатационные свойства из приготовленной керамической массы ВФК были изготовлены образцы цилиндрической формы длиной 10 см и диаметром 10 мм с помощью самодельного лабораторного экструдера.

Также были изготовлены опытные глазурованные полупромышленные изделия ВФК, используемые в энергетической отрасли Кыргызской Республики. Полупромышленные изделия ВФК изготавливались по чертежам, представленные техническим отделом ОАО «Северэлектро» Кыргызской Республики. Опытные образцы и полупромышленные изделия сушили в естественных условиях при комнатной температуре до остаточной влажности менее 1% в течении 30 суток. После их окончательной сушки из спрессованных цилиндрических заготовок-полуфабрикатов ВФК вырезались

требуемой формы изделия ВФК соответствующих промышленному оригиналу по форме, но с уменьшенными размерами и окончательно отшлифовывались. Далее после дополнительной сушки полупромышленные изделия ВФК глазурировали методом напыления жидкой глазури на поверхность опытного полупромышленного изделия ВФК с помощью пульверизатора.

Обжиг опытных изделий ВФК проводили в электропечи, в которой встроена программное обеспечение процессов нагрева, выдержки и охлаждения. Обжиг опытных образцов ВФК проводили в открытом воздухе в одинаковых условиях (режимах) нагрева. Обжиг проводили для трех опытных партий образцов ВФК при температурах $T=1150^{\circ}\text{C}$, 1200°C и 1250°C с выдержками $t=0,5$ и 1 час. Опытные образцы ВФК устанавливались в рабочей камере электропечи на специальные огнеупорные столики. В связи с большим количеством серий экспериментов по обжигу опытных образцов ВФК нами в предварительных исследованиях проводились их обжиги в режиме ускоренного обжига [3].

Эксперимент показал, что обжиг опытных образцов ВФК исследуемых составов, при температурах 1150, 1200, 1250 и 1300°C придает им достаточно высокую водостойкость и механическую прочность. Отметим, что весь процесс обжига от нагрева до изотермической температуры рабочей выдержки и до остывания печи вместе с обожженными образцами ВФК до температуры $T=100^{\circ}\text{C}$ составляло всего 5 часов. При ускоренном обжиге ВФК нагрев осуществляется монотонно без промежуточных выдержек, а изотермическая выдержка при максимальной температуре обжига составляло всего 10 мин, после чего опытные образцы ВФК монотонно остывали вместе с печью до температуры $T=100^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч. Наряду с ускоренным обжигом в работе также проводились обжиги максимально приближенные к производственным для отобранных лучших составов ВФК полупромышленных изделий на базе местного сырья.

Результаты и их обсуждение

В таблице 3 приведены результаты экспериментальных исследований на основные физико-механические и электрические свойства для глазурированных опытных образцов ВФК на основе местного сырья.

Таблица 3 – Физико-технические свойства опытных образцов улучшенных составов ВФК

№	Наименование свойства	Единица измерения	Среднее значение
1	Электрическое пробивное напряжение	<i>кВт</i>	74
2	Водопоглощение	%	1,17
3	Плотность	<i>кг/м³</i>	2440

4	Прочность на трехточечный изгиб	МПа	72
5	Термостойкость	°С	160

Из таблицы 3 видно, что средние значения свойств по электрическому пробивному напряжению опытных образцов ВФК и другим физическим свойствам вполне соответствуют приведенным значениям в ГОСТе [6], что позволяет опытную ВФК на основе местного сырья классифицировать как электротехническую керамику подгруппы 110, имеющую в составе массовую долю Al_2O_3 до 30%.

Известно, что данный класс ВФК работает при постоянном и переменном напряжениях $1\div 35$ кВ с частотой до 100Гц. Из рис. 1а видно, что нанесенная глазурь на поверхность опытных изделий ВФК по цвету имеет достаточно хорошую белизну. Эксперимент показал, что изготовленные глазурованные ВФК изделия-изоляторы после обжига при температуре 1250-1300°С с выдержкой 0,5 часа сохраняют свою первоначальную форму. Видно, что глазурь на поверхности полупромышленных изделий ВФК ложится удовлетворительно, отсутствует дефект в виде «Цека», на поверхности обожжённых изделий отсутствует сетка микротрещин на поверхности глазури.



Рис. 1а,б. Общий вид глазурованных полупромышленных изделий ВФК различной конфигурации до обжига; б) после обжига.

Исследования показали, что глазурь разработанного состава в целом хорошо формируется на поверхности полупромышленных образцов ВФК и имеют хорошую адгезию с поверхностью черепка [4,5]. Однако можно отметить, что у опытных образцов ВФК на отдельных участках перегиба и ребер сложной формы изделия наблюдаются незначительные натёки глазури, которые связываются неравномерным нанесением толщины глазури на данном участке поверхности изделия ВФК в процессе ручного напыления пульверизатором. Для устранения этих недостатков в формировании глазури на ВФК в дальнейшем состав глазури и его приготовление было подкорректировано путем изменения количественного и компонентного состава, а также проведена оптимизирования процесса напыления глазури на поверхность изделия ВФК.

На рис.3 приведены полупромышленные глазурованные изделия ВФК после корректировки состава глазури и оптимизации процесса напыления глазури.



Рис.5. Глазурованные полупромышленные изделия ВФК после корректировки состава глазури.

Положительным и очень важным является то, что опытные полупромышленные изделия ВФК после обжига не имеют Цека - дефекта в виде сеточных микротрещин. Известно [1,2], что этот дефект категорически не допускается в электротехнических изделиях всех сортов.

Заключение

1. Разработан состав фарфоровой массы для получения опытных ВФК, состоящих на 90% - 95% по массе из сырья месторождений Кыргызской Республики.

2. Скорректирован состав электротехнических тугоплавких глазурей, предназначенные для нанесения на поверхность опытных ВФК, улучшающие её эксплуатационные свойства и товарный вид.

3. Показано, что высоковольтная керамика на базе местного сырья имеет: среднее пробивное напряжение 70 кВ, прочность на изгиб составляет 72 - 74 МПа, стойкость к термоударам составляет 160°К.

5. Проработаны все последовательные технологические стадии получения ВФК: подготовки сырья, режимы помола, формования, сушки, глазурования, включая и режимы обжига 1300-1320°С, позволяющая получать стабильные результаты обожженной ВФК при строгом соблюдении всех технологических стадий её изготовления.

Список литературы

1. Августиник А.И. Керамика // Изд. 2-е перераб. и доп. Ленинград: Стройиздат. -1975. - 592 с.

2. Масленникова Г.Н., Харитонов Ф.Я., и др. Технология электрокерамики. // м.: Энергия. – 1994. – 224 с.
3. Касмамытов Н.К., Календеров А.Ж., Макаева К.М., Ласанху К.А. Состав, технология получения, свойства высоковольтной фарфоровой керамики.// Бишкек: Материаловедение. – 2020. -№2. -С.19-26.
4. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Жанибеков М.Ж. Влияние добавочных компонентов в составе глазурей на физико-технологические свойства. // Бишкек: Научный журнал «Физика». – 2023. - №2. – С.24-28.
5. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Асанбеков Ш.К., Донбаев Н.Э. Формирование глазурей на поверхности черепка высоковольтной фарфоровой керамики на основе местного сырья.// Бишкек: Известие НАН КР. – 2023. -№2. – С.19-28.
6. Касмамытов Н.К., Макаева К.М., Асанбеков Ш.К., Донбаев Н.Э. Свойства глазурованной высоковольтной керамики с малым долевым содержанием глины Кара-кече.// Бишкек: Известие НАН КР. – 2023. - №2. – С.12-19.
7. Материалы керамические Электротехнические. Классификация и технические требования. / ГОСТ 20419 -83 (СТ СЭВ 3567-82). Государственный Стандарт РФ (Союза ССР) // М.: Издательство стандартов -1989. –13с.
8. Мосейко Т.И., Кулакова Н.В., Алексеева Н.Г./ Справочник. Минеральные ресурсы неметаллических полезных ископаемых Кыргызской Республики. Строительные материалы. // изд.-во: Министерства геологии и минеральных ресурсов Кыргызской республики. - Бишкек. -1996 – 385 с.

УДК 378

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ КАДРОВ

^{1,2}Н.К. Касмамытов

1-Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева НАН КР,
2- Кафедра физики и микроэлектроники ЕТФ Кыргызско-Российского
славянского университета им. Б.Н. Ельцина, г. Бишкек,
nurkas@mail.ru

Аннотация. В статье обсуждаются состояние, проблемы, вызовы, последствия и перспективы, имеющие место при подготовке специалистов высокой квалификации, в частности, кандидатов и докторов наук по физическим специальностям.

Ключевые слова: научные кадры, ученые степени, кандидаты и доктора наук, подготовка кадров

CHALLENGES AND PROSPECTS FOR SCIENTIFIC TRAINING

^{1,2} Kasmamytov N.K.

1- Institute of physics named after academician J. Jeenbaev NAS KR,
2- Department of Physics and Microelectronics ETF Kyrgyz-Russian Slavic
University named after B.N. Yeltsin, Bishkek

Annotation. The article discusses the state, problems, challenges, consequences and prospects that occur in the training of highly qualified specialists, in particular, candidates and doctors of science in physical specialties.

Key words: *academic staff, academic degrees, candidate and doctorate, preparation.*

Введение

Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики активно ведет подготовку научных специалистов высшей квалификации кандидатов и докторов наук, через аспирантуру, докторантуру и соискательство. В последнее десятилетие Институт физики готовит кандидатов и докторов физико-математических наук по трем научным направлениям: физика конденсированного состояния (01.04.07), оптика (01.04.05), теплофизика и теоретическая теплотехника (01.04.14). Национальной аттестационной комиссией при Президенте Кыргызской Республики в Институте физике им. академика Ж. Жеенбаева НАН КР совместно с КРСУ им. Б. Ельцина в течение ряда лет открывался докторский (кандидатский) диссертационный совет по защите диссертаций по трём вышеназванным научным направлениям. За последние 5 лет защищены 7 кандидатских диссертаций (без учета 2024 г.), причем все 7 защитившиеся соискателей, и получившие ученые степени кандидата физико-математических наук закончили 5 летнее высшее образование, т.е. среди них нет окончившие магистратуру. Последний факт можно объяснить тем, что за период 2011-2024 гг. выпущено ВУЗаами ничтожно малое число магистрантов по физической специальности.

Важно понимать, что подготовка научных кадров высшей квалификации через аспирантуру и докторантуру всегда и во все времена выступала как высокопоставленный элемент научно-образовательной системы Кыргызстана, действующий не только в академических научных Институтах, но и в Высших учебных заведениях.

В настоящее время в аспирантуру принимаются лица, имеющие диплом специалиста или магистра, в соответствии с действующими нормативами [1]. Диплом специалиста получали студенты, после пятилетнего обучения в ВУЗах. Диплом Магистра получают студенты после двух летнего обучения в магистратуре, организованные при ВУЗах как вторая ступень обучения после завершения четырех летнего обучения в бакалавриате данного ВУЗа. Начиная с 2009 года в образовательной системе Кыргызстана перестали

выпускать специалистов с пятилетним высшим образованием и теперь выпускники вузов получают степени бакалавра (после 4 лет обучения) и магистра (после 2 лет дополнительного образования). Это кардинальное изменение в высшей образовательной системе Кыргызской Республики связано с тем, что в 2003 году были подписаны документы о вхождении Кыргызского образования к Болонской системе образования, действующая в европейском пространстве. В 2011 году 11 ведущих ВУЗов Кыргызстана полностью перешли на двухуровневую систему болонского обучения.

Известно, что в рамках Болонской системы образования весь процесс обучения включает три уровня: бакалавриат, магистратуру и докторантуру, где на конечном третьем уровне обучения завершается получением степени PhD (доктора философии) после защиты выпускного эссе в одном из европейских вузов.

Сразу следует отметить, что степень доктора философии PhD может быть условно приравнена к ученой степени кандидата наук. Однако, ученая степень доктора философии существенно отличается от степени доктора наук постсоветского образования и соответственно, продолжаясь действовать в Кыргызской Республике. Не вызывает сомнения, что ученая степень доктора наук требует более обширных интеллектуальных исследований при решении той или иной научной проблемы и значительного научного вклада.

В Кыргызстане сложилась ситуация, когда выпускники, получившие степень PhD доктора философии за рубежом, претендуют на ту же позицию с кандидатами наук, что вызывает вопросы о справедливости оплаты и признании квалификаций. Хотя ученая степень доктора философии PhD считается высшей ученой степенью в рамках болонской системы образования.

Однако в образовательной системе Кыргызской Республики продолжает функционировать аспирантура и докторантура, оставшееся от Советской системы образования. Не секрет и воочию видно, что требования к докторским диссертациям в постсоветской системе значительно выше, чем к доктору философии PhD, особенно в отношении решения научной проблемы, объема исследований и научных публикаций.

Ситуация в области физики: проблемы и вызовы

По данным последних пяти лет (2019–2023 гг.), учёные Института физики НАН КР проводят активную работу по привлечению молодых специалистов в области физики твёрдого тела. Лаборатории института, такие как «Порошковые материалы», «Сверхтвёрдые материалы», «Кристаллофизика и радиометрия», вносят значительный вклад в научные исследования, готовя специалистов для различных секторов экономики Кыргызстана, а также для отечественных и зарубежных университетов. Однако процесс подготовки аспирантов сталкивается с рядом проблем.

Одной из основных проблем является набор студентов на физические специальности в вузах Кыргызстана. Например, в 2024 году в Кыргызско-Российском Славянском университете по специальности «Физика» не было подано заявление на обучение ни одного студента, что затрудняет будущие

выпуски бакалавров и магистров по физическим специальностям. Падение интереса к физике среди школьной молодёжи частично вызвано нехваткой квалифицированных преподавателей физики в школах и отсутствием выпускного экзамена по этому предмету.

В советские времена 1980-90 гг. только один физический факультет Кыргызского государственного университета выпускал около 120–125 специалистов физиков в год, но даже тогда в школах ощущалась нехватка учителей физиков. Сегодня, несмотря на активное строительство новой школы, проблема нехватки преподавателей физиков остается очень острой, и их занятия во многих средних школах заменяют учителя математики и химии и других дисциплин, что отрицательно сказывается на качестве преподавания физики.

Последствия и перспективы

Отсутствие достаточного набора студентов-физиков в бакалавриаты ВУЗов, например в КРСУ им. Б.Н.Ельцина на 2024-2025 учебный год не набрала ни одного студента на бюджет и на контракт по специальности «Физика», и в других ВУЗах этот тренд снижения набора по специальности физика очевидно приведет в будущем к серьезным последствиям, в частности отсутствию обучающихся по направлению «Физика» в магистратуре и соответственно в аспирантурах ВУЗов и академических научных институтах, а следовательно не будет подготовки и выпуска кандидатов наук по физическим наукам.

Институт физики НАН КР в 2024 году запланировало принять всего 2-х аспирантов, и это далеко не факт, что они появятся, поскольку выпускников магистров по физическим специальностям за последние два три года практически нет. Поступают в аспирантуру только оставшиеся специалисты физики окончившие ранее пятилетнее специальное высшее образование и единицы ранее окончивших магистратуру. Такая ситуация в ближайшей перспективе ставит под угрозу подготовку не только кандидатов наук и докторов наук. При такой тенденции развития ученого образования может отрицательно сказаться на развитии фундаментальной и прикладной физической науки в целом в Кыргызской Республике.

Для решения этих проблем необходимо обеспечить достаточное финансирование науки и образования, модернизировать научное оборудование, поддержать интеграцию в развитие исследовательских проектов и повысить престиж учёной профессии. За последние 30 лет финансирование физико-технического направления науки в академических Институтах количественно сравнивали с финансированием гуманитарных наук и в бюджете закладывается только одна статья низкая заработная плата, что явно недостаточно для развития физических наук, требующие дорогостоящее исследовательское оборудование, материалы и т.д.

Также важно привлекать молодёжь к научной деятельности посредством доступных и интересных образовательных программ, а также улучшать условия

труда молодых учёных, чтобы предотвратить их массовый отток в другие сферы экономики, а также эмиграцию за границу.

Заключение

Ситуация с подготовкой научных кадров в области физики требует немедленного государственного внимания и реформ. Без достаточного увеличения финансирования, модернизации физико-технических лабораторий, повышения уровня образовательных программ и повышения престижа научной деятельности Кыргызстан в ближайшем будущем будет испытывать катастрофическую нехватку научных кадров с учёными степенями, инженеров-физиков, физиков-преподавателей и в целом рискует потерять физическую науку и свое место в мировом научном сообществе. Только скоординированные усилия государства, академического сообщества и бизнеса позволяют сделать вызовы более эффективными и обеспечить устойчивое развитие физической науки в будущем.

Список литературы

1. Постановление Правительства Кыргызской Республики № 327 Нормативное положение: «О подготовке научно-педагогических и научных кадров в Кыргызской Республике» от 16 июля 2018 года. / <https://cbd.minjust.gov.kg/12205/edition/885595/ru>.

УДК: 621.78

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ МАРКИ 65Г И 45 ДО И ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Рахадиллов Б. К.¹, Кусаинов Р. К.², Бақыт Ж. Ә.², Шынарбек А. Б.², Орманбеков К. Д.², Кадырболат Н. Е.², Мусатаева Н. Е.², Коц В. Н.²

¹ Восточно-Казахстанского университета им. С. Аманжолова, 070002, Республика Казахстан, г. Оскемен, л.30-ой Гвардейской дивизии, 34, e-mail: rakhadilovb@mail.ru

² Университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, Семей, ул. Глинки 20а, e-mail: rinat.k.kus@mail.ru

Аннотация: В данной статье представлены результаты исследований коррозионной стойкости сталей марок 65Г и 45, которые были подвергнуты обработке методом электролитно-плазменного упрочнения (ЭПУ). Основной целью исследования было выявление изменений в коррозионных свойствах сталей в зависимости от типа среды: воды, карбамида, суперфосфата и аммиачной селитры. Исследование показало, что после ЭПУ скорость коррозии стали 45 снизилась в 8 раз по сравнению с исходным образцом, достигая значения $2,58 \times 10^{-4}$ мм/год. Для стали 65Г также наблюдалось значительное улучшение

коррозионной стойкости, особенно в среде карбамида и суперфосфата. Коррозионный потенциал данных сталей сместился в более положительное значение, что указывает на улучшение защитных свойств поверхности. Поляризационные кривые показали уменьшение коррозионного тока для стали 45 с $0.05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ в водной среде до $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ в карбамиде, и до $0.30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ в суперфосфате. Для стали 65Г после ЭПУ, коррозионный потенциал в водной среде составил 10^{-7} В, уменьшаясь до 5×10^{-6} В в карбамиде и до 10^{-5} В в суперфосфате. Результаты подтверждают, что ЭПУ значительно повышает коррозионную стойкость исследуемых сталей, что делает этот метод обработки перспективным для улучшения долговечности металлических изделий, используемых в агрессивных химических условиях.

Ключевые слова: электролитно – плазменное упрочнение, сталь 45, коррозия, износостойкость, электрохимическая коррозия.

STUDY OF CORROSION CHARACTERISTICS OF 65G AND 45 STEELS BEFORE AND AFTER ELECTROLYTIC-PLASMA HARDENING

Rakhadilov B.K.¹, Kusainov R.K.², Bakyt Zh.A.², Shynarbek A.B.²,
Ormanbekov K.D.², Kadyrbolat N.E.², Musatayeva N.E.², Kots V.N.²

¹ East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, 070002, Republic of Kazakhstan, Oskemen, 1.30th Guards Division, 34, e-mail: rakhadilovb@mail.ru

² Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinka 20a, e-mail: rinat.k.kus@mail.ru

Abstract: This article presents the results of studies of the corrosion resistance of steel grades 65G and 45, which were subjected to electrolytic plasma hardening (EPH). The main objective of the study was to identify changes in the corrosion properties of steels depending on the type of environment: water, urea, superphosphate and ammonium nitrate. The study showed that after EPH, the corrosion rate of steel 45 decreased by 8 times compared to the original sample, reaching a value of 2.58×10^{-4} mm/year. For steel 65G, a significant improvement in corrosion resistance was also observed, especially in the environment of urea and superphosphate. The corrosion potential of these steels shifted to a more positive value, indicating an improvement in the protective properties of the surface. Polarization curves showed a decrease in the corrosion current for steel 45 from $0.05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in an aqueous medium to $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in urea, and to $0.30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in superphosphate. For steel 65G after EPU, the corrosion potential in an aqueous medium was 10^{-7} V, decreasing to 5×10^{-6} V in urea and to 10^{-5} V in superphosphate. The results confirm that EPU significantly increases the corrosion resistance of the studied steels, which makes this treatment method promising for improving the durability of metal products used in aggressive chemical conditions.

Keywords: electrolytic plasma hardening, steel 45, corrosion, wear resistance, electrochemical corrosion.

Введение. Исследование коррозионной стойкости сталей играет ключевую роль в разработке и улучшении технологий их обработки и применения в различных отраслях промышленности. Стали марок 65Г и 45 обладают высокими механическими свойствами и широко используются в машиностроении и других сферах, где требуется долговечность материала в агрессивных условиях. Однако, увеличение срока службы таких сталей

возможно не только за счёт классических методов термической обработки, но и с помощью современных методов поверхностного упрочнения, таких как электролитно-плазменное упрочнение (ЭПУ) [1-4].

Целью данной работы является изучение изменений коррозионных характеристик сталей марок 65Г и 45 после обработки методом ЭПУ. Электролитно-плазменное упрочнение представляет собой инновационный подход, который позволяет значительно повысить коррозионную стойкость и усталостные свойства металлов за счет формирования на их поверхности защитного слоя. Особенность данной технологии заключается в использовании плазмы, создаваемой в водном растворе электролита, что обеспечивает одновременно высокую эффективность и экологичность процесса [5, 6].

В ходе исследования были проведены серий экспериментов, включая коррозионные испытания в различных агрессивных средах. Была проведена электрохимических коррозионных испытаний образцов с различными условиями обработки. Образцы были обработаны при разных параметрах ЭПУ, и испытывались с применением 3 % водных растворов пищевой соли (NaCl) и мочевины ((NH₂)₂CO) и других агрессивных сред. Целью данного исследования было изучение влияния ЭПУ на коррозионную стойкость образцов из сталей марок 45 и 65Г [7-9].

Ожидается, что результаты работы позволят не только оценить эффективность ЭПУ в отношении повышения коррозионной стойкости сталей, но и разработать рекомендации по оптимизации параметров обработки для промышленного применения.

Материалы и методы. Испытания были проведены с использованием электрохимической коррозионной системы, состоящей из потенциостата-гальваностата и электрохимической ячейки, в которой образцы были погружены в водный раствор лабораторной пищевой соли для первой группы испытания образцов из стали марки 45 и минеральных удобрении для второй группы испытания для образцов из сталей марок 45 и 65Г (рисунок 1). Для каждого образца была измерена кривая поляризации, которая отражает зависимость коррозионного потенциала от плотности тока коррозии. Кривая поляризации является важным инструментом для изучения коррозионной стойкости материалов. Она позволяет определить коррозионный потенциал и ток коррозии, которые являются ключевыми параметрами, характеризующими коррозионную стойкость материала. Коррозионный потенциал является мерой термодинамической склонности материала к коррозии, а ток коррозии отражает скорость коррозии [9, 10-14].

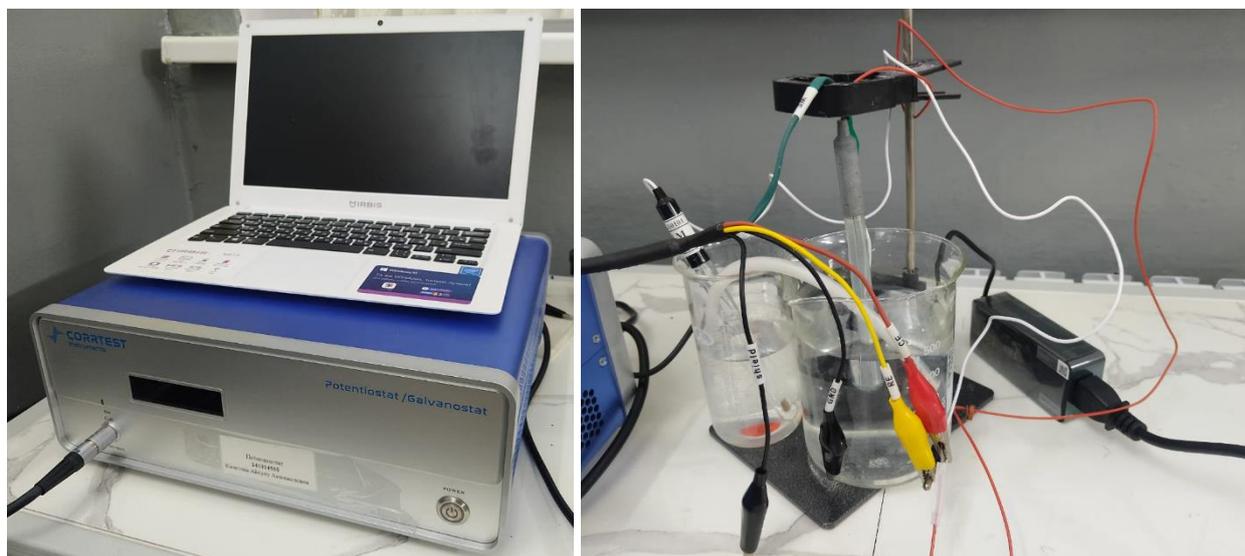


Рис. 1. Потенциостат-гальваностат и электрохимическая ячейка.

ЭПУ сталей марок 45 и 65Г были проведены в термоциклическом режиме, который осуществляется путем чередования высоких (UH) и низких напряжений (UL). Этот метод позволяет контролировать процесс нагрева и избегать переплавления стали, обеспечивая при этом формирование закаленного слоя большей глубины. Использование термоциклирования направлено на исследование влияния скорости нагрева на характеристики упрочнения.

При чередовании напряжений удастся точно регулировать температурные изменения в процессе закалки, что критично, так как слишком быстрый нагрев может привести к неравномерным микроструктурным изменениям и потенциальному перегреву, тогда как слишком медленный нагрев может не достичь нужной глубины и равномерности закаленного слоя. Электролит для ЭПУ состоял из 20% карбоната натрия и 80% дистиллированной воды, что дополнительно улучшает контроль над электрохимическими условиями, напрямую влияющими на генерацию тепла и результативные микроструктурные преобразования в стали. Данный режим позволяет проводить глубокий анализ того, как различные скорости нагрева влияют на свойства закаленного слоя, включая его толщину, твердость и микроструктурные характеристики. Электрические и временные параметры ЭПУ в режиме термоциклирования приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры режимов ЭПУ сталей 45 и 65Г

Образец	U_{H1} , В	t_{H1} , с	I_{H1} , А	U_{L1} , В	t_{L1} , с	U_{H2} , В	t_{H2} , с	I_{H2} , А	U_{L2} , В	t_{L2} , с	U_{H3} , В	t_{H3} , с	I_{H3} , А
45_1	320	3	100	50	5	0	0	0	50	5	0	0	0
45_2	320	3	100	50	5	200	2	75	50	5	0	0	0
45_3	320	3	100	50	5	200	2	75	50	5	200	2	75

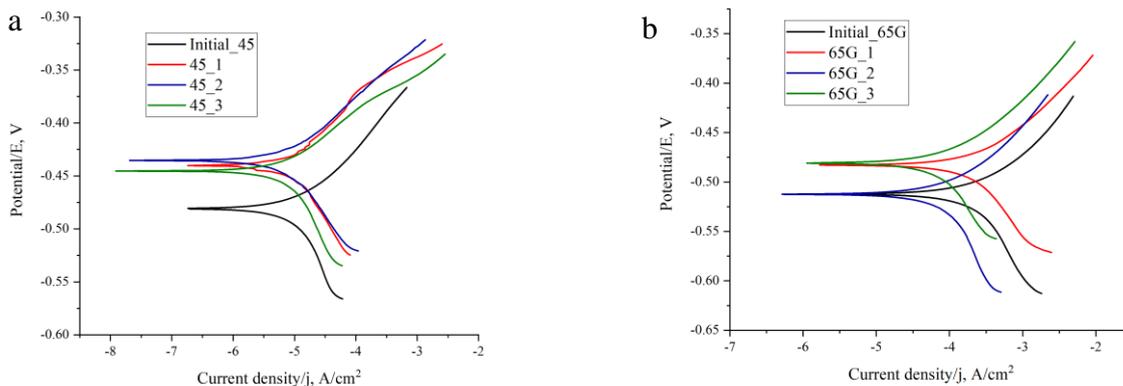
65Г_1	320	3	100	50	5	0	0	0	50	5	0	0	0
65Г_2	320	3	100	50	5	200	2	75	50	5	0	0	0
65Г_3	320	3	100	50	5	200	2	75	50	5	200	2	75

Для исследования коррозионной характеристики сталей марки 65Г и 45 после электролитно-плазменного упрочнения в средах минеральных удобрений образцы были обработаны ЭПУ согласно таблице 2.

Таблица 2 – Параметры режимов ЭПУ для образцов коррозионного теста в средах минеральных удобрений

Образец	Площадь анода	Содержание электролита	Расход электролита, л/мин	U, В	t, с
Сталь 45	0,05м ²	20% Na ₂ CO ₃ +80% Вода	100	300	4
Сталь 65Г	0,05м ²	20% Na ₂ CO ₃ +80% Вода	100	300	4

Результаты исследования и выводы. На рисунке 2 представлены поляризационные кривые в координатах потенциал – плотность тока (E – i) при измерении коррозии сталей марок 45 и 65Г до и после ЭПУ согласно режимам таблицы 1.



а – сталей 45 до и после ЭПУ и б – сталей 65Г до и после ЭПУ
Рис. 2. Потенциодинамические поляризационные кривые.

Тест на коррозионную стойкость показал значительное снижение скорости коррозии после электролитно-плазменного упрочнения сталей 45 и 65Г. У образцов 45_2 и 65Г_3 (средняя скорость коррозии $2,58 \cdot 10^{-04}$ мм/год) этот показатель улучшился в 8 раз по сравнению с исходным образцом.

В то же время, для образцов 45_1 и 65Г_1 уменьшение скорости коррозии было менее выраженным. Анализ поляризационных кривых, показывающих зависимость потенциала коррозии от тока коррозии, подтверждает, что потенциал коррозии для образцов №2-3 сместился в более положительную

сторону по сравнению с исходным образцом, что свидетельствует о повышенной коррозионной стойкости.

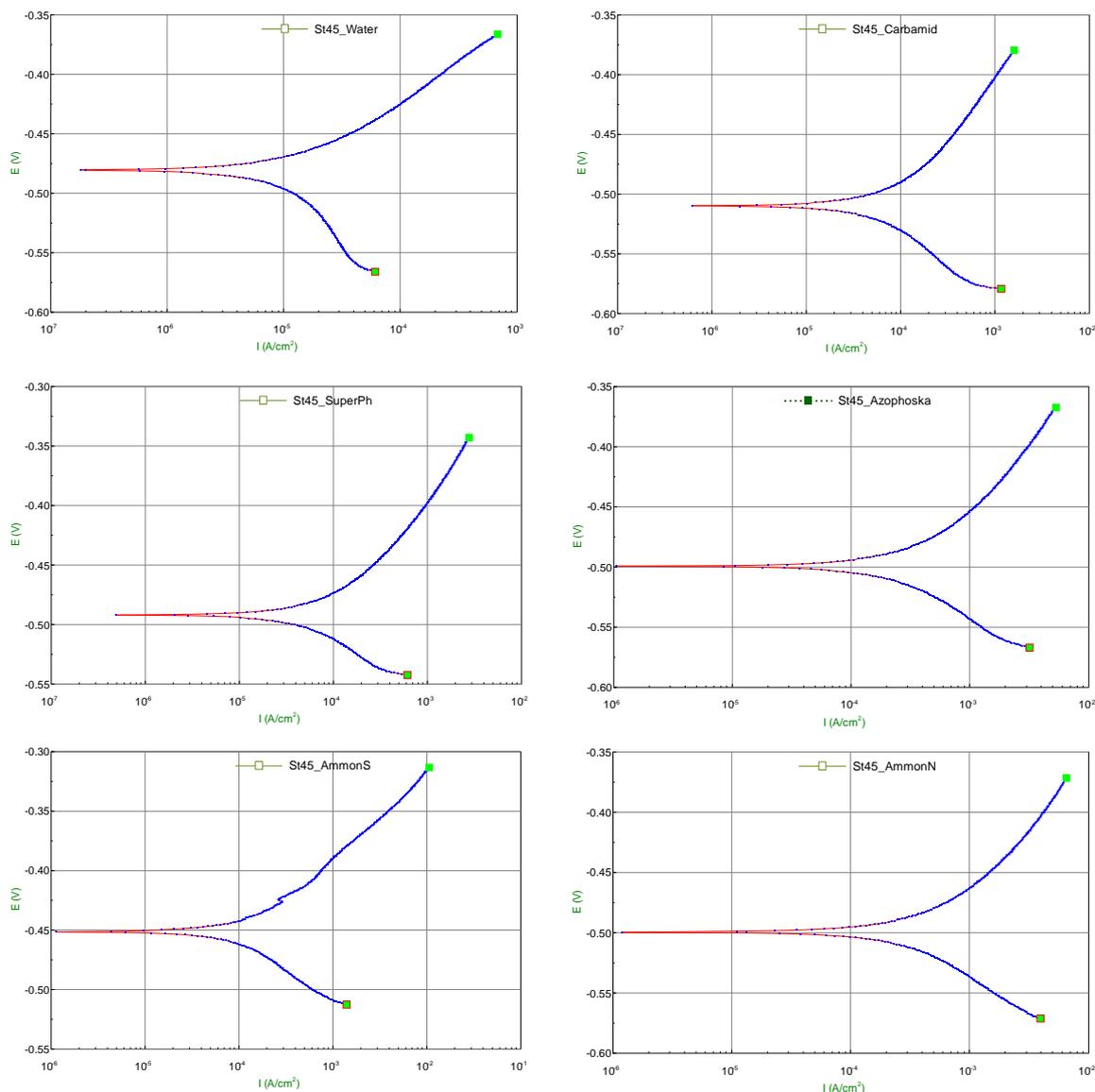


Рис. 3. Поляризационные кривые, полученные при электрохимических коррозионных испытаниях стали 45 после ЭПУ в воде и растворах минеральных удобрений.

Исследования коррозионной стойкости образцов из сталей марок 45 и 65Г до и после ЭПУ показали значительные изменения в поведении материала в различных коррозионных средах [15, 16]. После ЭПУ образуется на поверхности металла модифицированный слой, который повышает устойчивость к коррозии. Это связано с изменением микроструктуры стали, включая уплотнение и увеличение количества карбидных фаз, которые затрудняют проникновение коррозионных агентов в глубинные слои материала.

Эффект упрочнения достигается за счёт формирования высокотемпературных фаз и воздействия на металл, что позволяет не только увеличить твердость поверхности, но и изменить химическую и фазовую

стабильность стали. При этом поверхностный слой становится более однородным и плотным, что предотвращает образование коррозионных очагов и протекание процессов, ведущих к разрушению материала под воздействием агрессивных сред. На рисунке 3 представлены поляризационные кривые, полученные при электрохимических коррозионных испытаниях стали 45 после ЭПУ.

В ходе экспериментов было установлено, что после ЭПУ сталь 45 проявляет повышенную устойчивость в средах, содержащих минеральные удобрения, такие как карбамид, суперфосфат и аммиачная селитра. Это объясняется формированием на поверхности стали сложных защитных структур, которые эффективно блокируют коррозионные процессы. Подобное изменение свойств представляет большой интерес для применения в сельскохозяйственном оборудовании и в условиях высокой химической агрессивности.

На основе предоставленных данных из рисунка 3 и таблицы 3 можно сделать следующие выводы о коррозионной стойкости стали 45 после электролитно-плазменного упрочнения (ЭПУ) в различных средах. В водной среде сталь 45 показала относительно низкий коррозионный ток ($0.05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), что указывает на умеренную коррозионную активность. Коррозионный потенциал (-400 мВ) также находится в диапазоне, который не является слишком агрессивным для этого типа стали. В среде карбамида наблюдается увеличение коррозионного тока до $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, что может свидетельствовать о более высокой коррозионной активности по сравнению с водной средой. Однако потенциал коррозии (-350 мВ) выше, что может указывать на более стабильное состояние защитного слоя на поверхности стали. Испытательные среды из минеральных удобрений суперфосфата и азофоски показали более высокие значения коррозионного тока (0.30 и $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ соответственно), что говорит о значительно увеличенной коррозионной активности. Особенно высокий коррозионный потенциал в суперфосфате (-480 мВ) подчеркивает повышенную агрессивность этой среды.

Таблица 3 – Значения коррозионного тока (I_{corr}) и коррозионного потенциала (E_{corr}) для стали 45 после ЭПУ в различных средах

Среда	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{corr} (mV)
Вода	0.05	-400
Карбамид	0.10	-350
Суперфосфат	0.30	-480
Азофоска	0.25	-460
Сульфат аммония	0.20	-450
Аммиачная селитра	0.25	-470

При испытании в средах сульфата аммония и аммиачной селитры были наблюдаемы повышенные коррозионные токи (0.20 и $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) и сопоставимые с азофоской коррозионные потенциалы. Это указывает на

возможное ускорение коррозионных процессов под воздействием аммиачных соединений.

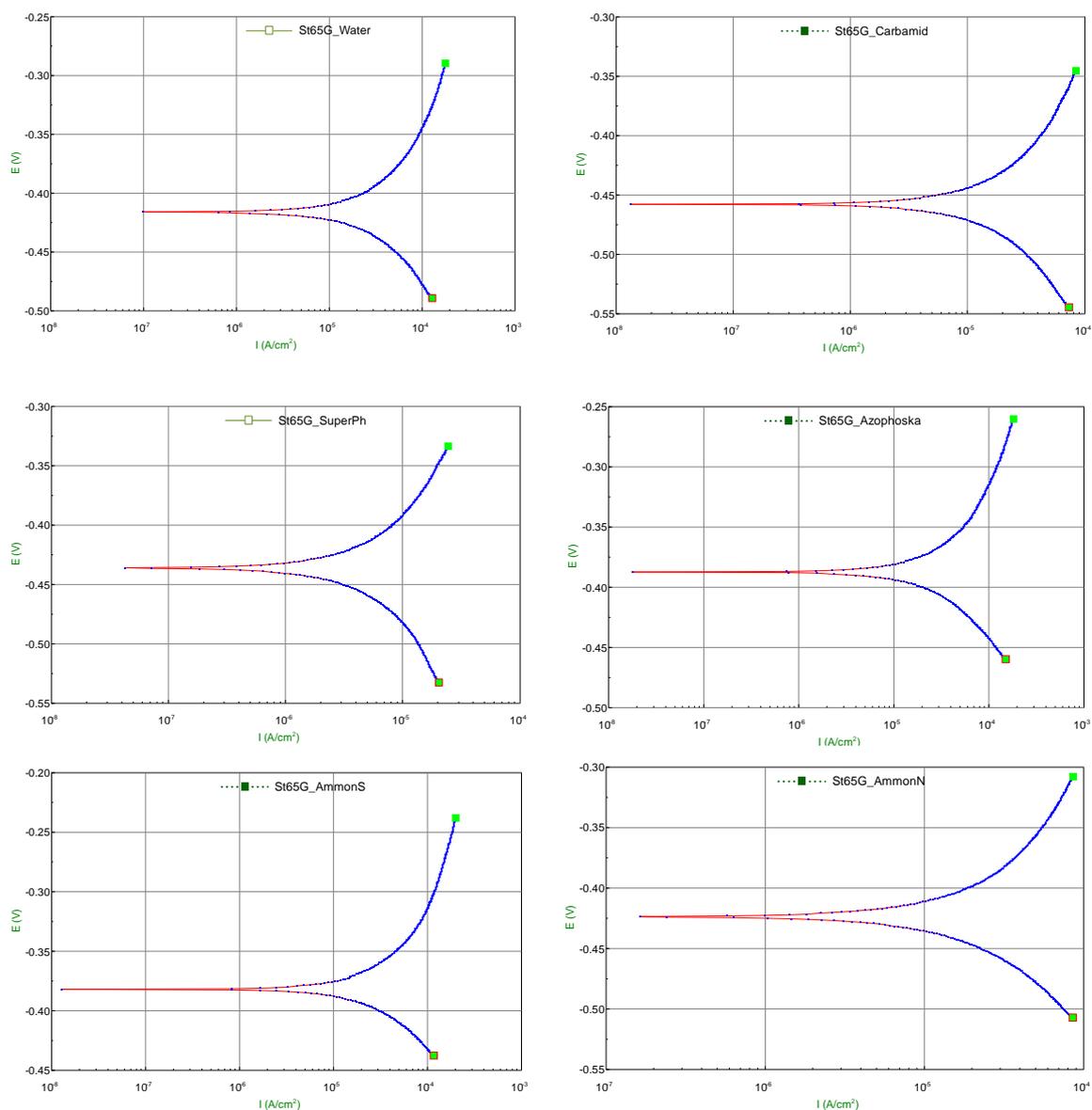


Рис. 4. Поляризационные кривые, полученные при электрохимических коррозионных испытаниях стали 65Г после ЭПУ в воде и растворах минеральных удобрений.

Анализ показывает, что сталь 45 после ЭПУ демонстрирует различную стойкость к коррозии в зависимости от химического состава среды [17, 18]. Наиболее агрессивным воздействием обладают минеральные удобрения, такие как суперфосфат и азофоска, в то время как в водной и карбамидной средах сталь проявила большую стойкость к коррозии. Это предполагает, что при выборе условий эксплуатации для обработанных ЭПУ деталей следует учитывать химическую природу контактирующих с ними сред.

На представленном рисунке 4 демонстрируются поляризационные кривые, полученные в ходе электрохимических коррозионных испытаний стали 65Г после ЭПУ. Исследование проводилось также в различных средах, включая воду и растворы минеральных удобрений, таких как карбамид, суперфосфат,

азофоска, сульфат аммония и аммиачная селитра. Эти кривые представляют собой зависимость коррозионного потенциала (E , вольты) от плотности тока коррозии (I , А/см²), что позволяет оценить коррозионную стойкость материала в данных условиях.

Каждая кривая на графиках показывает уникальное поведение стали в конкретной среде. Например, кривые для растворов карбамида и сульфата аммония демонстрируют более высокие значения коррозионного потенциала по сравнению с образцами, погруженными в чистую воду. Это указывает на различное воздействие химического состава сред на процессы коррозии. В то время как в воде коррозионный потенциал более отрицательный, добавление удобрений способствует образованию более стойких пассивных слоев на поверхности стали 65Г. Эти данные важны для понимания влияния ЭПУ на коррозионную стойкость стали 65Г в различных операционных условиях.

Значения коррозионного потенциала (E_{corr}) и коррозионного тока (I_{corr}) поляризационных кривых для стали 65Г после ЭПУ при электрохимических коррозионных испытаниях в минеральных растворах представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коррозионного тока (I_{corr}) и коррозионного потенциала (E_{corr}) для стали 65Г после ЭПУ в различных средах

Среда	I_{corr} (А/см ²)	E_{corr} (V)
Вода	-0.25	1×10^{-7}
Карбамид	-0.30	5×10^{-6}
Суперфосфат	-0.30	1×10^{-5}
Азофоска	-0.30	1×10^{-5}
Сульфат аммония	-0.25	3×10^{-6}
Аммиачная селитра	-0.25	1×10^{-6}

В средах карбамида и азотных удобрений (азофоска, сульфат аммония, аммиачная селитра) наблюдается увеличение коррозионного тока, что свидетельствует о повышенной скорости коррозионных процессов по сравнению с водой. Это может быть связано с агрессивным воздействием ионов аммония и других компонентов удобрений на сталь.

Испытания в среде суперфосфата показывает схожие с азофоской значения коррозионного тока, что также указывает на агрессивное воздействие фосфорсодержащих соединений на упрочненную сталь 65Г.

Экспериментальные исследования сталей марок 45 и 65Г после ЭПУ в различных средах минеральных удобрений показали отличия в характеристиках коррозии. Поляризационные кривые, полученные в результате электрохимических испытаний, предоставляют количественные данные о потенциале коррозии E_{corr} и плотности коррозионного тока I_{corr} , которые являются ключевыми показателями коррозионной стойкости материала в различных химических средах.

Для стали 45 результаты указывают на улучшение коррозионной стойкости после ЭПУ при воздействии сред, таких как вода и карбамид, по сравнению с более агрессивными средами, такими как нитрат аммония и

суперфосфат. Процесс ЭПУ, как правило, увеличивает поверхностную твердость и изменяет химический состав поверхности, что может улучшить стойкость к локализованной коррозии, но также может сделать сталь более восприимчивой к определенным агрессивным агентам в зависимости от условий окружающей среды и состава электролита, использованного во время упрочнения.

В сравнении, сталь 65Г показывает аналогичные тенденции, но с различиями в степени улучшения коррозионной стойкости. Эффективность ЭПУ в увеличении коррозионной стойкости стали 65Г значительно заметна в средах, содержащих сульфаты и фосфаты, которые обычно встречаются в сельскохозяйственной деятельности [19-22].

Выводы. Электролитно-плазменное упрочнение модифицирует характеристики поверхности, приводя к образованию более плотного, защитного слоя, который может лучше противостоять коррозионному действию таких химических веществ. Выбор марки стали (45 против 65Г) и конкретные условия процесса ЭПУ (такие как состав электролита и параметры процесса) играют ключевую роль в определении коррозионного поведения материалов в различных средах. Исследование подчеркивает важность адаптации процесса ЭПУ в соответствии с предполагаемой средой применения, чтобы оптимизировать коррозионную стойкость и долговечность упрочненных слоев.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и Высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP13068365).

Список использованной литературы:

1. Белинин Д. С., Щицын Ю. Д. Особенности структурообразования при плазменной поверхностной закалке на большую глубину изделий из стали 40X13 // Известия Самарского Научного центра РАН. 2012. Том 14. № 4. С. 1200–1205.
2. D.S. Belinin, V.S. Verkhorubov, P.S. Kuchev, N.N. Strukov, Y.D. Shitcin. Plasma surface hardening of hard loading constructions made of steel 40X13. 2011. Вестник ПНИПУ. pp. 12-18.
3. Сидоров С.А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин. Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1998, № 3, с.29.
4. Khalimov R.Sh., Ayugin N.P., Ayugin P.N., Sotnikov M.V. Durability study of working elements of agricultural machinery. Техника и оборудование для села. 2016 (2) pp. 25-27.
5. Зобнев В.В., Марков А.М., Иванов С.Г., Гурьев А.М. Износостойкость многокомпонентных диффузионных боридных покрытий на рабочих органах сельскохозяйственных машин. Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1.
6. Martínez-Vázquez, J. Merced, Rodríguez-Ortiz, Gabriel, Hortelano-Capetillo, J. Gregorio and Pérez-Pérez, Arnulfo. Effect of induction heating on

Vickers and Knoop hardness of 1045 steel heat treated. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. 5-15:8-15.

7. И. А. Дудников. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей, определяющих надёжность сельскохозяйственных машин. *Технологический аудит и резервы производства* 2011 (1), pp. 33-36.

8. Morshed-Behbahani K, Farhat Z, Nasiri A. Effect of Surface Nanocrystallization on Wear Behavior of Steels: A Review. *Materials (Basel)*. 2024 Apr 1;17(7):1618. doi: 10.3390/ma17071618. PMID: 38612132; PMCID: PMC11012928.

9. Sadegh Pour-Alia, Ali-Reza Kiani-Rashida, Abolfazl Babakhania, Sannakaisa Virtanen. Severe shot peening of AISI 321 with 1 000 % and 1 300 % coverages: A comparative study on the surface nanocrystallization, phase transformation, sub-surface microcracks, and microhardness. *International Journal of Materials Research (formerly Zeitschrift fuer Metallkunde)* 2018. 109(5). DOI:10.3139/146.111622.

10. Степанова, Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие/ Т.Ю. Степанова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2009.- 64с.- ISBN – 5-9616-0315-4.

11. П.И.Остроменский, В.А.Аксенов, Б.В.Коротаев и др. Перспективы применения высокоэнергетических технологий для повышения боковой износостойкости рельсов // *Актуальные проблемы транспорта азиатской части России*, Под ред. К.Л. Комарова, М.Х. Ахметзянова. Новосибирск: Издательство СГУПС, 2001. С. 92-98.

12. Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий : учебное пособие / М. В. Майсурадзе, М. А. Рыжков, О. Ю. Корниенко, С. И. Степанов ; М-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал ун-та, 2022. — 92 с.

13. Кокшаров, В.В. Методы повышения коррозионной стойкости стали". М.: *Металлургия*, 2020. (глава по электролитно-плазменному упрочнению).

14. Fontana, M.G., and Greene, N.D. *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill, 2018. (главы по методам термообработки и их влиянию на коррозионные свойства).

15. Rakhadilov, B.K., and Shynarbek, A.B. "Electrolytic Plasma Surface Treatment: Enhancing Corrosion Resistance of Steel. // *Journal of Materials Engineering*, 2021, 34(3): pp. 301-310.

16. Zhang, J., and Lee, M. "Recent Advances in Electrolytic Plasma Surface Treatment for Corrosion Protection. // *Progress in Materials Science*, 2020, 109: pp. 100637. DOI:10.1016/j.pmatsci.2020.100637.

17. Петров, Д.В., и Соколов, А.И. Коррозионное поведение углеродистых сталей при различных условиях эксплуатации. // *Металловедение и защита от коррозии*, 2019, 15(4): pp. 89-97.

18. Luo, Y., Zhang, H., and Li, W. Corrosion Behavior of Medium-Carbon and High-Carbon Steels under Plasma Treatment. // *Materials Science Forum*, 2020, 982: pp. 254-262. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.982.254.

19. Михайлов, А.Н., и Жуков, П.В. Влияние состава электролита на коррозионную стойкость углеродистых сталей после электролитно-плазменной обработки. // Защита металлов и сплавов, 2021, 7(3): pp. 55-61.

20. Wang, Z., and Liu, H. Effect of Electrolyte Composition on Corrosion Resistance of Plasma Hardened Carbon Steels. // Journal of Electrochemical Science and Engineering, 2020, 10(4): pp. 403-410. DOI:10.5599/jese.805.

21. Rakhadilov B. et al. Influence of plasma electrolytic hardening on the structure and properties of 20cr2ni4a steel //METAL 2020-29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. – 2020. – pp. 487-493.

22. Singh, A.K., and Gupta, V. Electrolytic Plasma Hardening: Effects on Corrosion Resistance of Carbon Steels. // Surface and Coatings Technology, 2020, 384: pp. 125373. DOI:10.1016/j.surfcoat.2020.125373.

УДК: 621.78

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНОТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 45

Рахадиллов Б. К.¹, Кусаинов Р. К.², Бақыт Ж. Ә.², Шынарбек А. Б.², Орманбеков К. Д.², Мусатаева Н. Е.²

¹ *Восточно-Казахстанского университета им. С. Аманжолова, 070002, Республика Казахстан, г. Оскемен, л.30-ой Гвардейской дивизии, 34, e-mail: rakhadilovb@mail.ru*

² *Университет им. Шакарима г. Семей, 071412, Республика Казахстан, Семей, ул. Глинки 20а, e-mail: rinat.k.kus@mail.ru*

Аннотация. В данной статье дается оценка электролитно-плазменному упрочению стали 45 с применением электролита на основе карбоната натрия. В ходе работы были исследованы теоретические основы процесса электролиза водного раствора карбоната натрия. Изучались механические и трибологические свойства образцов из стали 45 после электролитно-плазменного упрочнения. Было выявлено, что при составе электролита 20% карбонат натрия и 80 дистиллированной воды образуется закаленная зона толщиной до 5 мм после электролитно-плазменного упрочнения. Повышение микротвердости составило до 690 НВ, что соответствует увеличению в 3-3,5 раза по сравнению с исходным состоянием. Результаты трибологических испытаний показали, что у стали 45 после проведения ЭПУ коэффициент трения снизился, что свидетельствует о значительном улучшении трибологических характеристик по сравнению с исходным значением до закалки. Также, были проведены электрохимические тесты на коррозионную стойкость стали 45. После проведения ЭПУ скорость коррозии значительно снизилась для образцов стали 45 что свидетельствует о его наивысшей коррозионной стойкости.

Ключевые слова: электролитно – плазменное упрочнение, сталь 45, структура, износостойкость, микротвердость.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ELECTROLYTIC-PLASMA TREATMENT ON THE MECHANOTRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL 45

Rakhadilov B.K.¹, Kusainov R.K.², Bakyt Zh.A.², Shynarbek A.B.², Ormanbekov K.D.², Musataeva N.E.²

¹ East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, 070002, Republic of Kazakhstan, Oskemen, 1.30th Guards Division, 34, e-mail: rakhadilovb@mail.ru

² University named after Shakarim, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka Street 20a, e-mail: rinat.k.kus@mail.ru

Abstract: This article evaluates the effect of electrolytic-plasma hardening of steel 45 using an electrolyte based on sodium carbonate. The theoretical foundations of the electrolysis process in an aqueous sodium carbonate solution were investigated. The mechanical and tribological properties of steel 45 samples after electrolytic-plasma hardening were studied. It was found that with an electrolyte composition of 20% sodium carbonate and 80% distilled water, a hardened zone up to 5 mm thick is formed after electrolytic-plasma treatment. The microhardness increased to 690 HV, which is 3–3.5 times higher than the initial state. Tribological tests showed that the friction coefficient of steel 45 after electrolytic-plasma hardening decreased significantly, indicating a substantial improvement in tribological characteristics compared to the pre-hardening state. Electrochemical tests were also conducted to assess the corrosion resistance of steel 45. After electrolytic-plasma hardening, the corrosion rate of steel 45 samples was significantly reduced, indicating superior corrosion resistance.

Keywords: electrolytic-plasma hardening, steel 45, structure, wear resistance, microhardness.

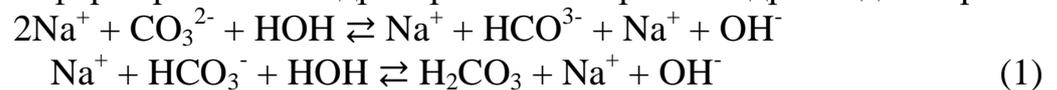
Введение. Электролитно-плазменное упрочнение (ЭПУ) представляет собой перспективный метод термической обработки, при котором на поверхность стали воздействуют плазменным разрядом в среде электролита при высоких температурах. При ЭПУ происходит также процесс электролиза, который является ионообменной реакцией между анодом и катодом. В зависимости от различных параметров, таких как размеры электродов, приложенного напряжения, химического состава электролита можно получать различные изменения на поверхности материалов. Благодаря своей простоте и экологичности, ЭПУ представляет перспективную технологию модификации поверхности материалов. Имеются ряд работ, посвященных влиянию технологии ЭПУ на свойства сталей, и отмечают способность улучшить поверхностные свойства стали, повышая её твердость, износостойкость, а также коррозионную стойкость [1-4].

В процессе ЭПУ под воздействием электрической дуги образуется плазма, представляя высокотемпературную среду, где происходят физико-химические процессы с участием ионизированных частиц газа. При

электролитно-плазменной закалке происходит интенсивный нагрев обрабатываемого материала в среде образуемой парогазовой оболочки и дальнейшее отключение электричества и промывание электролитом приводит к структурным изменениям до определенной глубины стали. Также при электролитно-плазменной обработке кроме термического воздействия плазмы на поверхность стали возможно протекание процесса диффузионного насыщения, при котором ионы и электроны проникают в поверхностный слой металла, вызывая изменения в структуре и химическом составе. Данное преимущество ЭПУ позволяет проводить диффузионное насыщение стали атомами углерода, азота и бора и легирование металлами. Из-за различий в химическом составе глубина проникновения плазмы может различаться для разных сталей, что в конечном итоге повлияет на эффективность упрочнения и его равномерность [5-6].

На процесс электролиза влияет состав электролита, площади катода и анода, а при электролитно-плазменной закалке скорость охлаждения. Ранее было выявлено, что среди различных составов электролита, содержащих водный раствор карбоната натрия (Na_2CO_3) 15%, 20% и 25% при ЭПУ 20% состав электролита дает наилучшие механические и трибологические свойства стали 45.

Карбоната натрия при взаимодействии с водой диссоциирует в две стадии, приводя к формированию гидрокарбоната натрия и гидроксида натрия:



Данное изменение концентрации ионов влияет на удельную электропроводность раствора, которая варьируется по параболической зависимости с максимумом в наивысшей точке. Данная зависимость выражается следующим выражением:

$$\sigma = \alpha CZF(u_+ + u_-) \quad (2)$$

где α – степень диссоциации, C – молярная концентрация, Z – валентность, F – постоянная Фарадея, u_+, u_- – подвижности катионов и анионов соответственно. Формула (2) справедлива для однозарядных ионов. Снижение электропроводности при низких концентрациях объясняется малым влиянием ионов друг на друга на, проявляющемся через электрофоретические и релаксационные эффекты [7-8]. По мере увеличения концентрации ионов, их взаимодействие становится более выраженным, однако после достижения определенного значения концентрации карбоната натрия происходит снижение удельной электропроводности, несмотря на увеличение общего количества ионов. Это объясняется тем, что при движении ионов в разные стороны начинает преобладать эффект трения, что приводит к тому, что ионы уже не могут двигаться так свободно. Согласно уравнению (2), удельная электропроводность электролита достигает максимума при концентрации 30% с значением $\sigma = 36,61 \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$ для первой стадии и $\sigma = 53,01 \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$ для второй стадии. Как видно из формулы (1), на первой стадии гидролиза

возникает больше ионов и, следовательно, возникает взаимное влияние их друг на друга. При достижении второй ступени гидролиза по аниону, свободный гидрокарбонат-ион связывается с ионом водорода. В результате общее количество свободных ионов в растворе снижается и тем самым их движение становится свободнее и как следствие, растет удельная электропроводность. Но на практике гидролиз по второй ступени проходит либо в слабой степени, либо совсем не проходит. На рисунке 1 черным цветом показано теоретически вычисленные значения удельной электропроводности при температуре $t = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из данного графика видно, что по мере приближения к точке максимума прирост электропроводности уменьшается, и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к значительному росту электропроводности. Такое поведение изменения электропроводности электролита при содержании карбоната натрия в 20% делает данный состав наиболее оптимальным для быстрого зажигания плазмы в парогазовой оболочке при электролитно-плазменном упрочнении, что, в свою очередь, обеспечивает эффективный и быстрый нагрев образца.

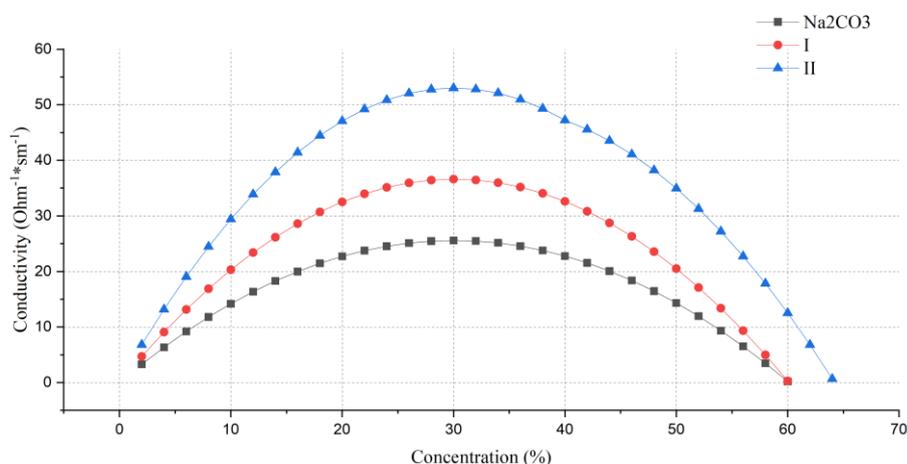


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводности электролита карбоната натрия от концентрации на двух стадиях гидролиза.

В приэлектродной зоне баланс теплоты поддерживается за счет выделяющейся потока теплоты и его поглощением металлическим электродом и жидким электролитом. Источниками теплового потока служат химическая реакция и нагрев парогазовой оболочки по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = \sum \Delta H_i + \Delta UI, \quad (3)$$

где $\sum \Delta H_i$ – поток тепла, выделяющийся при химических реакциях, ΔU – падение напряжения в парогазовой оболочке. Также отмечается, что доля потока тепла от Омического составляющего является более существенным по сравнению с другими компонентами источника теплового потока. Причиной этому является низкая проводимость парогазовой оболочки и соответственно большое падение напряжения ΔU в этом участке электрической цепи: источник постоянного тока – анод – электролит – парогазовая оболочка – катод. Мощность выделяемая по закону Джоуля-Ленца может варьироваться в

интервале $0,1-1 \text{ МВт/см}^2$. Принципиальная схема установки электролитно-плазменного упрочнения и ее упрощенная электрическая схема приведены на рисунке [9-12].

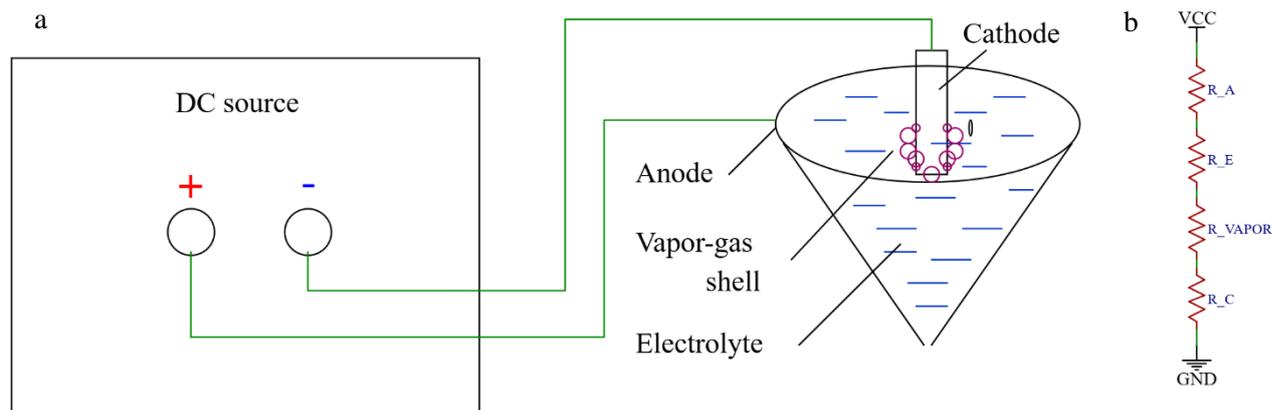


Рис. 2. Принципиальная схема установки электролитно-плазменного упрочнения и ее упрощенная электрическая схема. R_A – анод, R_E – электролит, R_{VAPOR} – парогазовая оболочка, R_C – катод.

Также электролит на основе карбоната натрия обладает достаточной критической скоростью охлаждения, что в совокупности с большим потоком тепла позволяет проводить термическую закалку стали. Данная технология позволяет получать поверхностный слой с улучшенными механическими и коррозионными характеристиками, в то время как основная сердцевина стали сохраняет исходную пластичность и прочность к ударным нагрузкам, что делает технологию предпочтительным для различных применений, в том числе при упрочнении рабочих органов сельскохозяйственной техники. Благодаря большому потоку энергии ЭПУ обработку стальных изделий можно ускорить, в отличие от индукционной закалки, которая требует гораздо большего времени обработки, что приводит к удорожанию всего технологического процесса. Кроме того, при индукционной закалке требуется держать деталь очень близко к индуктору, что усложняется при применении токов больших частот. Другая широко распространенная технология поверхностного упрочнения, к которой относится пламенная закалка может повлечь при обработке к деформации детали. Несмотря на то, что и пламенная и индукционная закалка позволяют получать однородную мелкозернистую микроструктуру с хорошими механическими характеристиками, вышесказанные недостатки ограничивают их применение в некоторых прикладных задачах [13-15].

ЭПУ при с применением водного раствора на основе карбоната натрия способен на поверхности стали сформировать кроме мартенситной фазы, фазы остаточного аустенита и образованию специальных карбидов, о чем подтверждают результаты анализа просвечивающей электронной микроскопии, проведенных исследователями Ророва Н. и др. ЭПУ проводили при напряжении 320В и силе тока 40А, при длительности нагрева 4с. Полученный поверхностный слой обеспечивает наилучшие механические качества, такие как повышенная твердость и износостойкость [16-17].

В работе Кенесбекова А. и др. приводятся результаты электролитно-плазменной закалки стали 40ХН с применением водного раствора карбоната натрия в качестве электролита при напряжении 200-350 В. Исследователи отмечают, что после нагрева длительностью 3 с микротвердость увеличилась в 2 раза, составив 440 HV, а стойкость к износу увеличилась на 70% по сравнению с исходным образцом. Также, после ЭПУ на поверхности стали образовалась мелкозернистая мартенситная микроструктура с включениями карбидов и остаточного перлита, что положительно влияет на улучшение механических свойств поверхности [18-19].

В другой работе [20] рассказывается применение 20% водного раствора карбоната натрия при поверхностном электролитно-плазменном упрочнении образцов из стали 20ГТЛ. В ходе ЭПУ применялся постоянный ток с напряжением 360В и силой тока в 60А в проточном электролите, быстрым нагревом в 2-3 секунды. После выключения напряжения образцы охлаждались в циркулирующем электролите. Полученные результаты измерения механических и трибологических характеристик сталей также подтверждают эффективность применения карбоната натрия при ЭПУ: микротвердость увеличилась в 2 раза, а объем износа уменьшился на 25% [21].

Таким образом, можно сказать, что карбонат натрия является оптимальным компонентом для электролита при ЭПУ, обеспечивающий достаточную электропроводность и критическую скорость охлаждения. Также, исследования показывают, что ЭПУ является наиболее экономичным, и производительным методом, характеризующимся низкой энергоемкостью, простотой технологического оборудования, большими размерами упрочненной зоны, высокой производительностью процесса, с минимальным вредом для окружающей среды и возможностью упрочнения деталей большой массы и сложного профиля. Таким образом, будет решена проблема быстрого износа и снижения эффективности работы машинных узлов и механизмов, что особенно важно в условиях повышенных эксплуатационных нагрузок [22].

Целью данной работы является оценка эффективности электролита на основе карбоната натрия для обеспечения оптимальной электропроводности и критической скорости охлаждения в процессе электролитно-плазменной закалке стали 45, которые имеют ключевое значение для улучшения механических и трибологических характеристик. Выбор материала в качестве объекта исследования обоснован ее широким применением в машиностроении и высокими механическими характеристиками, такими как прочность и износостойкость, которые могут быть существенно улучшены с помощью электролитно-плазменного упрочнения. Результаты исследования будут способствовать совершенствованию параметров ЭПУ и предоставят ценные данные о потенциале технологии увеличить срок эксплуатации тяжело нагруженных деталей машин.

Методы исследования. Экспериментальные исследования и испытания проводились на базе НИЦ ИПИТ ВКУ им.С.Аманжолова (г.Усть-Каменогорск,

Казахстан) и Инжиниринговом центре «Упрочняющие технологий и покрытия», университета имени Шакарим города Семей, Казахстан.

В качестве объекта исследования была выбрана сталь 45. Образцы были подготовлены шлифовкой и полировкой перед проведением эксперимента. ЭПУ образцов проводился на установке электролитно-плазменной обработки [23] в трех различных режимах, которые приведены в Таблице 1. Для всех образцов применялся электролит из водного раствора карбоната натрия с концентрацией 20%.

Таблица 1 – Режимы ЭПУ

Образец	Площадь анода, см ²	Напряжение при нагреве, В	Напряжение после нагрева, В	Ток при нагреве, А
№. 1	200	320	0	70
№. 2	500	320	10	100
№. 3	500	320	0	100

Металлографический анализ проводился на тринокулярном инвертированном металлографическом микроскопе HL-102AW с цифровой камерой 3.0 МП и программным обеспечением для анализа. Для металлографического микроанализа образцов, после полировки с применением пасты диоксида хрома травили 3 %-м спиртовым раствором азотной кислоты. Измерения на микротвердость проводили на приборе по Виккерсу HV-1 DT при нагрузке на индентор $P=1$ Н с временем выдержки 10 секунд, в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Морфологию обработанных образцов исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы JEOL (Япония) с приставкой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy фирмы OXFORD Instruments.

При помощи трибометра Anton Paar TRB3 были проведены трибологические испытания по схеме «шар-диск». Параметры испытания включали радиус износа 3 мм, путь трения 60 мм, скорость вращения образца 2 см/с и нагрузку 6 Н. В качестве контртела использовался шар из материала 100Cr6 диаметром 6 мм.

Электрохимический анализ использовался для изучения коррозионной стойкости образцов в ходе эксперимента. Оценка коррозионной стойкости позволяет определить, какой тип стали более устойчив к коррозии в конкретных условиях эксплуатации. Эксперимент по изучению электрохимической коррозии проводился при помощи аппарата CS300M, который объединяет функции потенциостата и гальваностата. Электрохимическая ячейка используется для измерения скорости коррозии в зависимости от потенциала на рабочем электроде. Для этого потенциостат подключается к ячейке через три различных кабеля: хлоридсеребряный электрод (RE) как электрод сравнения, платиновый электрод (CE) в качестве вспомогательного электрода и образец (WE) в качестве рабочего электрода. Этот метод позволяет изучать влияние потенциала на скорость коррозии и

оценивать степень защиты материалов от коррозии в различных условиях. Для проверки коррозионной стойкости использовался раствор 0,5 М NaCl. Этот раствор был разделен на отдельные емкости, которые были соединены с помощью солевого моста. Это позволяет создать однородные условия экспозиции для образцов и одновременно поддерживать одинаковую химическую среду для проведения испытаний на коррозию. Программа CS Studio использовалась для определения значений потенциала, плотности тока и скорости коррозии, а также для расчета тафельских наклонов (ba, bc). Результаты испытаний представлены в виде графиков на логарифмической шкале плотности тока.

Фазовый состав образцов анализировали на рентгеновском дифрактометре X'PertPro от Philips (Нидерланды) с использованием CuK α -излучений. При измерениях использовалась схема Брэгга-Брентано. Для обработки данных и количественного анализа использовали программное обеспечение X'Pert HighScore Plus (версия 3.0).

Для оптической микроскопии структуры образцов использовали универсальный металлографический микроскоп Altamі MET 5C (Россия). Данный микроскоп оснащён системой освещения Кёлера с регулируемыми полевой и апертурной диафрагмами, а также плавной регулировкой яркости. Источником освещения служит галогенная лампа мощностью 6 В/30 Вт.

Результаты исследования и выводы. Исследования структурно-фазовых состояний упрочненных поверхностных слоев стали 45 до и после ЭПУ показали значимые изменения. Микроструктура до и после ЭПУ образцов стали 45 представлены на рисунке 3.

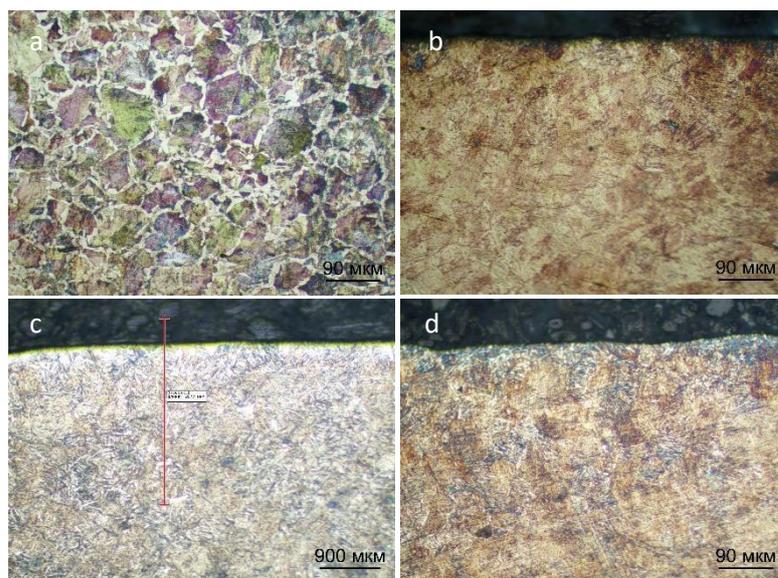


Рис. 3. Оптические микрофотографии стали 45: а – до; b, c, d – после ЭПУ.

Оптико-металлографический анализ выявил, что в исходном состоянии (рис. 3, а) структура стали 45 характеризуется как ферритно-перлитная, с

преобладанием зерен перлита над ферритом. Процесс ЭПУ приводило к формированию мелкодисперсной мартенситной структуры (рис. 3, b, c, d) и значительно повысил твердость и износостойкость поверхности [23, 24].

Результаты измерения микротвердости поверхностного слоя стали 45 до и после ЭПУ показаны на Рисунке 5. Исходное значение микротвердости стали 45 равно 209 HV. Наибольшее увеличение микротвердости наблюдается у образца No. 3, где она достигает 690HV, что соответствует росту в 3-3,5 раза по сравнению с исходным состоянием. Также было замечено, что толщина закаленного слоя составила 5 мм.

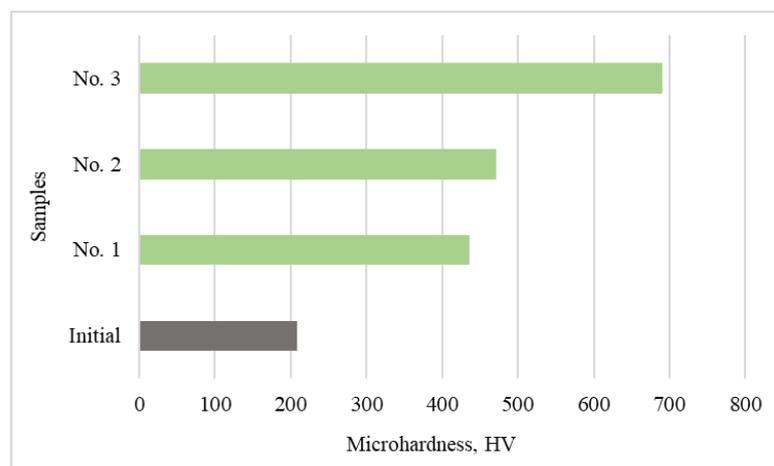


Рис. 4. Результаты микротвердости образцов стали 45 до и после ЭПУ.

Таким образом, ЭПУ значительно повысило микротвердость поверхности стали 45, особенно у образца No. 3, что свидетельствует об эффективности данного метода для улучшения износостойкости материала.

Также, были проведены эксперименты по изменению трибологических характеристик среднеуглеродистой стали 45 до и после ЭПУ. Трибологические испытания образцов проводились по методике «шар-диск». На рисунке 6 представлен графики зависимости коэффициента трения от длины пути скольжения для образцов стали 45 после ЭПУ [25]. Образец No. 3 демонстрирует самый низкий коэффициент трения - 0,454, что указывает на наибольшее улучшение трибологических характеристик среди всех образцов и улучшились в 1,5 раза по сравнению с исходными значениями до закалки.

На рентгеновском дифрактограмме (XRD), приведённом на Рисунке 7, показаны пики, соответствующие кристаллическим фазам образца No. 3. Основные пики на графике идентифицированы как α' -Fe, что указывает на присутствие мартенсита в образце. Пики при значениях 2θ , равных примерно 44° , 65° , и 82° соответствуют основным дифракционным линиям для феррита с индексами кристаллографических плоскостей (110), (200), и (211) соответственно.

Также обнаружены пики, соответствующие фазе карбида Fe_3C . В целом, данные рентгеноструктурного анализа подтверждают наличие фаз,

которые характерны для сталей после закалки и объясняют повышение твердости и износостойкости образцов после ЭПУ.

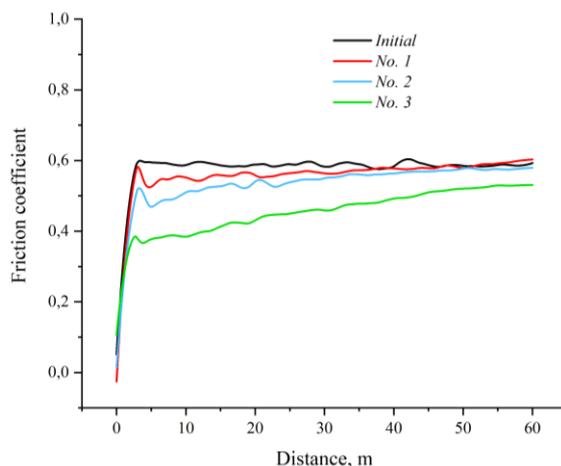


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента трения от длины пути скольжения для образцов стали 45 до и после ЭПУ.

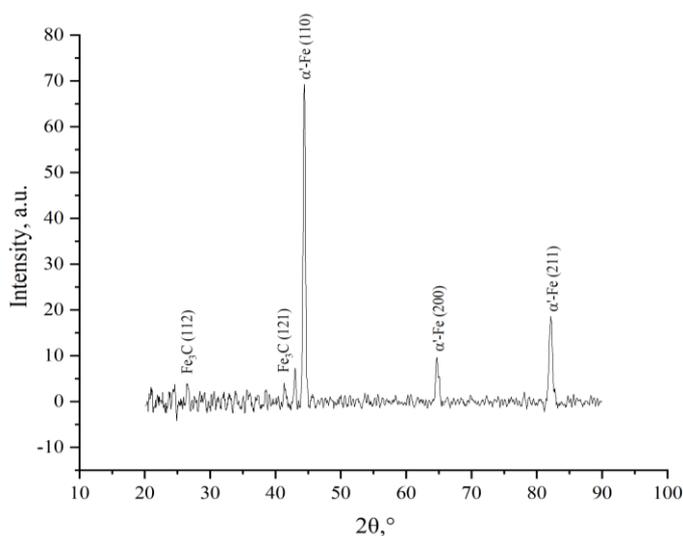


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма (XRD) образца No. 3.

Потенциодинамические поляризационные кривые для электрохимического теста на коррозионную стойкость и график скорости коррозии образцов до и после ЭПУ показан на Рисунке 7.

На представленной поляризационной кривой (рисунок 7, а) показаны зависимости между плотностью тока и потенциалом для образцов до и после ЭПУ (Initial, No. 1, No. 2, No. 3). Образцы No. 1, No. 2 и No. 3 демонстрируют смещение коррозионного потенциала в сторону более положительных значений и снижение плотности тока коррозии по сравнению с исходным образцом, что указывает на улучшение их коррозионной стойкости. Образец No. 3 демонстрирует наименьшую плотность коррозионного тока ($8,2602 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$), что указывает на наилучшую коррозионную стойкость среди всех исследуемых образцов. Таким образом, электролитно-плазменная

поверхностное упрочнение заметно улучшила коррозионную стойкость образцов No. 1, No. 2, No. 3, причем наибольшую эффективность показал образец №3. Так же, на рисунке 7, б представлены значения скорости коррозии для четырех образцов: Initial, No. 1, No. 2, No. 3. Исходный образец имеет самую высокую скорость коррозии (0.22255 mm/a), что указывает на наименьшую коррозионную стойкость среди всех исследуемых образцов. После ЭПУ скорость коррозии значительно снижается для образцов No. 1, No. 2 и No. 3. Наилучший результат отмечен у образца No. 3, у которого скорость коррозии составляет 0.096902 mm/a, что свидетельствует о его наивысшей коррозионной стойкости.

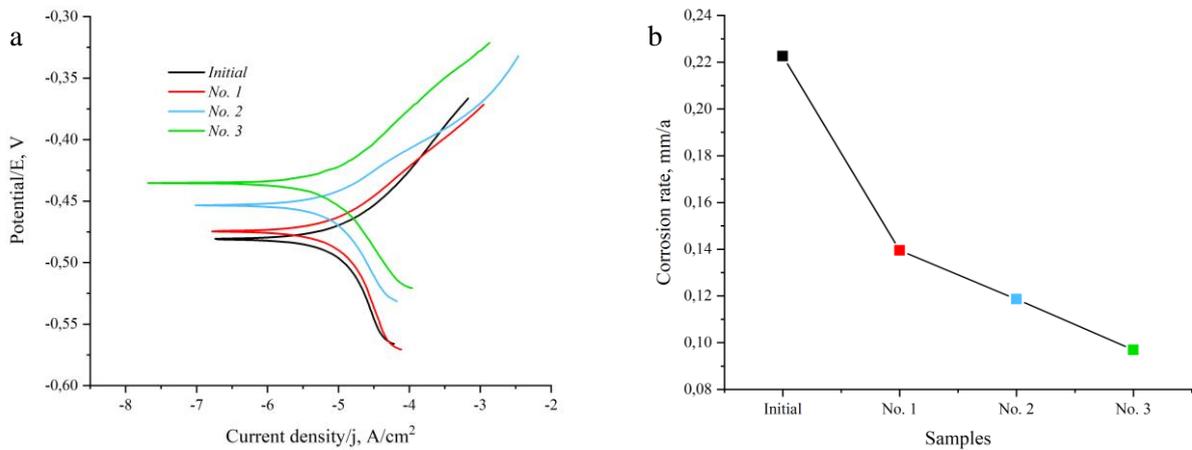


Рис. 7. Потенциодинамические поляризационные кривые для электрохимического теста на коррозионную стойкость – а и график скорости коррозии образцов до и после ЭПУ – б.

Проведенное исследование показало, что электролитно-плазменное упрочнение стали 45 с использованием электролита на основе карбоната натрия существенно улучшает ее механические, трибологические и коррозионные свойства. Закаленная зона толщиной до 5 мм, образовавшаяся после ЭПУ, привела к увеличению микротвердости до 690 HV, что соответствует росту в 3–3,5 раза по сравнению с исходным состоянием. Снижение коэффициента трения после ЭПУ свидетельствует о значительном улучшении трибологических характеристик стали 45. Кроме того, уменьшение скорости коррозии после проведения ЭПУ указывает на высокую коррозионную стойкость обработанных образцов. Таким образом, электролитно-плазменное упрочнение можно считать эффективным методом улучшения эксплуатационных характеристик стали 45.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и Высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP13068365).

Список использованной литературы:

1. Rakhadilov B. K. et al. The cathodic electrolytic plasma hardening of the 20Cr2Ni4A chromium-nickel steel //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 4. – С. 6969-6976.
2. Бусов А. И. Влияние электролитно-плазменного поверхностного упрочнения на структуру и свойства стали 40хн //наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. – 2022. – С. 352-353.
3. Кожанова Р. С., Рахадиллов Б. К., Сатбаева З. А. Влияние электролитно-плазменного упрочнения на структуру и эрозионную стойкость стали 65Г //и прикладные проблемы современной физики. Fundamental and applied problems of modern physics. – 2023. – С. 79.
4. Рахадиллов Б. К. и др. Модификация поверхности стали 30ХГСА с применением электролитно-плазменного термоциклического упрочнения // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, Сварка. – 2022. – С. 610-616.
5. Куликов И., Ващенко С., Каменев А. Электролитно-плазменная обработка материалов. – Litres, 2022.
6. Сатбаева З.А. Исследование механических и трибологических свойств хромоникелевой стали при электролитно-плазменном упрочнении. Москва. – 2023. – Т. 1. – С. 615-617.
7. General Chemical. Soda ash Technical & Handling Guide. General Chemical Industrial Products. Available from <https://files.engineering.com/download.aspx?folder=255aa3ad-f047-41a3-94f4-b20fccb2320c&file=sodaashtech-130416232158-phpapp02.pdf>.
8. Ali M. F., El Ali B. M., Speight J. G. Handbook of industrial chemistry // McGraw-Hill Companies, New York, 2005.
9. Погребняк А. Д. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // Успехи физики металлов. – 2005.
10. Гилязов И.Н., Астащенко В.И., Емельянов Д.В. О возможности использования электролитно-плазменного борирования деталей // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017 (МНТК «ИМТОМ -2017»)). Ч. 2. / Казань, 2017.-С. 305-308.
11. Погребняк А. Д., Каверина А. Ш., Кылышканов М. К. Электролитно-плазменная технология для нанесения покрытий и обработки металлов и сплавов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2014. – Т. 50. – №. 1. – С. 72-88.
12. Табиева Е.Е. Изменение структуры и свойств поверхности колесной стали при электролитно-плазменной поверхностной закалке: Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). Оскемен, 2022. 120с.
13. Dayanç A., Karaca B., Kumruoğlu L. The cathodic electrolytic plasma hardening of steel and cast iron based automotive camshafts //Acta Physica Polonica A. – 2017. – Т. 131. – №. 3. – С. 374-378.

14. Салтанова М. А., Ведерникова И. И. Применение индукционной закалки при обработке деталей //Надежность и долговечность машин и механизмов. – 2022. – С. 228-232.

15. Саламех А., Мамонтов В. А. Поверхностная закалка как способ упрочнения деталей, испытывающих переменные нагрузки //Научные труды Астраханского ГТУ. – 2000. – Т. 3. – №. 1. – С. 291.

16. Popova N. A. et al. Structure and phase composition of ferritic-perlitic steel surface after electrolytic plasma quenching // Russian Physics Journal. – 2020. – Т. 63. – С. 791-796.

17. Popova N. A. et al. Influence of surface quenching on morphology and phase composition of ferritic-pearlitic steel // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2021. – С. 920.

18. Кенесбеков А. Б. и др. Влияние электролитно-плазменной закалки на трибологические свойства стали 40ХН // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2018. – №. 4. – С. 144-151.

19. Сатбаева З.А., Байжан Д.Р., Кенесбеков А.Б. Особенности структурообразования в стали 40ХН при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. 2019.

20. Рахадиллов Б. К., Кызырхан Е., Журерова Л. Г. Повышение износостойкости деталей автосцепного устройства электролитно-плазменной поверхностной закалкой // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2016. – №. 3. – С. 117-121.

21. Табиева, Е. Е. Структура и механические свойства колесной стали до и после электролитно-плазменной поверхностной закалки // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 3 (2020): 156-161.

22. Сатбаева З.А. Структурообразование в легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении: Диссертация на соискание степени доктора философии (Ph.D):– Оскемен: 2022. – 160 с.

23. Bauyrzhan Rakhadilov, Rinat Kussainov, Aisulu Kalitova, Zarina Satbayeva, Aibek Shynarbek. The impact of technological parameters of electrolytic-plasma treatment on the changes in the mechano-tribological properties of steel 45 // AIMS Materials Science. – 2024, 11(4): 666-683. doi: 10.3934/matetsci.2024034

24. Ren Q. Q. et al. The effects of heat-treatment parameters on the mechanical properties and microstructures of a low-carbon dual-phase steel // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Т. 888. – С. 145801.

25. Змий В. И. и др. Комплексные диффузионные покрытия на углеродистой стали и их трибологические характеристики // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2006. – №. 33.

УДК 621.372:551.508.8

ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗОНА НАД г.БИШКЕК ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Ж.А.

Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР, 720071, Кыргызстан, Бишкек, пр. Чуй 265-а

Аннотация В статье на нескольких примерах показаны содержание озона, его высотное распределение по данным спутниковых измерений над северным Кыргызстаном и городом Бишкек. Орбитальные данные брались со спутника Aura, пролетающего вокруг Земли 16 раз в течение суток. Несмотря на это, к сожалению, данных именно над Бишкеком в течение года оказалось менее десяти. Увеличение сторон области сбора данных спутника до 600-800км., позволяет регистрировать показания со спутника почти за каждый день.

Ключевые слова: озоновый слой, концентрация озона, миллиметровые волны, влажность, абсолютная калибровка, частота.

THE VERTICAL DISTRIBUTION OF OZON OVER BISHKEK BASED ON SATELLITE MEASUREMENT

A.T. Orozobakov, B.B. Sayakbaeva, Zh.A. Orozobakov

Institute of Physics named after J. Jeenbaev NAS KR, 720071, Kyrgyzstan, Bishkek, pr. Chui, 265-a

Annotation. The article illustrates ozone content and its vertical distribution based on satellite measurements over northern Kyrgyzstan and Bishkek city, using several examples. Orbital data were obtained from the Aura satellite, which orbits the Earth 16 times a day. However, despite this, fewer than ten data points specifically over Bishkek were available throughout the year. Expanding the sides of the satellite data collection area to 600–800 km allows for finding satellite measurements for nearly every day.

Keywords: ozone layer, variation, ozone concentration, millimeter waves, humidity, absolute calibration, frequency.

Введение. Рассматриваемые в статье вопросы вызваны в связи с глобальными изменениями концентрации малых газовых составляющих атмосферы, с последующим уменьшением содержания озона, возникновением так называемых аномалий - "озоновых дыр". Беспокойство по поводу надежности атмосферной системы как основы биосферы неоднократно высказывалось на различных представительных научных форумах [1,2]. Где подчеркивался серьезный уровень нерешенности в изучении проблемы глобальных изменений в атмосфере, в ее защитном озоновом слое, из-за недостаточности необходимых данных об эволюции окружающей среды под влиянием естественных причин и антропогенных факторов. Также в последние годы муссируются вопросы, связанные с загрязнением воздуха в зимний период

в г. Бишкек. Известно, что озоновый слой в пределах высот 20-30км. играет защитную функцию от ультрафиолета. А в приземном слое, наоборот, чрезмерное количество озона вследствие деятельности человека, считается вредным. Озон в тропосфере обычно образуется больше летом из-за большего воздействия ультрафиолета, хотя зимой, из-за антропогенного фактора, не исключают также увеличение содержания озона. Данный вопрос требует тщательных исследований. В связи с этим пока разберем вопрос имеющимися средствами. По стратосферному озону, общему содержанию озона над северным Кыргызстаном проведено немало исследований [3,4]. Но и сегодня по оценкам ведущих специалистов общая задача мониторинга атмосферного озона и режима солнечной радиации, а также вопросы установления связи между содержанием озона, уровнем ультрафиолетовой радиации и загрязнением атмосферы требуют дальнейших кропотливых исследований.

Хорошо известно, что основными атмосферными газами, поглощающими радиоволны миллиметрового диапазона, являются водяной пар и молекулярный кислород. Расчёты показывают, что в «окнах» прозрачности, т.е. в интервалах частот между сильными линиями поглощения O_2 и H_2O , вращательные спектры почти всего семейства малых газовых составляющих (озон, окислы азота, окись углерода) имеют линии, интенсивность которых вполне достаточно для их обнаружения [5-8]. Было отмечено, что при благоприятных условиях (зима, высокогорье) полное вертикальное ослабление вблизи резонансных частот озона сравнимо с фоновым ослаблением, обусловленным водяным паром и кислородом, а в коротковолновой части миллиметрового диапазона превышает его.

Результаты обработок спутниковых данных. Наземные радиофизические наблюдения за озоновым слоем в обсерватории на достаточном уровне подтвердили соответствие спутниковым данным [9,10]. По непосредственно аппаратуре, измерениям, программам при сравнении с другими эталонными измерениями результаты такого подхода в пределах допустимой погрешности. В статье [11] сравнения наземных измерений обсерватории по различным калибровкам со спутниковыми данными рис.1 показали, что результаты измерений по абсолютной калибровке соответствуют данным орбитальных инструментов, а по атмосферным корреляция 0.98, с коэффициентом смещения 1.35.

В Среднеазиатском регионе, к сожалению, наземные вертикальные измерения обсерватории пока можно сравнить только со спутниковыми. В нашем случае с результатами измерений инструментов спутника Aura [12]:

HIRDLS (High Resolution Dynamic Limb Sounder) — инфракрасный радиометр высокого разрешения, предназначен для измерения температуры и концентрации газовых примесей в различных слоях атмосферы,

MLS (Microwave Limb Sounder) — Микроволновый радиометр, предназначен для измерения концентрации химических соединений, ответственных за разрушения озона в различных слоях атмосферы,

OMI (Ozone Monitoring Instrument) — спектрометр, предназначен для измерения размеров отражённого и рассеянного в атмосфере солнечного излучения.

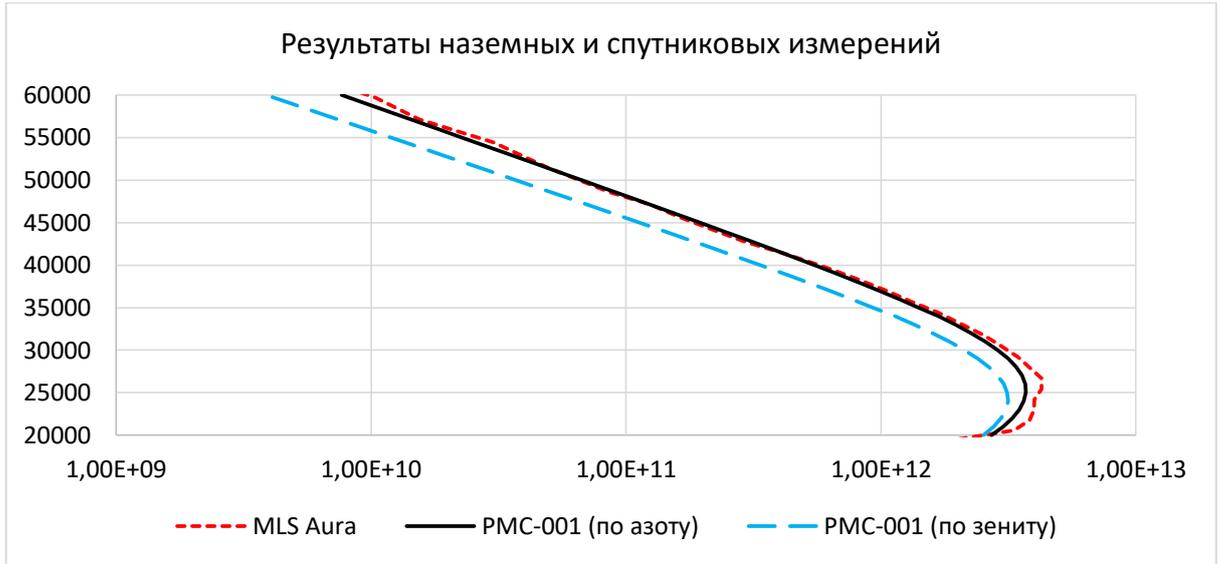


Рис.1. Сравнение наземных микроволновых измерений со спутниковыми.

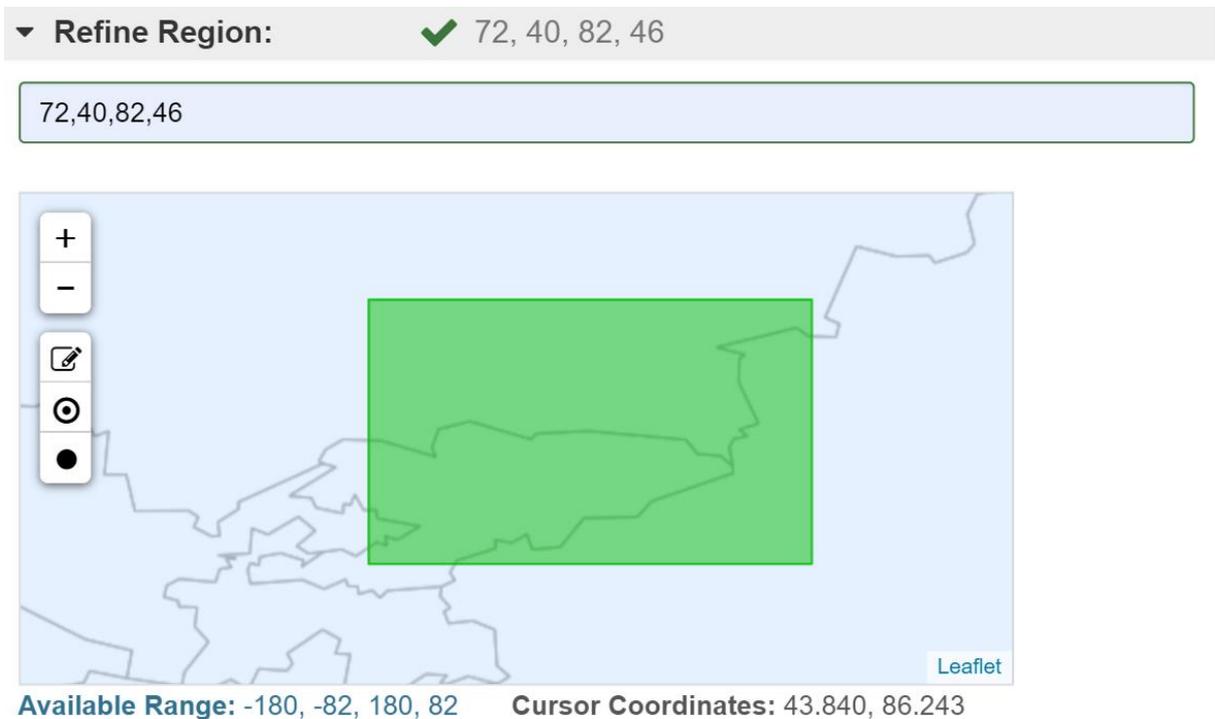


Рис.2. Меню выбора локации на сайте NASA.

Для исследований обсерватории с сайта NASA скачиваются 3 файла:

t - температура в Кельвинах

grh - геопотенциальная высота в метрах

m - озон VMR.

В каждом файле может быть несколько пролетов спутника, не обязательно над районом измерений обсерватории. В статье [11] рекомендовано, чтобы как-то набрать побольше данных увеличить сектор обследования со спутника, в нашем случае со сторонами 40-46с.ш., 72-82в.д., представленном на рисунке два.

В файлах данные от 0-120км разбиты на 55 точек. Приблизительно:

- №16 = 20км;
- №38 = 50км;
- №42 = 60км;
- №45 = 70км.

Количество озона N_{oz} на каждой высотной точке (последний столбец E12) вычисляется по формуле:

$$n = m * p * 10^{19} / (1.38 * t), \text{ где } p - \text{давление (одинаковое для всех файлов).}$$

Сумма озона от 20км до 60км, вычисляется по формуле:

$$sum = N_{low} + \sum_{i=a}^b N_i + N_{up}$$

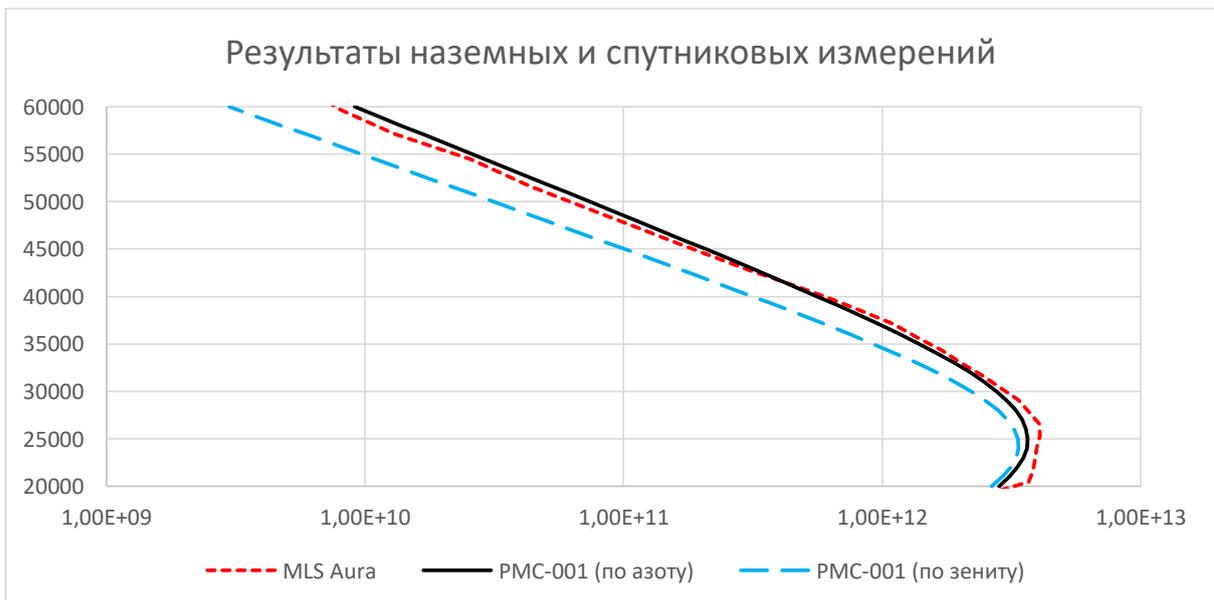
Где a – номер точки, соответствующей нижней границе диапазона, в нашем случае №16 = 20км примерно;

b – номер точки для верхней границы (№38 для 50км, №42 для 60км);

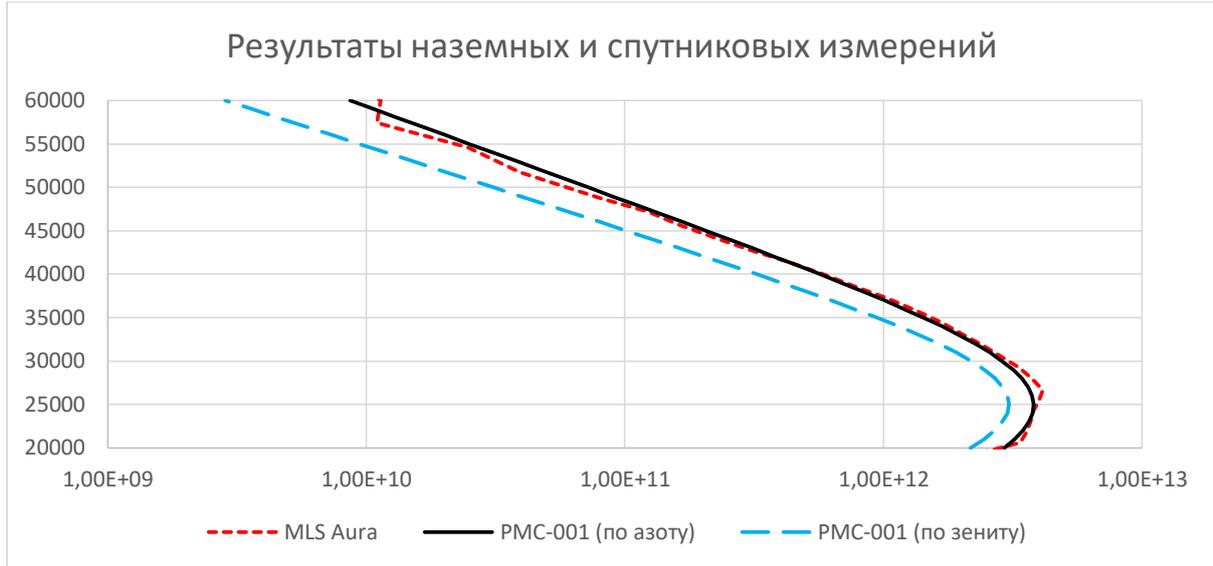
$N_{low} = 2.18 * 10^{21} * m * p$, для ближайшей снизу точки;

$N_{up} = 1.92 * 10^{21} * m * p$, для ближайшей сверху точки;

$N_i = 4.12 * 10^{21} * m * p$, для всех точек внутри диапазона. То есть получается количество молекул на квадратный сантиметр поверхности. Высотные распределения озона после вычислений в сравнении с наземными измерениями даны на рис. 3а, б



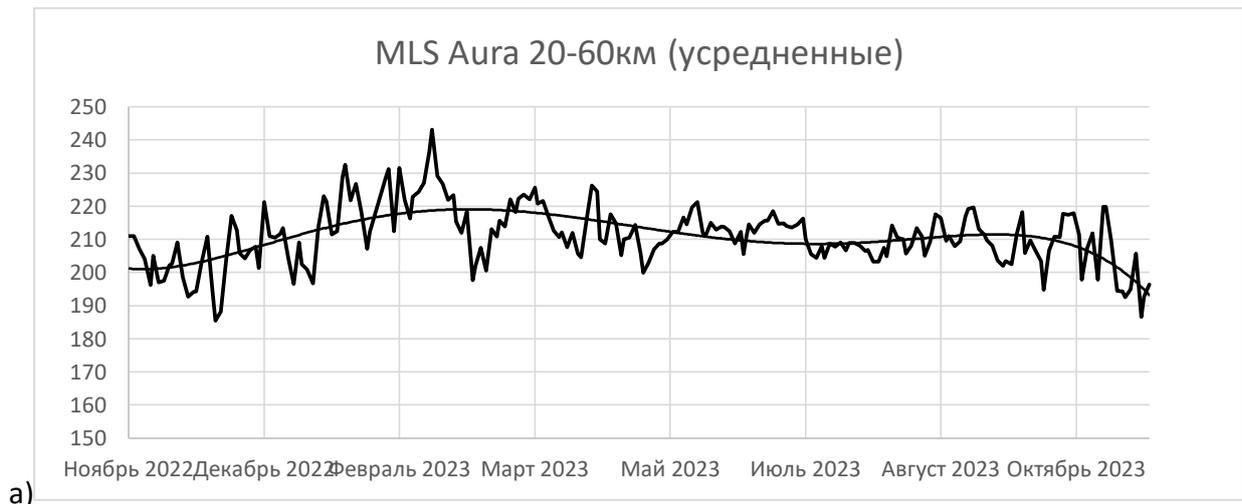
а)



б)

Рис.3. Данные спутниковых и наземных измерений.

На рис. 4а, б так же представлены данные спутниковых измерений общего содержания озона от двадцати до шестидесяти километров в течение года. В 4а использовались усредненные данные, в 4б приведены все показания спутника в рекомендуемом секторе над районом наземных измерений обсерватории.



а)

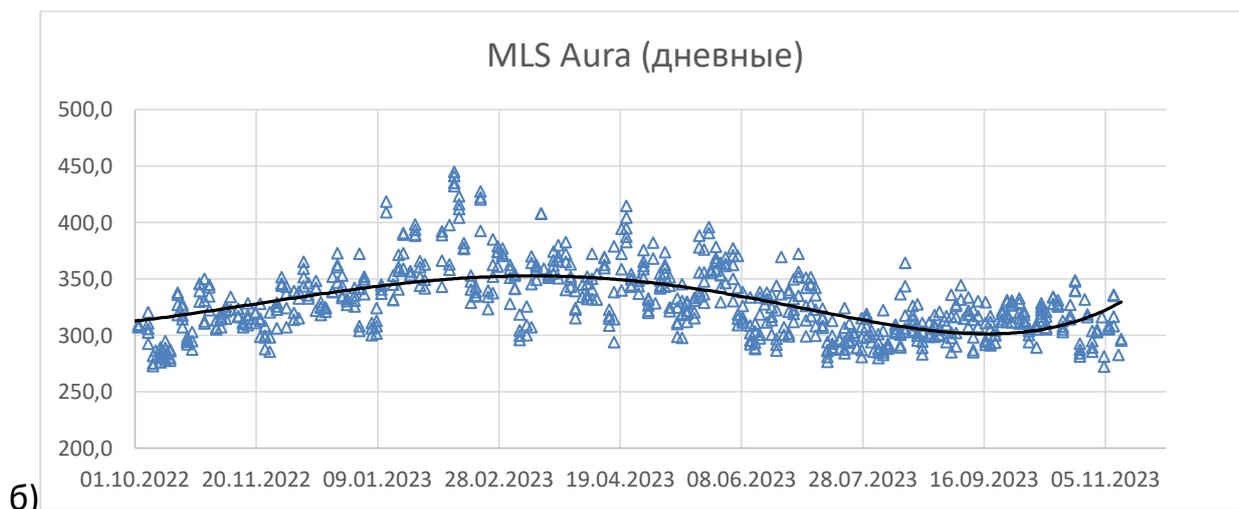
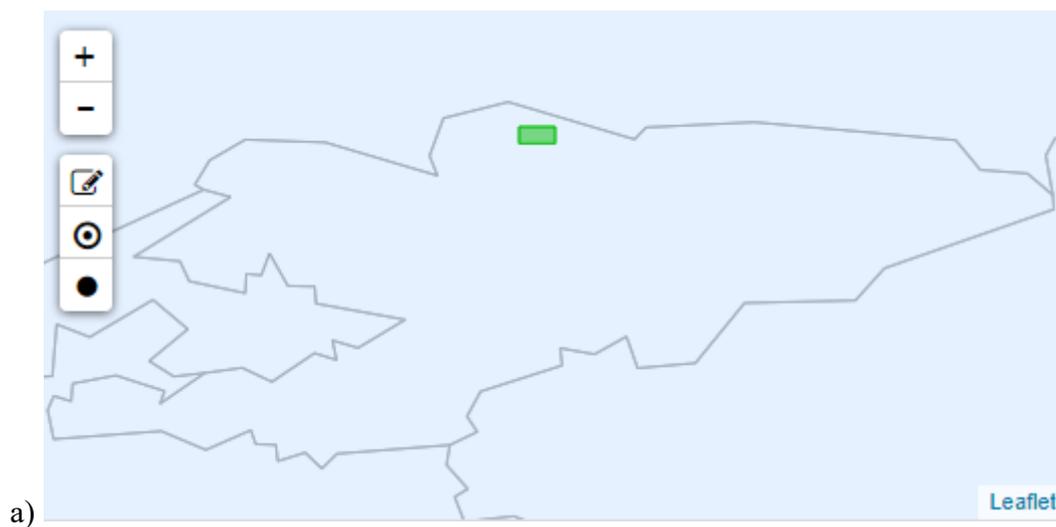


Рис.4. Данные инструментов спутника MLS Aura после перерасчетов по новым программам.

Что касается г. Бишкек, для достоверности восприятия решили попытаться уменьшить рекомендуемую площадь сектора искомых спутниковых данных до допустимо возможного рис.5.



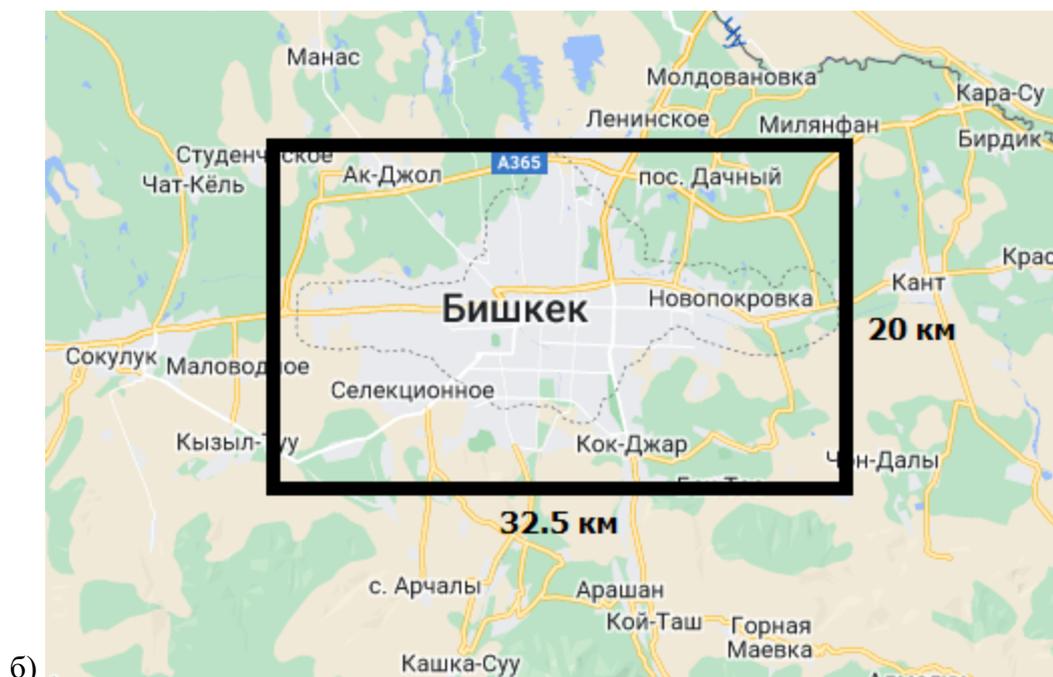


Рис.5. Сектор поиска данных спутника над г. Бишкек.

К сожалению, спутниковые инструменты не рассчитаны предоставлять информацию по каждой точке. За прошедший год предоставлено данных только за несколько дней таблица 1.

Таблица 1. Данные спутника по содержанию озона над Бишкеком

Показания озонового слоя в ед. Добсона			
Ночные			
Дата	0-10км	20-60км	0-125км
14.10.2023 3:19	47,71370511	216,4301172	340,2667877
21.10.2023 3:20	39,40883428	206,6949066	301,5147005
20.01.2024 3:20	44,33077605	252,351425	435,0554787
21.03.2024 3:23	33,37103587	209,0591802	305,8269457
30.04.2024 3:22	41,54699777	232,753408	385,2613633
26.05.2024 3:23	51,55392136	216,4299096	322,5965303
29.08.2024 3:26	43,00843394	208,103363	304,2201135
Дневные			
Дата	0-10км	20-60км	0-125км

14.05.2024 14:22	36,73669081	207,2312957	320,1652372
28.06.2024 14:23	45,95565995	213,1433475	308,0076198
17.07.2024 14:24	46,95737094	217,9285165	335,9464994
05.08.2024 14:24	46,59441515	216,8149861	304,0581481

Здесь приводятся точные данные со спутника, вычисленные по предлагаемым NASA формулам, по нашим программам. Если в средних широтах общее содержание озона составляет порядка 290-320 ед.Д., конечно, вызывает вопрос 435 и 385 за некоторые дни. Само агентство по авиации предоставляет полученные данные со спутника без корректировок и рекомендует в зависимости от районов наблюдений согласно наземным измерениям ориентироваться на средние значения показателей приборов.

Для сравнения, данные со спутника над районом измерений обсерватории по рекомендованному сектору представлены на рисунке шесть.

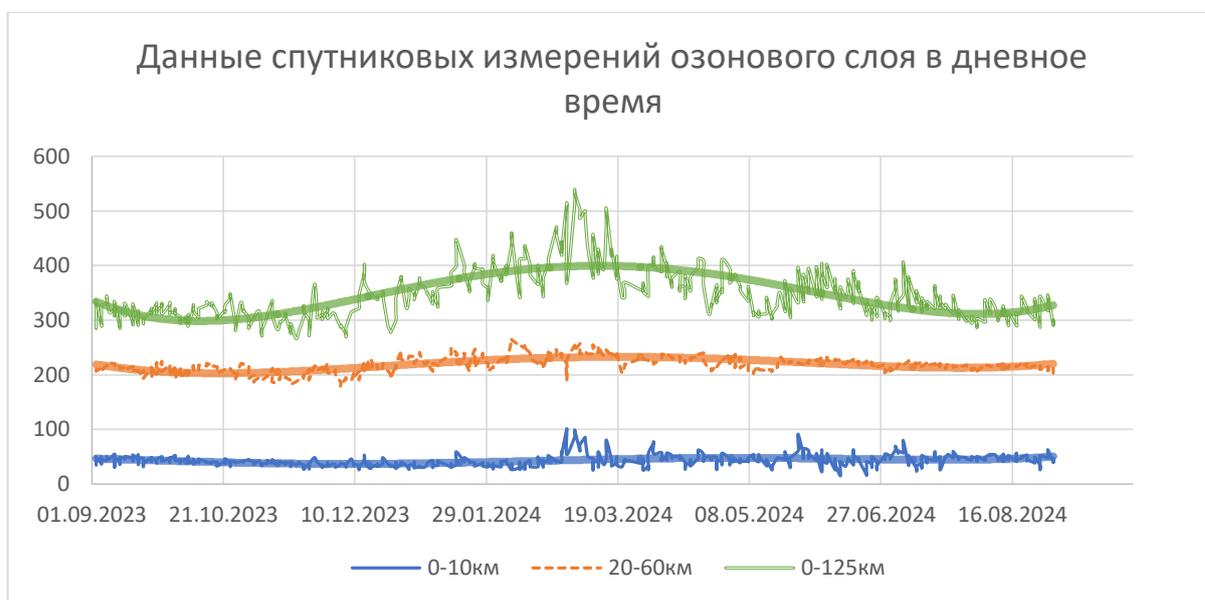




Рис.6. Содержание озона в тропосфере, стратосфере и всего озона по данным спутниковых измерений над северным Кыргызстаном.

Спутниковые данные об озоновом слое нашли свое подтверждение по многочисленным наземным измерениям [13]. В связи с этим пока на рисунках 7,8 представлены высотные распределения озона над Бишкеком только по результатам измерений спутниковых инструментов.

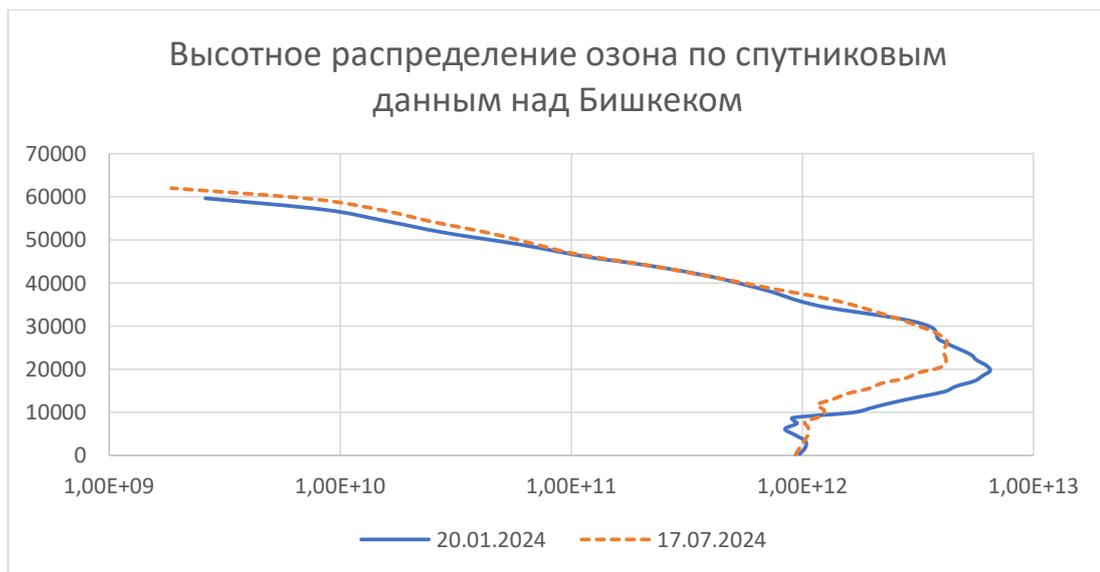


Рис.7.Высотное распределение озона над Бишкеком по спутниковым данным.



Рис.8.Высотное распределение тропосферного озона над Бишкеком.

Заключение. Высотное распределение озона над районом измерений обсерватории, над оз. Иссык-Куль и г. Бишкек, как по спутниковым измерениям, так и по наземным обсерватории, соответствуют распределению озона в данных широтах [13]: области максимальной концентрации озона находятся в пределах высот 24.5-26км. В тропосферном озоне, в его приземном слое влияние антропогенных факторов по приведенным нескольким измерениям со спутника явно отметить сложно, необходимы более длительные исследования.

Список литературы

1. Венская конвенция об охране озонового слоя – Вена 18-22 марта 1985 г. // egal.un.org/avl/pdf/ha/vcpol/vcpol_ph_r.pdf.
2. Монреальский протокол по проблеме веществ, разрушающих озоновый слой // Бюллетень ВМО. – 1988. – Т. 37, № 2. – с. 118-121.
3. Токтомышев С.Ж., Аманалиев М.К., Орозалиев М.Дж., Жумабеков А.А. Восстанавливается ли озоновый слой атмосферы над горным регионом Центральной Азии// Известия НАН КР, 2021, № 1, с.31-43.
4. Чен Б.Б., Петров Ю. М. Некоторые вопросы организации климатического мониторинга стратосферного аэрозоля в Киргизии //Материалы IV съезда ГО Кирг. ССР. Фрунзе: Илим. -1985. с.77-79.
5. Куликов Ю.Ю., Е.Ф. Ризов, Л.И. Федосеев, А.А. Швецов, И.В. Кузнецов, Э.П. Кукина, Измерение оптической толщи атмосферы Земли в линиях SO и O3 ($\lambda = 1.3- 1.4$ мм). // Изв. АН СССР, сер. «Физика атмосферы и океана», 1975, № 10, с. 1071-1075.
6. Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Поглощение микрорадиоволн примесными газами атмосферы. // Труды ИПФ АН СССР. Сборник «Спектральные исследования космического и атмосферного излучения», Горький, 1979, с.84-123.

7. Nov. 28 Dec. 3, Moscow. Edit. The University of Wales //Institute of Science and Technology, N1 -Nil, 1977.
8. Буров А.Б., А.А. Красильников, Ю.Ю. Куликов, ВТ. Рыскин, Наземные измерения вращательного перехода озона. // 2 Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам, Тезисы докладов, 163, Харьков, 1978.
9. Орозобаков А.Т., Рыскин В.Г. Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией // Известия РАН Физика атмосферы и океана, 2015, №1, том 51, с.88-95.
10. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Орозобаков Э.У. Наземные радиофизические наблюдения высотного распределения озона над регионом Средней Азии. //Журнал радиоэлектроники, Москва, 2018, №12, с.1-13.
11. Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Аманкулова Н.А., Орозобаков Э.У. Наземные измерения стратосферного озона над регионом Средней Азии в сравнении со спутниковыми данными // Известия ВУЗов, 2023, №1, с.3-13.
12. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>.
13. <https://www.woudc.org> (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Ласанху К. А., Касмамытов Н. К., Матяш И. В.,	Нитрид кремний легированный карбидом кремнием	3
Ашымканов К.Ш., Сагынбаев А.А., Уралиев А.А., Шабаев Ж.А.	Исследование поглощения миллиметровых волн в окнах прозрачности атмосферы в условиях высокогорья	9
Снимщиков И.А., Кутанов А.А., Сыдык уулу Н.	Гравировка полутонных изображений с предварительной коррекцией на деревянной поверхности излучением CO ₂ -лазера с $\lambda=10,6$ мкм	15
Гайнутдинова Р.Д., Крымская Д.Н.	Температурный отклик нижней атмосферы средних широт на нестационарные процессы в океане	20
Асанов А.А., Джаманкызов Н.К., Мекенбаев Б.Т., Ниязов Н.Т.	Об одном методе расчета параметров теплообменного процесса в угольном пиролизере	26
Касмамытов Н.К., Ласанху К.А., Макаева К.М.	Получение и свойства глазурованной электрофарфоровой керамики на основе местного сырья	35
Н.К. Касмамытов	Проблемы и перспективы подготовки научных кадров	41
Рахадиллов Б. К., Кусаинов Р. К., Бақыт Ж. Ә., Шынарбек А. Б. и др.	Исследование коррозионных характеристик сталей марки 65Г И 45 до и после электролитно-плазменного упрочнения	45
Рахадиллов Б. К., Кусаинов Р. К., Бақыт Ж. Ә., Шынарбек А. Б. и др.	Влияние технологических параметров электролитно-плазменной обработки на изменение механотрибологических свойств стали 45	56
Орозобаков А.Т.,	Высотное распределение озона над г.Бишкек по	80

**Саякбаева Б.Б.,
Орозобаков Ж.А.**

данным спутниковых изменений

69

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ**Документы**

- Сопроводительное письмо на имя главного редактора журнала печатается на бланке учреждения, представляющего статью;
- Рецензия.

Составные части статьи и порядок их следования

1. Объем материала от 4 до 10 страниц набранного текста оформленного в текстовом редакторе Microsoft Word, файл в формате .doc или .docx (шрифт 14, Times New Roman, интервал 1). Поля: верхнее, нижнее-20мм, левое-2,5мм, правое-15мм. Графический материал должен быть четким, разрешение не менее 300 пикселей;
2. В верхнем левом углу указывается универсальная десятичная классификация (УДК);
3. Следующий абзац – название статьи указывается по центру (шрифт 14 полужирный **ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ**);
4. Во втором ряду фамилия имя отчество автора(ов);
5. В третьем ряду указывается полное название учебного заведения (место работы или учебы), город и страна;
6. Далее через строку (шрифт 12, Times New Roman, интервал 1):
 - Аннотация не менее 50 слов на языке статьи (на русском и английском языках);
 - *Ключевые слова от 3 до 5 слов и словосочетаний, курсив* (на русском и английском языках);
7. Далее через строку идет изложение материала (шрифт 14, Times New Roman):
 - **Введение** (состояние проблемы, задачи исследования);
 - **Основная часть** – название в текст не вносится. Основную часть рекомендуется разбивать на разделы с названиями, отражающими их содержание: постановка задачи, методы исследования, математическая модель, обсуждение результатов и т.д.;
 - **Заключение** (выводы).
8. После основного текста указывается список литературы (Список использованной литературы). Список литературы оформляется не по алфавиту, а по мере того, как она встречается в тексте статьи. Схема **списка литературы**:
Авторы (обычный шрифт) → **название статьи** (обычный шрифт) → **выходные данные** (город, издательство) → **цифровые данные** (год, страницы). (Острейковский В. А., Карманов Ф. И. Статистические методы обработки экспериментальных данных с использованием пакета MathCAD. М.: ИНФРА-М, 2015. 207 с.);
9. Рисунки и таблицы набираются шрифтом Times New Roman 12 с одинарным междустрочным интервалом. Рисунки, диаграммы и таблицы создаются с использованием черно-белой гаммы. Использование цвета и заливок не допускается! Все рисунки и таблицы должны иметь название:
 - Рис. 1. Название (точка), выравнивание по центру;
 - Таблица 1 – Название (точка в конце не ставится) выравнивание по левому краю;
10. Формулы следует набирать с помощью редактора формул Microsoft Equation и нумеровать в круглых скобках (2).
11. Отдельным файлом подаются сведения об авторе:
 - контактный телефон, Viber, WhatsApp, Telegram, Mail.Ru Агент и т. п.;
 - Электронная почта e-mail – @mail.ru, gmail.com, @yandex.ru и т. п.;
12. **Авторы и рецензенты несут полную ответственность за актуальность, содержание, стиль и качество оформление статьи, а так же за ее актуальность.**

Басууга 18.11.2024-ж. кол коюлду.
№30 офсет кагазы.
Форматы 84x60 1/16
Көлөмү 7,5 б.т.
Нускасы 50. Заказ 2024.

«Avrasya Press» басмаканасы
Бишкек ш., 7-апрель көч. №1а. Тел: 0(312)299 300
E-mail: avrasyapress2003@mail.ru
www.avrasyapress.com