



Ғылыми журнал

Д. Серікбаев атындағы  
Шығыс Қазақстан  
техникалық университетінің

## **ХАБАРШЫСЫ**

### **ВЕСТНИК**

Восточно-Казахстанского  
технического университета  
им. Д. Серикбаева

Научный журнал

### **BULLETIN**

of D. Serikbayev  
East Kazakhstan  
technical university

Scientific journal



1999 жылдан бастап шығады  
Издается с 1999 года  
Founded in 1999

—◆—  
Жылына 4 рет шығады  
Выходит 4 раза в год  
Published 4 times a year

Өскемен, 2021  
Усть-Каменогорск, 2021  
Ust-Kamenogorsk, 2021

Бас редакторы

**Ж.К. Шаймарданов**

биология ғылымдарының докторы, профессор

**Редакция алқасы:**

Бас редактордың орынбасары:

Н.Ф. Денисова, ф.-м.ғ.к.,

Жауапты хатшы – О.Н. Николаенко

Алқа мүшелері:

Абрахам Атта Огву, профессор (Ұлыбритания)

Д.Л. Алонцева, ф.-м.ғ.к., профессор (Қазақстан)

Бешо Масахико, Dr.PhD, профессор (Жапония)

И.А. Бессмертный, т.ғ.д., профессор (Ресей)

Вальдемар Войчик, т.ғ.д. (Польша)

С.А. Выжва, г.ғ.д., профессор (Украина)

М.В. Дудкин, т.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Б.А. Дьячков, г.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Н.К. Ердыбаева, д.ф.-м.н. (Қазақстан)

В.А. Кескинов, т.ғ.к., доцент (Ресей)

Ю.В. Крак, т.ғ.д., профессор (Украина)

Н.А. Куленова, т.ғ.к., асс. профессор (Қазақстан)

С.В. Мамяченков, т.ғ.д., профессор (Ресей)

О.А. Манцуоров, полковник (Қазақстан)

М. Млынчак, Dr. hab, профессор (Польша)

С.В. Плотников, ф.-м.ғ.д., профессор (Қазақстан)

А.Д. Погребняк, ф.-м.ғ.д., профессор (Украина)

Н.В. Прохоренкова, Dr.PhD (Қазақстан)

М.Д. Старостенков, ф.-м.ғ.д., (Ресей)

Я. Стрычек, Dr. hab, профессор (Польша)

Н.А. Чарыков, х.ғ.д., профессор (Ресей)

Ю.Н. Шапошник, т.ғ.д., профессор (Ресей)

@ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан  
техникалық университеті, 2021

Главный редактор

**Ж.К. Шаймарданов**

доктор биологических наук, профессор

**Редакционная коллегия:**

Заместитель главного редактора:

Н.Ф. Денисова, к.ф.-м.н.,

Ответственный секретарь – О.Н. Николаенко

Члены коллегии:

Абрахам Атта Огву, профессор (Великобритания)

Д.Л. Алонцева, к.ф.-м.н., профессор (Казахстан)

Бешо Масахико, Dr.PhD, профессор (Япония)

И.А. Бессмертный, д.т.н., профессор (Россия)

Вальдемар Войчик, д.т.н. (Польша)

С.А. Выжва, д.г.н., профессор (Украина)

М.В. Дудкин, д.т.н., профессор (Казахстан)

Б.А. Дьячков, д.г.-м.н., профессор (Казахстан)

Н.К. Ердыбаева, д.ф.-м.н. (Казахстан)

В.А. Кескинов, к.т.н., доцент (Россия)

Ю.В. Крак, д.т.н., профессор (Украина)

Н.А. Куленова, к.т.н., асс. профессор (Казахстан)

С.В. Мамяченков, д.т.н., профессор (Россия)

О.А. Манцуоров, полковник (Казахстан)

М. Млынчак, Dr. hab, профессор (Польша)

С.В. Плотников, д.ф.-м.н., профессор (Казахстан)

А.Д. Погребняк, д.ф.-м.н., профессор (Украина)

Н.В. Прохоренкова, Dr.PhD (Казахстан)

М.Д. Старостенков, д.ф.-м.н., (Россия)

Я. Стрычек, Dr. hab, профессор (Польша)

Н.А. Чарыков, д.х.н., профессор (Россия)

Ю.Н. Шапошник, д.т.н., профессор (Россия)

Chief Editor

Doctor of Biological Sciences, Professor –  
**Zh. Shaimardanov**

**Editorial Team:**

Deputy Chief Editor

Natalya Denissova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Executive Secretary – Oksana Nikolaenko

Members of Team:

Abraham Atta Ogwu, professor (Great Britain)

Darya Alontseva, Candidate of Phys.-math. sciences, professor  
(Kazakhstan)

Masahiko Bessho, Dr.PhD, professor (Japan)

Igor Bessmertnyy, Dr. techn. sciences, professor (Russia)

Waldemar Wojcik, Dr. techn. sciences, professor (Poland)

Sergey Vyzhva, Geophysics Dr. geolog. sciences, professor (Ukraine)

Mikhail Dudkin, Dr. techn. sciences, Professor (Kazakhstan)

Boris Dyachkov, Dr. geolog.-mineral. sciences, Professor (Kazakhstan)

Nazgul Yerdybayeva, Dr. phys.-math. sciences, professor (Kazakhstan)

Viktor Keskinov, PhD in Chemistry sciences (Russia)

Yuri Krak, Dr. techn. sciences, Professor (Ukraine)

Natalya Kulenova, Cand. techn. sciences, Associate professor (Kazakhstan)

Sergey Myamyachenkov, Dr. techn. sciences (Russia)

Oleg Mantsurov, Colonel (Kazakhstan)

Marek Mlyncek, Dr. hab, professor (Poland)

Sergey Plotnikov, Dr. phys.-math. sciences, professor (Kazakhstan)

Aleksandr Pogrebnyak, Dr. phys.-math. sciences, professor (Ukraine)

Nadezhda Prokhorenkova, Dr. PhD (Kazakhstan)

Mikhail Starostenkov, Dr. phys.-math. sciences, professor (Russia)

Jaroslav Strycek, Dr. hab, professor (Poland)

Nikolay Charykov, Dr. of Chemistry (Russia)

Yuri Shaposhnik, Dr. techn. sciences, professor (Russia)

D. Serikbayev East Kazakhstan  
technical university, 2021

## М А З М Ұ Н Ы

### ЖЕР ТУРАЛЫ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ГЕОГРАФИЯЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

<b>Алимбетов С.Е., Арынова Ш.Ж., Корогод Н.П., Чидунчи И.Ю., Урузалинова М.Б.</b> МЕТАЛЛ ӨҢДЕЙТІН КӘСІПОРЫННЫҢ ЖҰМЫС АЙМАҒЫНДАҒЫ АТМОСФЕРАЛЫҚ АУАНЫҢ КҮЙІН ТАЛДАУ	8
---	---

### ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

<b>Апшикур Б., Ипалаков Т.Т., Капасов А.К., Касымов Д.К., Алимкулов М.М.</b> ОСЬТІК ВАГОН ЖҮКТЕМЕСІНІҢ ЖОҒАРЫЛАУЫ КЕЗІНДЕ ЖЕР ТӨСЕМІНІҢ ЖҰМЫС АЙМАҒЫ ТОПЫРАҚТАРЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІНІҢ ӨЗГЕРУ ДИНАМИКАСЫН БАҒАЛАУ	12
<b>Аубакиров А.А.</b> ПИД-РЕТТЕУІШПЕН ҚИСАЙТУ БОЙЫНША АЛТЫ ДӘРЕЖЕЛІ ЕРКІНДІГІМЕН ПҰА-НЫҢ ҰШУ ДИНАМИКАСЫНЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС МОДЕЛІН ЗЕРТТЕУ	20
<b>Аубакиров А.А., Закарин А.Ж.</b> ПИД-РЕТТЕГІШІ БАР, ТАНГАЖ БОЙЫНША АЛТЫ ДӘРЕЖЕЛІ ЕРКІНДІГІМЕН ПҰА-НЫҢ ҰШУ ДИНАМИКАСЫНЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС МОДЕЛІН ЗЕРТТЕУ	25
<b>Демин В.Ф., Иманов М.О., Кожанов Н.Г.</b> ӘЛСІРЕГЕН ТАУ СІЛЕМДЕРІН ОЛАРДЫҢ ЖАЙ-КҮЙІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП НЫҒАЙТУ	34
<b>Демин В.Ф., Иманов М.О., Кожанов Н.Г.</b> ТҰРАҚСЫЗ ТАУ СІЛЕМДЕРІН ТҰРАҚТАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ	39
<b>Қантай Н., Рахадиллов Б., Набиолдина А.</b> ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН АЛЫНҒАН АЛЮМИНИЙ МЕН ЦИРКОНИЙ ОКСИДІ НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫННЫҢ АДГЕЗИЯЛЫҚ БЕРІКТІГІН ЖӘНЕ КОРРОЗИЯҒА ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ	45
<b>Макашев Б.К., Жолмагамбетов Н.Р., Едіге М.М., Орынбек А.Е., Махаббатова А.Т.</b> ЖҰМЫС АЙМАҒЫНЫҢ ШАҢДАНУЫН ТӨМЕНДЕТУ ЖӨНІНДЕГІ ІС-ШАРАЛАР	54
<b>Пазылбек С.А., Кудрявцева И., Джакишев А.А., Дүйсехан М.</b> $\text{CaSO}_4:\text{RE}^{3+}$ ФОСФОРЫН РЕНТГЕНДІК СӘЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕ ЖАҢА ҚҰРЫЛЫМДЫҚ АҚАУЛАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ	61
<b>Пазылбек С.А., Лущик А., Агабек А., Ескермесов Д.</b> АУЫР ИОНДАРЫ БАР МЕТАЛЛ ОКСИДТЕРІНДЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ АҚАУЛАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ	67
<b>Сакенова Р.Е., Погребняк А.Д., Ердыбаева Н.К., Қылышқанов М.Қ.</b> КРЕМНИЙ ИОНДАРЫМЕН ИМПЛАНТТАЛҒАН $\text{CrN/ZrN/Cr/Zr}$ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ ЖАБЫНДАҒЫ ДИФФУЗИЯ ЖӘНЕ МИКРОСЕГРЕГАЦИЯ ПРОЦЕСТЕРІ	73
<b>Тохметов А.Т., Амирова А.С., Жанасбаева А.С.</b> ӨНДІРІСТІК ЗАТТАР ИНТЕРНЕТІНІҢ НЕГІЗГІ ҚАУІПСІЗДІК МӘСЕЛЕЛЕРІНЕ ШОЛУ	82
<b>Утепов Е.Б., Тулебекова А.С., Жарасов Ш.Ж., Абдулина С.А.</b> БЕТОННЫҢ БЕРІКТІГІН ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҚОЛДАНУДЫҢ ЕҢ ҮЗДІК ТӘЖІРИБЕЛЕРІ	91

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУКИ О ЗЕМЛЕ И ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Алимбетов С.Е., Арынова Ш.Ж., Корогод Н.П., Чидунчи И.Ю., Урузалинова М.Б.** АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ 8

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

- Алшикур Б., Ипалаков Т.Т., Капасов А.К., Касымов Д.К., Алимкулов М.М.** ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ПОВЫШЕНИИ ОСЕВОЙ ВАГОННОЙ НАГРУЗКИ 12
- Аубакиров А.А.** ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА БПЛА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПО КРЕНУ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ 20
- Аубакиров А.А., Закарина А.Ж.** ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА БПЛА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПО ТАНГАЖУ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ 25
- Демин В.Ф., Иманов М.О., Кожанов Н.Г.** УПРОЧНЕНИЕ ОСЛАБЛЕННЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ С УЧЕТОМ ИХ СОСТОЯНИЯ 34
- Демин В.Ф., Иманов М.О., Кожанов Н.Г.** ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ 39
- Қантай Н., Рахадилев Б., Набиолдина А.** ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ ПОЛУЧЕННОГО ДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ 45
- Макашев Б.К., Жолмагамбетов Н.Р., Едіге М.М., Орынбек А.Е., Махаббатова А.Т.** МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ЗАПЫЛЕННОСТИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ 54
- Пазылбек С.А., Кудрявцева И., Джакишев А.А., Дүйсехан М.** СОЗДАНИЕ НОВЫХ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ РЕНТГЕНОВСКОМ ОБЛУЧЕНИИ ФОСФОРА  $CaSO_4$  61
- Пазылбек С.А., Лущик А., Агабек А., Ескермесов Д.** СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОКСИДАХ МЕТАЛЛОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ 67
- Сакенова Р.Е., Погребняк А.Д., Ердыбаева Н.К., Қылышқанов М.Қ.** ПРОЦЕССЫ ДИФфуЗИИ И МИКРОСЕГРЕГАЦИИ В НАНОСТРУКТУРНОМ ПОКРЫТИИ CRN/ZRN/CR/ZR, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ КРЕМНИЯ 73
- Тохметов А.Т., Амирова А.С., Жанасбаева А.С.** ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОМ ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ 82
- Утепов Е.Б., Тулебекова А.С., Жарасов Ш.Ж., Абдулина С.А.** ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА 91

## CONTENT

---

### EARTH SCIENCES AND GEOGRAPHICAL SCIENCES

---

<b><i>Alimbetov S.E., Arynova Sh.Zh. Korogod N. P., Chidunchi I.Yu., Uruزالinova M.B.</i></b> ANALYSIS OF THE STATE OF ATMOSPHERIC AIR IN THE WORKING AREA OF A METALWORKING ENTERPRISE	8
---	---

---

### TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

---

<b><i>Apshikur B., Ipalakov T.T., Kapasov A.K., Kassymov D.K., Alimkulov M.M.</i></b> ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SOIL OF THE WORKING AREA OF THE ROADBED WITH AN INCREASE IN THE AXIAL CAR LOAD	12
<b><i>Aubakirov A.A.</i></b> 3. INVESTIGATION OF A NONLINEAR MODEL OF UAV FLIGHT DYNAMICS WITH 6 DEGREES OF FREEDOM IN ROLL WITH A PID CONTROLLER	20
<b><i>Aubakirov A.A., Zakarina A.Zh.</i></b> INVESTIGATION OF A NONLINEAR MODEL OF UAV FLIGHT DYNAMICS WITH 6 DEGREES OF FREEDOM IN PITCH WITH A PID CONTROLLER	25
<b><i>Dyomin V.F., Imanov M.O., Kozhanov N.G.</i></b> STRENGTHENING OF WEAKEN MOUNTAIN MASSIVES TAKING INTO ACCOUNT THEIR CONDITION	34
<b><i>Dyomin V.F., Imanov M.O., Kozhanov N.G.</i></b> TECHNOLOGY FOR STABILIZING UNSTABLE MOUNTAINS	39
<b><i>Kantay N., Rakhadilov B.K., Nabioldina A.</i></b> INVESTIGATION OF THE ADHESION STRENGTH AND CORROSION RESISTANCE OF THE COATING BASED ON ALUMINUM OXIDE AND ZIRCONIUM OBTAINED BY THE DETONATION METHOD	45
<b><i>Makashev B.K., Zholmagambetov N.R., Yedige M.M., OrynbeK A.E., Makhabbatova A.T.</i></b> , MEASURES TO REDUCE THE DUST CONTENT OF THE WORKING AREA	54
<b><i>Pazylbek S.A., Kudryavtseva I., Jakishev A.A., Duisehan M.</i></b> CREATION OF NEW STRUCTURAL DEFECTS DURING X-RAY IRRADIATION OF CASO <sub>4</sub> PHOSPHORUS	61
<b><i>Pazylbek S.A., Lushchik A., Agabek A., Yeskermesov D.K.</i></b> СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОКСИДАХ МЕТАЛЛОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ	67
<b><i>Sakenova R.E., Pogrebnyak A.D., Yerdybayeva N.K., Kylyshkanov M.K.</i></b> DIFFUSION AND MICROSEGREGATION PROCESSES IN A NANOSTRUCTURED CRN/ZRN/CR/ZR COATING IMPLANTED WITH SILICON IONS	73
<b><i>Tokhmetov A.T., Amirova A.S., Zhanasbaeva A.S.</i></b> OVERVIEW OF THE MAIN SECURITY ISSUES IN THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS	82
<b><i>Uteпов Y.B., Tulebekova A.S., Zharassov Sh. Zh., Abdulina S.A.</i></b> BEST PRACTICE IN CONCRETE STRENGTH MEASUREMENT SYSTEMS	91



ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ҚОРҒАУ. АДАМ ЭКОЛОГИЯСЫ  
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЭКОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА  
ENVIRONMENTAL PROTECTION. HUMAN ECOLOGY

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_8

MPHTI 87.17.15

**С.Е. Алимбетов<sup>1</sup>, Ш.Ж. Арынова<sup>1</sup>, Н.П. Корогод<sup>2</sup>, И.Ю. Чидунчи<sup>1</sup>, М.Б. Урузалинова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Торайгыров университет (Павлодарский государственный университет), г. Павлодар, Казахстан

<sup>2</sup>Павлодарский педагогический университет, г. Павлодар, Казахстан

E-mail:shinar\_uzh@mail.ru

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ  
ПРЕДПРИЯТИЯ ПО МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ**

**МЕТАЛЛ ӨНДЕЙТІН КӘСІПОРЫННЫҢ ЖҰМЫС АЙМАҒЫНДАҒЫ  
АТМОСФЕРАЛЫҚ АУАНЫҢ КҮЙІН ТАЛДАУ**

**ANALYSIS OF THE STATE OF ATMOSPHERIC AIR IN THE WORKING AREA  
OF A METALWORKING ENTERPRISE**

**Аннотация.** В работе исследовано состояние атмосферного воздуха в рабочей зоне предприятия по легкой металлообработке на соответствие санитарным нормам. В атмосферном воздухе обнаружены концентрации пыли кремнесодержащей и марганца, превышающие показатель предельно допустимой концентрации в 2 и 4 раза в зоне с наименьшим воздухообменом. Выявлена значимая положительная корреляционная связь ( $r_{0,95} = 0,7$ ) между концентрацией марганца и пыли кремнесодержащей.

**Ключевые слова:** атмосферный воздух, сварочный аэрозоль, марганец, пыль кремнесодержащая.

**Аңдатпа.** Мақалада жеңіл металл өңдейтін кәсіпорынның жұмыс аймағындағы атмосфералық ауаның жағдайы санитарлық нормаларға сәйкестігі зерттелген. Атмосфералық ауада кремнийлі шаң мен марганецтің концентрациясы табылды, бұл ауа алмасу деңгейі төмен аймақта шекті рұқсат етілген концентрациядан 2 және 4 есе асып түсті. Марганец пен кремнийлі шаңның концентрациясы арасында айтарлықтай оң корреляция анықталды ( $r_{0,95} = 0,7$ ).

**Түйін сөздер:** атмосфералық ауа, дәнекерлеу аэрозоли, марганец, кремнийлі шаң.

**Abstract.** The paper investigates the state of atmospheric air in the working area of a light metalworking enterprise for compliance with sanitary standards. In the atmospheric air, concentrations of siliceous dust and manganese were found, exceeding the maximum permissible concentration by 2 and 4 times in the zone with the lowest air exchange. A significant positive correlation ( $r_{0,95} = 0,7$ ) was revealed between the concentration of manganese and siliceous dust.

**Keywords:** atmospheric air, welding aerosol, manganese, siliceous dust.

**Введение.** Актуальность исследования обусловлена повышенной концентрацией сварочного аэрозоля в атмосферном воздухе рабочей зоны предприятия по металлообработке, который может оказывать негативное воздействие на организм человека, а при определенной интенсивности и длительности воздействия привести к развитию профессиональных заболеваний. Наибольшее воздействие на здоровье работающих оказывает твер-



дая составляющая сварочного аэрозоля, которая по данным физико-химических исследований состоит из металлов (железо, марганец, цинк), их оксидов, фторидов, шпинелей, а также пыли, содержащей до 70 % аморфного и кристаллического оксида кремния [1, 2]. По данным Войткевич содержание соединений марганца в твердой составляющей сварочных аэрозолей составляет около 20 %, соответственно в организме работающих их средняя концентрация в 50 раз выше [3]. Известно, что марганец оказывает влияние на центральную нервную систему, является аллергеном; пыль кремнесодержащая при длительном воздействии накапливается в легких. Поэтому важным является определение данных веществ в атмосферном воздухе рабочей зоны предприятия и возможных путей улучшения работы систем вентиляции и повышения эффективности пылеулавливающих устройств.

*Материалы и методы исследований.* На территории ТОО Компания «ТРОУА» расположен цех производства легких металлоконструкций, который включает в себя следующие участки: лазерный станок по раскрою листового металла, участок абразивной обработки стальных труб (резка, торцовка, шлифовка), сварочные посты, зону мастера цеха, вход. Деятельность данного цеха оказывает негативное влияние на окружающую среду вследствие применения различных технологических процессов обработки металла. На территории цеха были условно выделены следующие виды зон, на которых был проведен пробоотбор: 1 – участок раскроя трубного проката, 2 – участок лазерного раскроя листового и трубного материала, 3 – сварочный пост № 4, 4 – сварочный пост № 2 -3, 5 – отметка на высоте 3,5 м, 6 – вход в цех (рис. 1).

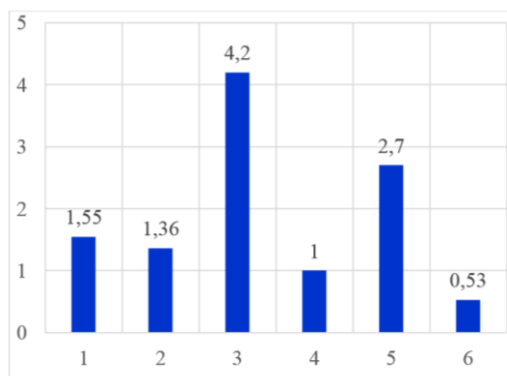


Рисунок 1. План помещения с отметкой зон отбора проб

Замеры проведены по гигиеническому нормативу 168 от 28.02.2015 г. «Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах». В качестве технического средства для отбора проб использовался аспиратор электрический

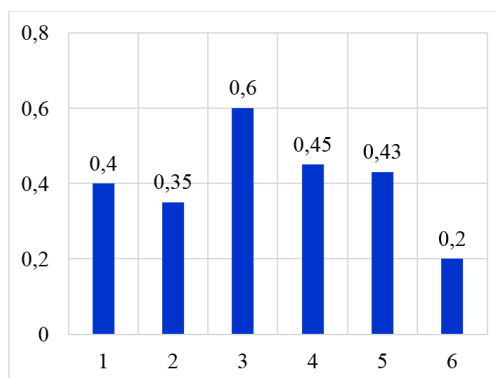
ПУ-4Э (сертификат о поверке ВР-07/10074106 действителен до 20.05.2021 г.). Для определения концентрации марганца использовался фотометрический метод согласно СТ РК 2233-2012 [5]. Для определения концентрации пыли кремнесодержащей использовался гравиметрический метод по государственному стандарту 2382-20132 [6].

*Результаты исследований и обсуждение.* В ходе проведенного исследования, установлено, что цех производит выбросы следующих видов загрязняющих веществ: пыль кремнесодержащую, марганец в сварочных аэрозолях до 20 % (протокол измерений воздуха рабочей зоны № 348). Полученные результаты исследования показали, что среднеарифметическая концентрация пыли кремнесодержащей  $1,9 \text{ мг/м}^3$  превышает значение ПДК ( $0,4 \text{ мг/м}^3$ ) в 4,5 раз, максимальное содержание равное  $4,2 \text{ мг/м}^3$  обнаружено на сварочном посту № 4, минимальное на 6 участке (вход в цех) –  $0,53 \text{ мг/м}^3$  (рис. 2).



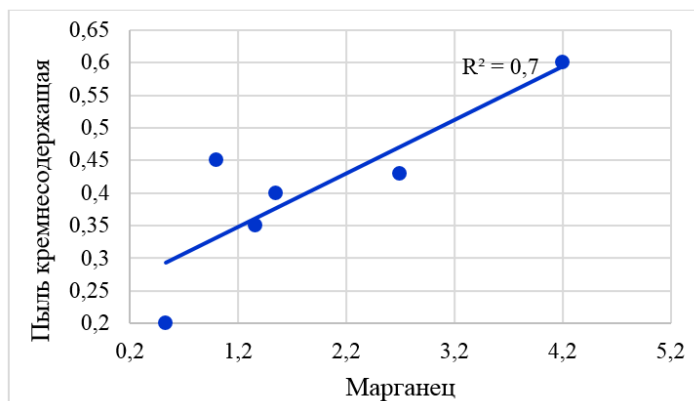
**Рисунок 2.** Концентрация пыли кремнесодержащей в рабочих зонах цеха по производству легких металлоконструкций,  $\text{мг/м}^3$

Повышенная концентрация исследуемого компонента связана с наименьшим воздухообменом на условно выделенном 3 участке. Средняя концентрация марганца в цехе равная  $0,4 \text{ мг/м}^3$  превышает значения ПДК ( $0,2 \text{ мг/м}^3$ ) в двухкратном размере. Распределение  $Mn$  в воздухе по участкам относительно равномерное, за исключением 6 зоны, поскольку воздухообмен в большей степени происходит естественным образом. Наибольшая концентрация отмечается на 3 участке –  $0,6 \text{ мг/м}^3$  (рис. 3).



**Рисунок 3.** Концентрация марганца в атмосферном воздухе рабочей зоны цеха по производству легких металлоконструкций,  $\text{мг/м}^3$

Результаты проведенного исследования позволили выявить значимую положительную корреляционную связь между содержанием марганца и пыли кремнесодержащей ( $r_{0,95} = 0,7$ ) (рис. 4).



**Рисунок 4.** Корреляционная связь между концентрацией Mn и пыли кремнесодержащей, мг/м<sup>3</sup>

Результаты замеров воздуха рабочей зоны показывают, что фактические значения концентрации вредных веществ в отдельных участках цеха значительно различаются и превышают определенные для них значения предельно допустимой концентрации. Обнаруженный участок с наиболее высокими концентрациями исследуемых компонентов требует установки системы очистки выбросов для обеспечения нормативных условий труда на участке производства легких металлоконструкций.

**Заключение.** Основными загрязняющими веществами в атмосферном воздухе рабочей зоны изучаемого предприятия являются сварочный аэрозоль, содержащий марганец, и пыль кремнесодержащая, которая выделяется при шлифовании металлических изделий. Повышенное воздействие сварочных аэрозолей, пыли и других опасных факторов производственной среды способствует высокому профессиональному риску работающих.

#### Список литературы

1. Степанова Т.В., Нестеренко Н.А., Коржова Е.Н., Смагунова А.Н. Процессы образования и физико-химические свойства сварочных аэрозолей / Сварочно производство. – 2015. – № 10. – С. 12-20.
2. Кузнецова О.В., Коржова Е.Н., Шмелева Е.И., Романенко С.В., Антипенко И.С., Степанова Т.В. Оценка правильности результатов определения марганца и железа в воздухе рабочей зоны методами фотометрического и вольтамперометрического анализа. «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». – 2017. – Т. 83. – №4. – С. 66-71.
3. Войткевич В.Г. Методы исследования сварочных аэрозолей / Автоматическая сварка. – 1982. – № 3. – С. 51-54.
4. СТ РК 2233-2012 «Воздух рабочей зоны. Измерение концентрации железа, никеля, марганца, титана и оксидов хрома (III и VI) в сварочном аэрозоле». – Дата введения 01.01.2014.
5. СТ РК 2382-2013 «Охрана природы. Воздух рабочей зоны. Определение неорганической пыли в воздухе рабочей зоны». – Дата введения 01.01.2015.



ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ  
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА  
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_12  
MPHTI 67.03.03

**Б. Апшикур<sup>1</sup>, Т.Т. Ипалаков<sup>1</sup>, А.К. Капасов<sup>1</sup>, Д.К. Касымов<sup>1</sup>, М.М. Алимкулов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2</sup>АО «КазАТК» им. М. Тынышпаева, г. Алматы, Казахстан

E-mail: azamat040594@mail.ru

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ПОВЫШЕНИИ  
ОСЕВОЙ ВАГОННОЙ НАГРУЗКИ**

**ОСЬТІК ВАГОН ЖҮКТЕМЕСІНІҢ ЖОҒАРЫЛАУЫ КЕЗІНДЕ ЖЕР ТӨСЕМІНІҢ  
ЖҰМЫС АЙМАҒЫ ТОПЫРАҚТАРЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІНІҢ  
ӨЗГЕРУ ДИНАМИКАСЫН БАҒАЛАУ**

**ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF  
THE SOIL OF THE WORKING AREA OF THE ROADBED WITH AN INCREASE IN THE  
AXIAL CAR LOAD**

**Аннотация.** В результате анализа расчетов по изменению модулей упругости различных слоев грунта и распределения положения результирующего вектора деформаций земляного полотна при возрастании осевой нагрузки дана количественная оценка влияния повышения осевых нагрузок, введения новых типов грузовых вагонов (шести- и восьмиосных) на величину рабочей зоны железнодорожного земляного полотна.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние земляного полотна, метод конечных элементов, георешетка, геосетка, основная площадка земляного полотна.

**Аңдатпа.** Топырақтың әртүрлі қабаттарының серпімділік модульдерінің өзгеруі бойынша есептерді талдау және осьтік жүктеменің өсуі кезінде жер төсемінің деформацияларының нәтижесінде пайда болған векторының жағдайын бөлу нәтижесінде осьтік жүктемелердің артуының, жүк вагондарының жаңа түрлерін (алты және сегіз осьті) енгізудің теміржол жер төсемінің жұмыс аймағының шамасына әсеріне сандық баға берілді.

**Түйін сөздер:** жер төсемінің кернеулі-деформацияланған күйі, соңғы элементтер әдісі, геотор, жер төсемінің негізгі алаңы.

**Abstract.** The analysis of calculations by changing the modulus of elasticity of different soil layers and the distribution position of the result vector of deformations with increasing axial load, a quantitative assessment of the effects of increasing axial loads, the introduction of new types of freight wagons on the size of the working area of the railway subgrade.

**Keywords:** stress-strain state of the roadbed, finite element method, geogrid, the main site of the roadbed.

**Введение.** Цель данной статьи – расчетная оценка динамики изменения напряженно-деформированного состояния грунтов рабочей зоны земляного полотна при повышении осевой вагонной нагрузки, с использованием при этом известных методов проведения

полевых и камеральных работ [1]. К полевым работам относятся: бурение шпуров, отбор проб, замер трещиноватости, описания различных состояний массива или грунтов, эксплуатационных и климатических факторов и т.п. К камеральным работам относятся: определение в лабораторных условиях механических свойств грунтов, их систематизация, выявление закономерностей и т.п. Выполнены массовые расчеты напряженно-деформированного состояния рабочей зоны земляного полотна до и после усиления, экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности глинистых грунтов рабочей зоны земляного полотна, расчеты напряженно-деформированного состояния консолидирующегося слоя земляного полотна, разработка рекомендаций по усилению верха земляного полотна в климатических зонах Республики Казахстан. При этом использовались сертифицированные программы расчетных систем COSMOS/M.

*Актуальность темы, анализ изученности вопроса и постановка проблемы.* В последние годы на железных дорогах РК проведены значительные мероприятия по усилению верхнего строения пути. Почти повсеместно внедрен современный рельс типа Р65, а также широко внедряются железобетонные шпалы, упругие промежуточные рельсовые скрепления, щебеночный балласт. Увеличивается полигон бесстыкового пути. Известно, что рельсовая колея бесстыкового пути требует стабильности подрельсового основания – балластного слоя и земляного полотна.

К сожалению, при строительстве и эксплуатации магистральных железных дорог недостаточно внимания уделяется усилению фундамента железнодорожного пути – земляному полотну. В настоящее время наибольшее число остаточных деформаций земляного полотна приходится на его основную площадку, которая непосредственно контактирует с балластным слоем верхнего строения пути.

При введении поездов с более высокими осевыми нагрузками или при существенном повышении скоростей движения на ряде участков железнодорожное земляное полотно подвергается интенсивным деформациям и нуждается в усилении. Традиционная нормативная база расчетов железнодорожного земляного полотна не учитывает изменение температурно-влажностного режима земляного полотна в течение года, не дифференцированы технические требования по устройству верха железнодорожного земляного полотна в разных климатических зонах РК.

Повышение осевой нагрузки, введение шести- и восьмиосных грузовых вагонов существенно повышают величину рабочей зоны земляного полотна. Термин «рабочая зона» земляного полотна является новым. Он отражает изменения в условиях эксплуатации железных дорог на современном этапе (повышение осевых нагрузок, скоростей движения, введение большегрузных вагонов, создание кольцевых железнодорожных маршрутов). Необходимо включение этого термина в нормативы проектирования железнодорожного земляного полотна.

Возникла практическая потребность в анализе напряженно-деформированного состояния грунтов «рабочей зоны», который позволил бы обосновать способы усиления верха земляного полотна для обеспечения стабильности основной площадки земляного полотна. Несмотря на существенные затраты АО «НК «КТЖ» по стабилизации деформирующегося земляного полотна, его доля в общей длине дорог превышает 10 %. Это свидетельствует о системной причине сложившегося положения, когда почти повсеместно применяются одинаковые поперечные профили земляного полотна независимо ни от условий эксплуатации, ни от климатических условий региона, где построена железная дорога. Поэтому научная проблема обеспечения стабильности основной площадки железнодорожного земляного полотна является весьма *актуальной*. В конце статьи, на основании результатов исследований причин и характера деформирования основной

площадки железнодорожного земляного полотна, приведены выводы и рекомендации, которые являются *научной новизной и практической ценностью* работы.

Исследованиям основной площадки земляного полотна уделялось большое внимание со стороны специалистов. Решению проблемы стабилизации основной площадки земляного полотна железных дорог посвящены работы М.В. Аверочкиной, Н.И. Ананьева, Е.Т. Ауесбаева, Е.С. Ашпиза, В.Ф. Барабошина, М.Ф. Вериги, В.В. Виноградова, М.Н. Гольдштейна, В.А. Грицика, П.И. Дыдышко, Б.А. Евдокимова, Г.Н. Жинкина, Р.С. Закирова, Э.П. Исаенко, А.Л. Исакова, Е.А. Исаханова, Н.И. Карпущенко, А.Ф. Кима, А.Я. Когана, Г.Г. Коншина, С.А. Косенко, В.С. Лысюка, А.Н. Марготьева, С.К. Мусаева, Г.С. Мусаевой, А.Д. Омарова, П.Г. Пешкова, С.Н. Попова, И.В. Прокудина, М.П. Смирнова, Ю.П. Смолина, Ю.И. Соловьева, В.П. Титова, А.К. Уразбекова, С.С. Хасенова, Б.Д. Хействера, А.А. Цернанта, С.Н. Шарапова, Г.М. Шахунянца, Е.В. Яковлевой, Т.Г. Яковлевой.

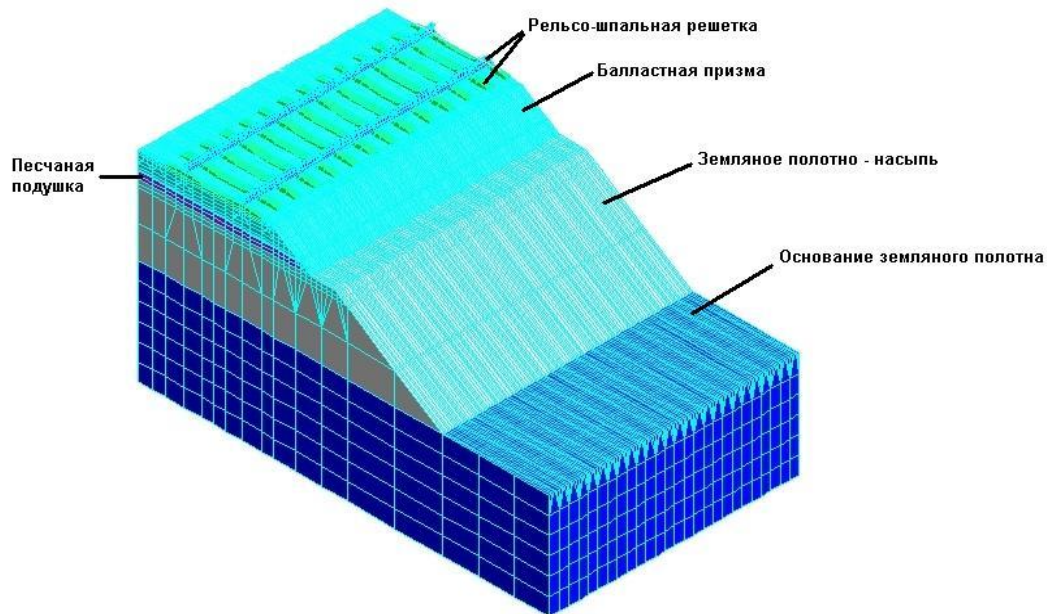
Исследования ученых позволили установить ряд закономерностей, проявляющихся в грунтах основной площадки и верха земляного полотна при воздействии разных факторов, и рекомендовать способы усиления земляного полотна. Тем не менее, изменение условий эксплуатации железных дорог требует новых подходов к решению этой проблемы и учета климатических условий регионов. Если в недавнем прошлом требовалось обеспечить упругую работу железнодорожного земляного полотна, то при введении скоростного движения поездов требуется нормировать и величину вертикальной деформации насыпи. Для усиления основной площадки насыпей сегодня применяются не только грунты, но и различные материалы, существенно отличающиеся от грунтов механическими свойствами, которые невозможно учесть, применяя традиционные математические модели.

Из обобщения результатов предшествующих исследований причин деформирования основной площадки железнодорожного земляного полотна также следует, что учет только ее вертикальных деформаций не отражает всей сложности происходящих процессов, ход которых зависит не только от механических параметров грунта основной площадки, но и от параметров балластной призмы, осевой нагрузки и скорости движения поездов. Для исследования мер усиления верха земляного полотна необходимо использовать полную модель железнодорожного пути, нагруженную типовым подвижным составом.

В последнее время происходит неконтролируемое повышение поездной нагрузки на железнодорожное земляное полотно без установления пределов возможной нагрузки. Очевидно, что при определенной нагрузке начнутся необратимые остаточные деформации, представляющие угрозу безопасности движения поездов.

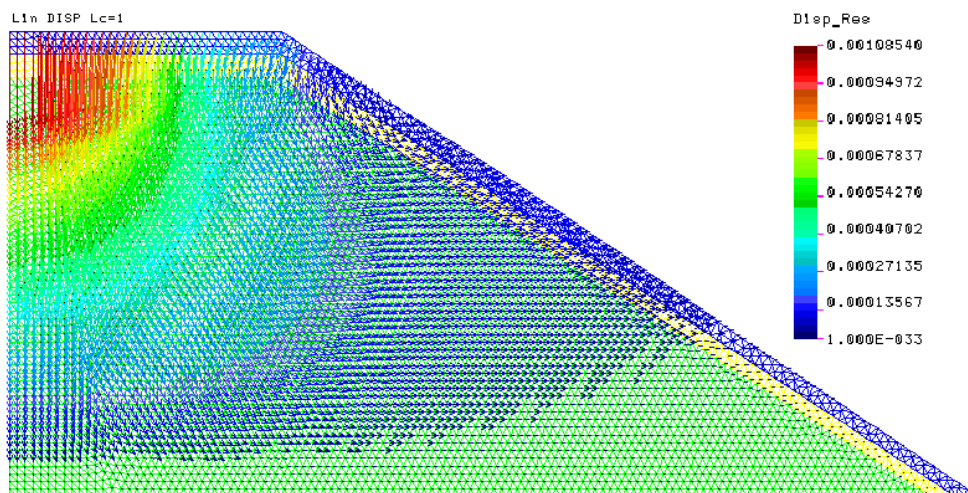
В связи с недостаточной изученностью физики процесса изменения НДС (напряженно-деформированного состояния) железнодорожных насыпей при увеличении поездной нагрузки рассмотрим эти изменения при постепенном росте нагрузки для характерного диапазона механических свойств грунтов железных дорог Республики Казахстан.

В весенний период, когда оттаивает балласт под шпалой, на откосах и обочине также оттаивает слой замерзшего грунта, по расчетам [2] близкий по толщине к 0,3 м. Затем начинает оттаивать верх основной площадки, ограниченный сверху талым и снизу мерзлым грунтом. Оттаявший, но не консолидировавшийся грунт основной площадки, по данным профессора А.Д. Омарова [2] имеет прочность около 40 % от прочности талого грунта. Рассмотрим характер деформаций этого слоя при разных поездных нагрузках на модели насыпи (рис. 1) при погонных нагрузках от 4 до 20 тс/пог. м.



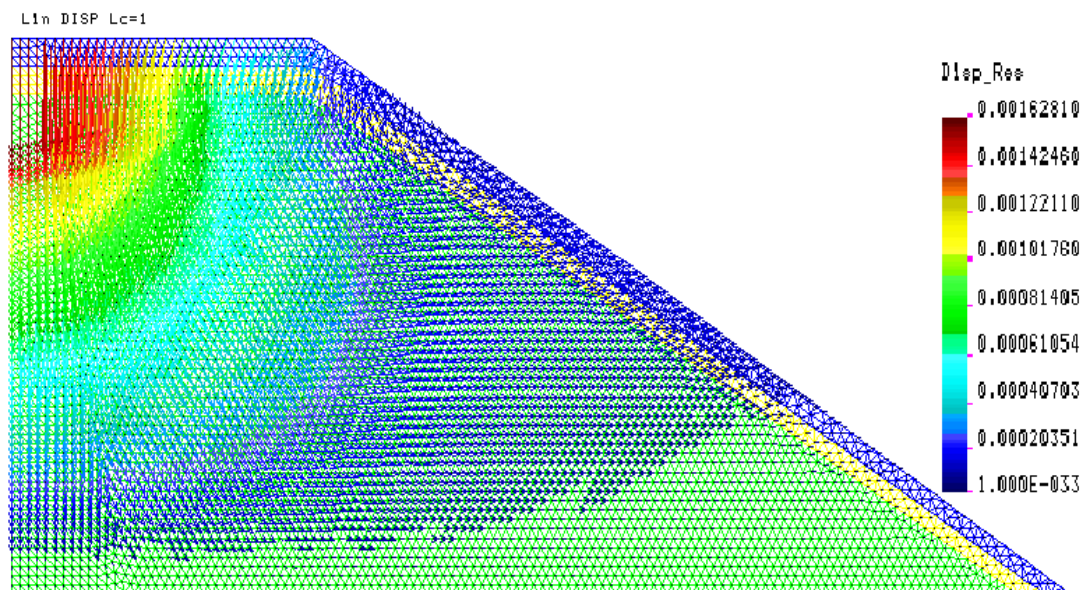
**Рисунок 1.** Осесимметричная конечно-элементная модель участка

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов для различных поездных нагрузок в виде векторов результирующих перемещений частиц грунта при погонной нагрузке 8, 12, 16, 20 тс/пог.м. и модуле упругости на каждую нагрузку верхнего слоя грунта 8ЕЗ, оттаявшего слоя – 4ЕЗ, мерзлого слоя – 8ЕЗ; верхнего слоя – 5ЕЗ, оттаявшего слоя – 2ЕЗ, мерзлого слоя 5ЕЗ; верхнего слоя – 2ЕЗ, оттаявшего слоя – ЕЗ, мерзлого слоя – 2ЕЗ соответственно.



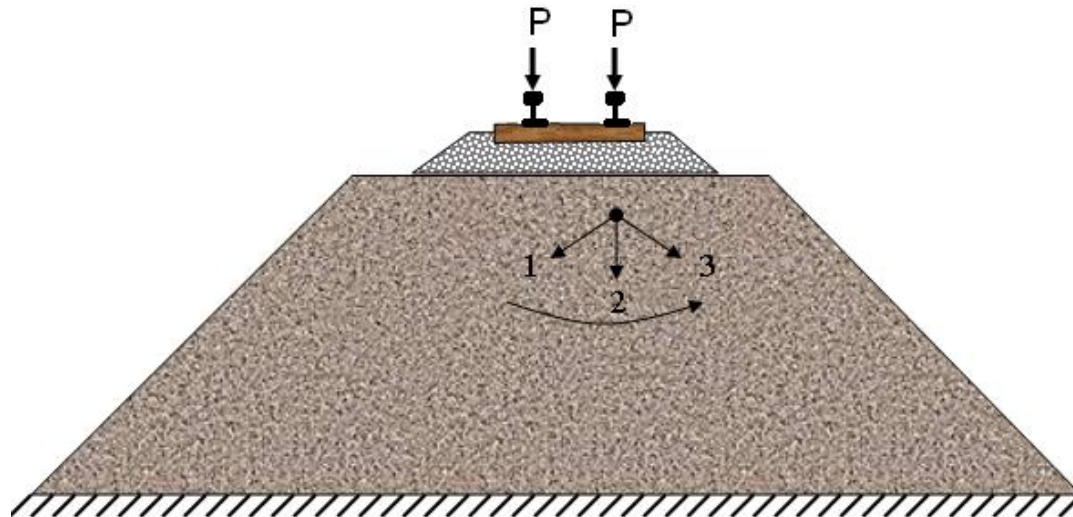
**Рисунок 2.** Векторы результирующего перемещения частиц грунта при погонной нагрузке 8тс/м/пог. и модуле упругости верхнего слоя грунта 8ЕЗ, оттаявшего слоя – 4ЕЗ, мерзлого слоя – 8ЕЗ





**Рисунок 3.** Векторы результирующего перемещения частиц грунта при погонной нагрузке 12 тс/м/пог. и модуле упругости верхнего слоя грунта 8Е3, оттаявшего слоя – 4Е3, мерзлого слоя – 8Е3

На рис. 4 показаны характерные положения результирующего вектора деформаций земляного полотна при возрастании осевой нагрузки: 1-я стадия стабилизации земляного полотна после строительства и образование плотного ядра насыпи, 2-я стадия уплотнения насыпи при ее эксплуатации, 3-я стадия образования поверхностей сдвига в теле насыпи [3].



**Рисунок 4.** Характерные положения результирующего вектора деформаций земляного полотна при возрастании осевой нагрузки: 1-я стадия стабилизации земляного полотна после строительства и образование плотного ядра насыпи; 2-я стадия уплотнения насыпи при ее эксплуатации; 3-я стадия образования поверхностей сдвига в теле насыпи



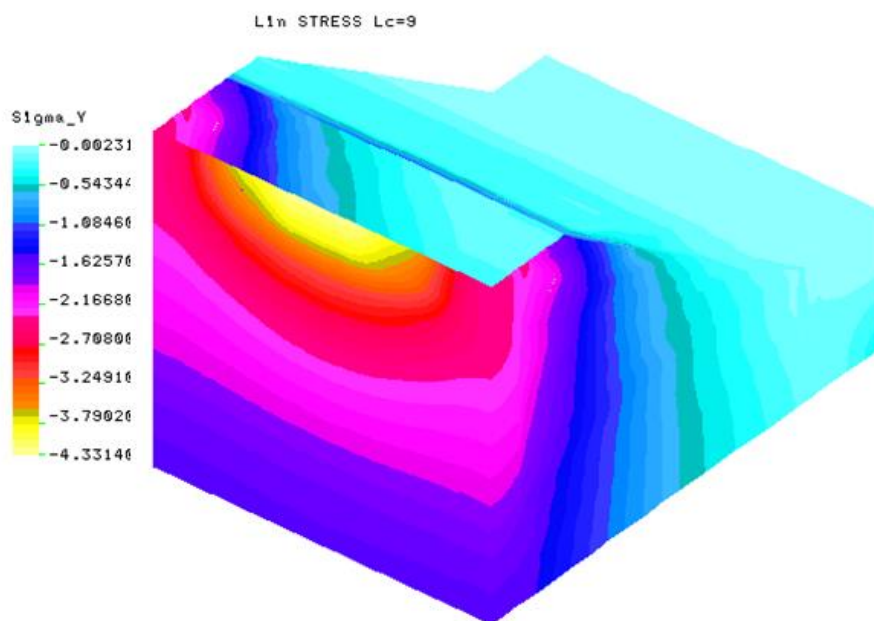
Анализ результатов расчетов по изменению модулей упругости различных слоев грунта позволяет заключить, что в резко-континентальном климате РК минимальная упругая осадка земляного полотна из прочного грунта ( $E = 8E3$ ) составляет 1,8 мм при минимальных нагрузках в 8 т/пог.м. При нагрузке 20 тс/пог.м деформации достигают 20 мм. При малых погонных нагрузках (до 4 тс/пог.м) наблюдается перемещение частиц грунта к оси насыпи.

На рис. 2, 3, 5, 6 на вертикальной шкале цветом показаны величины перемещений слоя грунта в зависимости от различной нагрузки от оси подвижного состава вагона и изменения от красного цвета (наибольшая нагрузка) до синего цвета (наименьшая нагрузка). Цифры обозначают величины перемещений в мм.

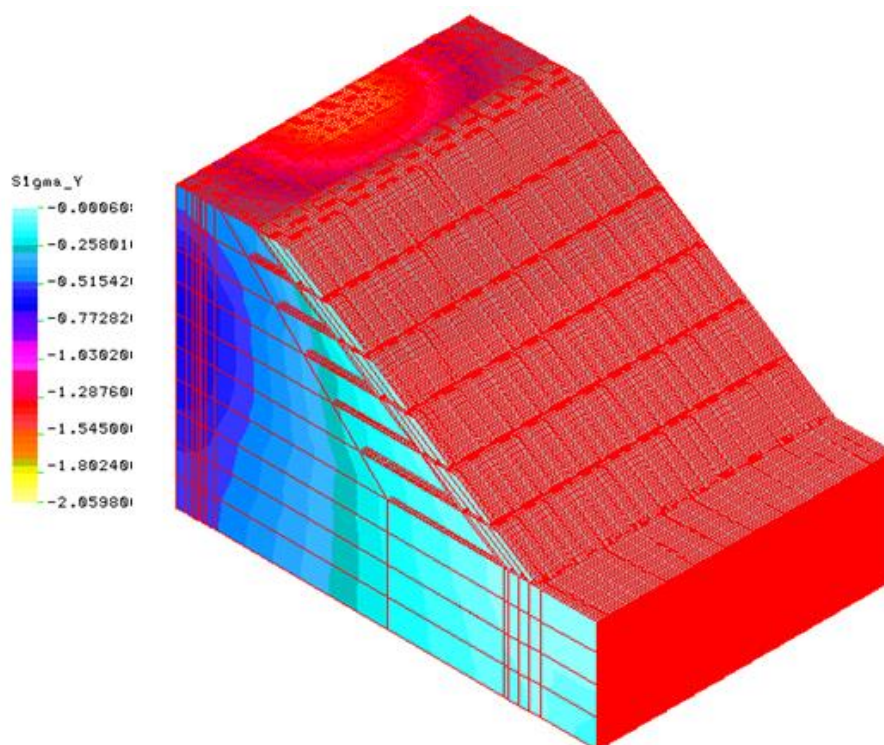
С увеличением нагрузки результирующий вектор перемещений сначала приближается к вертикали, а затем принимает направление к откосу насыпи. Увеличение погонной нагрузки ведет к новым качественным явлениям – появлению поверхностей скольжения. Здесь количество (величина нагрузки) переходит в новое качество – образование плоскости разрушения насыпи. Прекращается процесс преимущественного уплотнения грунта и начинается его разрушение [4].

Далее рассмотрим изменение рабочей зоны земляного полотна в связи с введением новых большегрузных вагонов.

Рассмотрим на объемной модели железнодорожной насыпи осесимметричную задачу о распределении напряжений в земляном полотне под четырех-, шести- и восьмиосным полувагонами. Примем расчетное давление колеса вагона равным 10, 20, 30 тс, что соответствует движению вагонов с минимальными и максимальными скоростями [5, 6]. Пример расчетов распределения вертикальных напряжений состояния грунта насыпи высотой 10 м приведены на рис. 5, горизонтальных – на рис. 6.



**Рисунок 5.** Распределение вертикальных напряжений по оси насыпи от тележки восьмиосного вагона при вертикальной силе от каждого колеса вагона 30 тс



**Рисунок 6.** Распределение горизонтальных напряжений в теле насыпи от тележки шестиосного полувагона

На рисунках и табл. 1 заметно увеличение размеров рабочей зоны земляного полотна при обращении грузеных шести- и восьмиосных полувагонов в сравнении с четырехосными, которыми в основном укомплектован парк грузовых вагонов.

**Таблица 1.** Величина расчетной рабочей зоны насыпи для разных типов грузеных полувагонов

Количество осей вагона	Вертикальное давление колеса, тс	Величина рабочей зоны, м	Максимальное вертикальное напряжение грунта, кг/см <sup>2</sup>
4	10	4	0,1
4	20	5	0,2
4	30	5,5	0,31
6	10	4,5	0,13
6	20	5,2	0,26
6	30	6	0,4
8	10	7	0,14
8	20	7,5	0,28
8	30	7,8	0,43
Относительный прирост в сравнении с четырехосным полувагоном для шести-, восьмиосного полувагонов		0,07-0,12 0,3-0,5	0,3 0,4

Таким образом в данной статье дана количественная оценка влияния повышения осевых нагрузок, введения новых типов грузовых вагонов (шести- и восьмиосных) на величину рабочей зоны железнодорожного земляного полотна. Из приведенных результатов исследований причин и характера деформирования основной площадки железнодорожного земляного полотна следуют соответствующие выводы и рекомендации:

– увеличение осевой вагонной нагрузки меняет характер напряженно-деформированного состояния верха насыпи и при определенных условиях приводит к переходу от уплотнения грунтов ядра насыпи к образованию поверхностей разрушения верха насыпи;

– увеличение количества осей грузовых вагонов при равном их давлении на рельсы существенно влияет на деформации насыпи. Следовательно, если насыпь отсыпана недостаточно прочными грунтами, при введении большегрузных вагонов необходимо усиление более мощного пласта грунта;

– характера напряженно-деформированного состояния рабочей зоны железнодорожного земляного полотна изменяется в зависимости как от характеристик прочности местных грунтов, так и глубины их промерзания и высоты насыпей. Рекомендуется для новых железных дорог Казахстана разработка зональных поперечных профилей земляного полотна из глинистых грунтов с более детальным учетом грунтовых и климатических условий региона.

#### Список литературы

1. Закиров Р.С., Омаров А.Д. Проблемы повышения работоспособности подшпального основания и основания балластного слоя при введении скоростного движения поездов / Под ред. Р.С. Закирова. – Алматы: Бастау, 2001. – Ч. I. – 198 с.
  2. Омаров А.Д. Земляное полотно железных дорог Казахстана. – Алматы: Бастау, 2000. – 208 с.
  3. Исаенко Э.П., Хасенов С.С., Золотухин В.И., Алимкулов М.М., Апшикур Б. Расчеты напряженно-деформируемого состояния железнодорожных насыпей численными методами // Магистраль. – № 2 (76). – 2007. – С. 80-87.
  4. Яковлева Е.В., Круглый А.Г., Побединский А.Г. Новые подходы к обследованию земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. – 2001. – №1. – С. 30-32.
  5. Исаенко Э.П., Безруков М.В., Иванов С.Ю., Шайдуллин Ш.Н., Васильев С.П. Расчеты железнодорожного пути с использованием конечно-элементных моделей: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский печатник. – 2002. – 215 с.
  6. Хасенов С.С., Алимкулов М.М., Апшикур Б. О зональных технических требованиях к конструкции верха земляного полотна железных дорог Республики Казахстан // Вестник КазАТК. – № 1(44). – 2007. – С. 6-16.
- 
-

АВТОМАТИКА. ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ  
АВТОМАТИКА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
AUTOMATION. COMPUTER ENGINEERING

DOI DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_20  
МРНТИ 50.43.17

**А.А. Аубакиров**

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
г. Нур-Султан, Казахстан  
E-mail: arman-a86@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА БПЛА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПО КРЕНУ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

### ПИД-РЕТТЕУІШПЕН ҚИСАЙТУ БОЙЫНША АЛТЫ ДӘРЕЖЕЛІ ЕРКІНДІГІМЕН ПҰА-НЫҢ ҰШУ ДИНАМИКАСЫНЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС МОДЕЛІН ЗЕРТТЕУ

### INVESTIGATION OF A NONLINEAR MODEL OF UAV FLIGHT DYNAMICS WITH 6 DEGREES OF FREEDOM IN ROLL WITH A PID CONTROLLER

**Аннотация.** В работе изучена нелинейная модель с шестью степенями свободы (6DOF) управления траекторией полета квадрокоптера, беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Изучены механизмы и каскадные схемы регуляторов для корректировки полета БПЛА. Рассмотрена математическая модель с 6-ю степенями свободы, для которой построили модель в Simulink'e. Определено влияние управляющих факторов на динамику полета квадрокоптера. Перечислены коэффициенты усиления с использованием микроконтроллера и соответствующего программного обеспечения. Исследован режим крена полета квадрокоптера. Приведены результаты модельных экспериментов для замкнутого цикла с обратной связью для режима крена.

**Ключевые слова:** БПЛА, квадрокоптер, нелинейная 6DOF модель, пропорционально-производный регулятор, каскадный регулятор.

**Аңдатпа.** Жұмыста квадрокоптердің, ұшқышсыз ұшу аппаратының (ҰҰА) ұшу траекториясын басқарудың алты еркіндік дәрежесі (6DOF) бар сызықтық емес моделі зерттелді. ҰҰА ұшу траекториясын түзету үшін, реттегіштердің тетіктері және каскадты сұлбасы зерттелінді. Simulink бағдарламасында 6 еркіндік дәрежесі бар математикалық модель қарастырылды. Квадрокоптердің ұшу динамикасына басқару факторларының әсері анықталды. Микроконтроллерді және тиісті бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып, пайда коэффициенттері келтірілген. Квадрокоптердің ұшуының қисаю тәртібі зерттелді. Қисаю тәртібі үшін кері байланысы бар жабық циклге арналған модельдік тәжірибелердің нәтижелері келтірілген.

**Түйін сөздер:** ҰҰА, квадрокоптер, сызықты емес 6DOF моделі, реттегіш, каскадты реттегіш.

**Abstract.** The paper studies a nonlinear model with six degrees of freedom (6DOF) for controlling the flight path of a quadcopter, an unmanned aerial vehicle (UAV). The mechanisms and cascade schemes of regulators for adjusting the UAV flight are studied. A mathematical model with 6 degrees of freedom is considered, for which a model was built in Simulink. The influence of control factors on the dynamics of the quadcopter flight is determined. The gain factors using the microcontroller and the corresponding software are listed. The roll mode of the quadcopter flight is investigated. The results of model experiments for a closed loop with feedback for the roll mode are presented.

**Keywords:** UAV, quadcopter, nonlinear 6DOF model, PD controller, cascade controller.

**Введение.** Научно-практические исследования небольших беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) привели к разработке их нескольких видов. Самыми распространенными среди них являются квадрокоптеры, которые имеют четыре роторных двигателя, прикрепленных к жесткой раме. Эти четыре ротора позволяют управлять всеми маневрами квадрокоптера. Основными управляющими факторами являются крен, тангаж и рыскание [1].

Целью данного исследования является нахождение необходимых настроек пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов по крену, которые позволяют стабилизировать траекторию полета дрона.

*Материал и методы исследования.* Динамика полета квадрокоптера нелинейная и может быть исследована методами, лежащими в основе динамики, и методами теории управления. Анализ работ показывает, что динамика квадрокоптера нестабильна и демонстрирует неприемлемые летные характеристики в отсутствие контроллера [2]. У нелинейной модели квадрокоптера имеется три поступательных и три вращательных степеней свободы. Четыре ротора задают четыре входа  $U_1, U_2, U_3$  и  $U_4$ . Они обозначают факторы вертикальной тяги, крена, тангажа и рыскания. У системы 6DOF есть шесть степеней свободы, а управляющих факторов четыре, задающих поступательные и вращательные движения, из-за этого система является недостаточно активной. В этом случае квадрокоптер является недостаточно задействованной системой, поскольку существует больше степеней движения, чем имеется управляющих механизмов для создания каждого [3]. Недостаточно активная система создает дополнительную проблему для стабилизации динамики системы. Для разработки такого типа контроллера необходимо построить соответствующую математическую модель динамики квадрокоптера. Эта методика позволит получить ценную информацию о летных характеристиках. Это также позволит инженерам определить, полностью ли управляема система и каким образом каждый вход влияет на систему в целом.

Для нашего исследования рассмотрим модель с шестью степенями свободы (1). Для этой математической модели мы построили модель в Simulink'е в общем виде (рис. 1). Адекватность выбранной математической модели на соответствие реальной динамики квадрокоптера определяется теоретическими экспериментами [4-7].

Положение квадрокоптера в системе координат Земли определяется векторами  $[x, y, z, \varphi, \theta, \psi]$  и  $[u, v, w, p, q, r]^T$ , содержащими линейные и угловые скорости в системе координат самого тела.

*Модель в пространстве состояний* организована следующим образом:

$$x = [\varphi, \theta, \psi, p, q, r, u, v, w, x, y, z]^T \in R^{12}.$$

Можно переписать уравнения динамики квадрокоптера в пространстве состояний

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varphi} = p + r[c(\varphi)t(\theta)] + q[s(\varphi)t(\theta)] \\ \dot{\theta} = q[c(\varphi)] - r[s(\varphi)] \\ \dot{\psi} = r \left[ \frac{c(\varphi)}{c(\theta)} \right] + q \left[ \frac{s(\varphi)}{c(\theta)} \right] \\ \dot{p} = rq \left[ \frac{I_y - I_z}{I_x} \right] + \left[ \frac{U_2}{I_x} \right] \\ \dot{q} = rq \left[ \frac{I_z - I_x}{I_y} \right] + \left[ \frac{U_3}{I_y} \right] \\ \dot{r} = rq \left[ \frac{I_x - I_y}{I_z} \right] + \left[ \frac{U_4}{I_z} \right] \\ \dot{u} = rv - qw - g[s(\theta)] \\ \dot{v} = pw - ru + g[s(\varphi)c(\theta)] \\ \dot{w} = qu - pv + g[c(\varphi)c(\theta)] + U_1 \\ \dot{x} = w[s(\varphi)s(\psi) + c(\varphi)c(\psi)s(\theta)] - u[c(\varphi)s(\psi) - s(\varphi)c(\psi)s(\theta)] + u[c(\psi)c(\theta)] \\ \dot{y} = v[c(\varphi)c(\psi) + s(\varphi)s(\psi)s(\theta)] - w[s(\varphi)c(\psi) - c(\varphi)s(\psi)s(\theta)] + u[s(\psi)c(\theta)] \\ \dot{z} = w[c(\varphi)c(\theta)] - u[s(\theta)] + v[c(\varphi)c(\theta)] \end{array} \right. \quad (1)$$

где функции  $c$  -  $\cos()$ ,  $s$  -  $\sin()$ ,  $t$  -  $\tan()$ . Роторов четыре, и мы контролируем столько же степеней свободы: обычно учитываются управляющие входы, по одному для вертикальной тяги и по одному для каждого углового движения. Эти уравнения вместе с контроллером, который в настоящее время используется на платформе квадрокоптера, были реализованы в программном обеспечении Simulink MATLAB.  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  являются входами и связаны с силой тяги, тангажем, креном и рысканием соответственно (рис. 1).

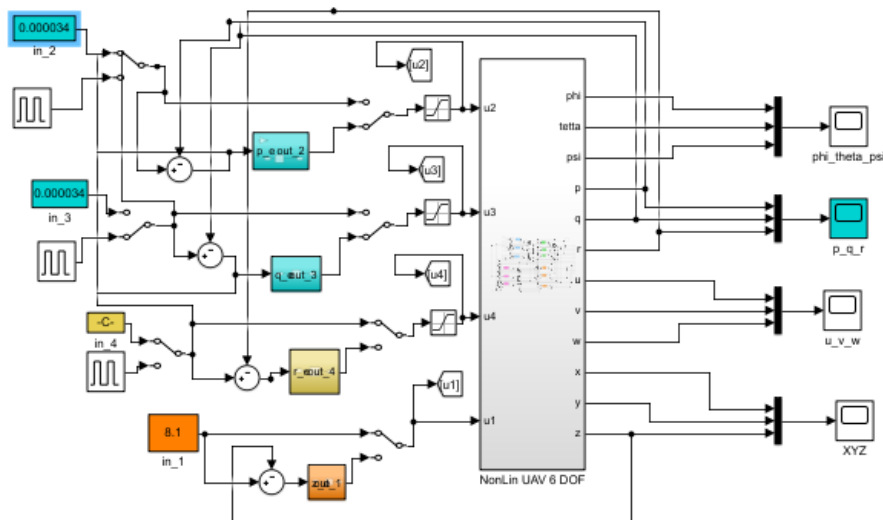


Рисунок 1. Модель в Simulink

Исследуем разработанную модель для разомкнутого и замкнутого циклов полета БПЛА в режиме крена.

*Результаты и их обсуждения.* В системе замкнутого цикла среда имитационного моделирования расширяется за счет включения контроллеров высоты, ориентации, курса и положения.

Существует несколько методов управления, которые можно использовать для управления квадрокоптером: от классического линейного ПИД или пропорционально-дифференциального (ПД) контроллера до более сложных нелинейных схем, таких как контроллеры обратного или скользящего режима. Наиболее распространенным методом управления является ПИД или ПД регулятор, линейный регулятор, используемый для нелинейной системы с несколькими переменными квадрокоптерами.

Далее мы рассмотрим влияние управляющих факторов на динамику полета квадрокоптера.

Здесь используются входные данные по крену и скорости рыскания, которые проходят через ПИД регулятор. Согласно модели (рис. 1), этими входами являются крен, рыскание.

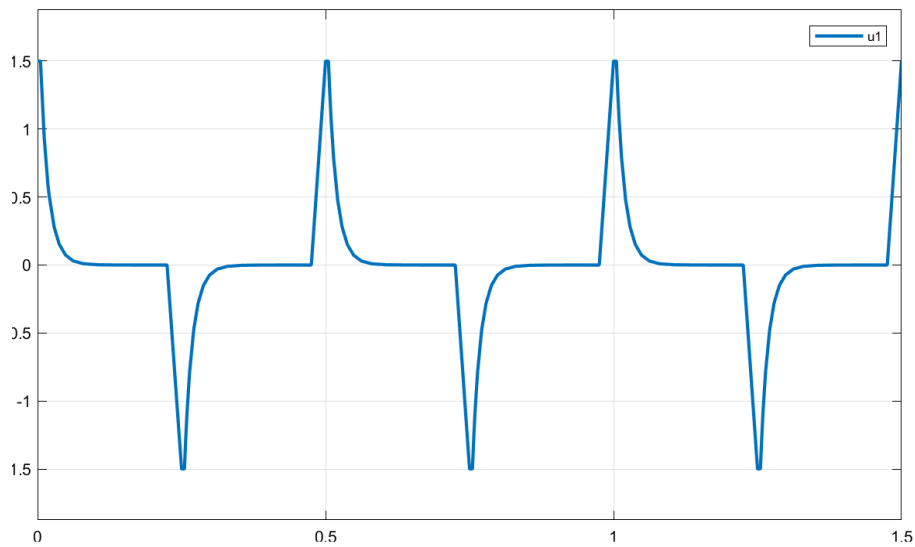
В целом результаты показывают, что математическая модель точно отражает динамику квадрокоптера.

Таблица 1. Входные данные для расчета полета квадрокоптера

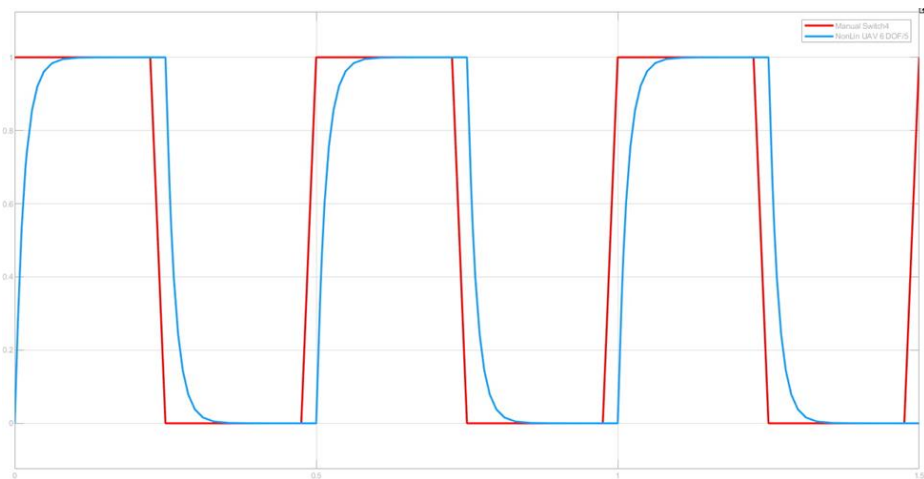
$m$	0,82		$P$	$I$	$D$
$g$	9,8	PID	2	0	0,0007
$U_1$	8,1	$I_x$	$I_y$	$I_z$	
$U_3$	0.000034	$28.8 \cdot 10^{-3}$	$28.8 \cdot 10^{-3}$	$26 \cdot 10^{-3}$	

Перечисленные коэффициенты усиления используются в ПИД-контроллере, который может быть реализован на квадрокоптере с использованием микроконтроллера и соответствующего программного обеспечения. Серия из трех значений  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  составляет единичный регулятор. В данном случае мы имеем 5 контроллеров. Во время полета квадрокоптера они представляют собой контроллеры ПИД, показанные в Simulink модели, и фиксируют динамику квадрокоптера в полете. В результате применения этих контроллеров математическая модель лучше учитывает полетные данные.

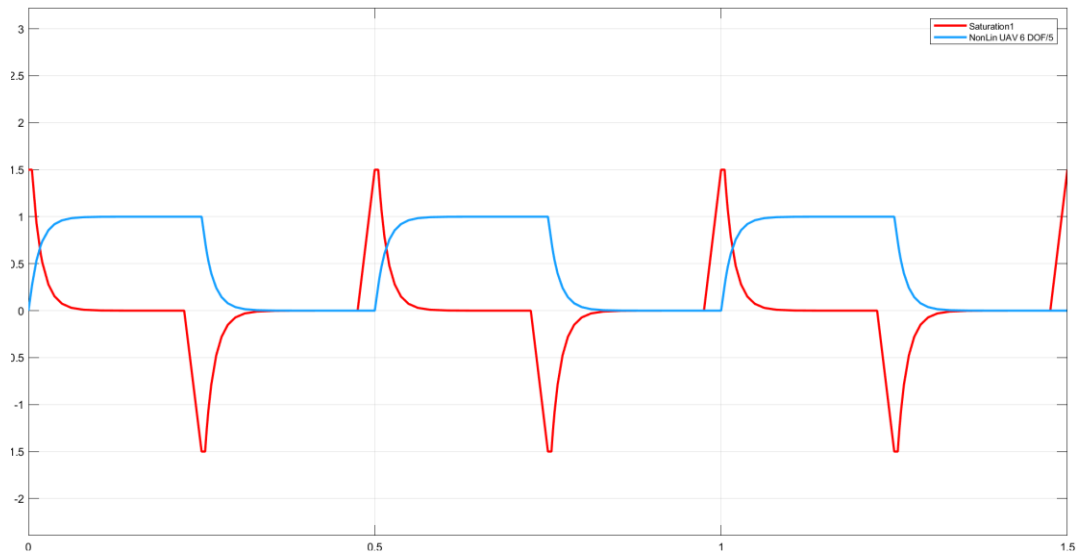
На рисунках 2-5 показаны результаты модельных экспериментов для замкнутого цикла с обратной связью для режима крена.



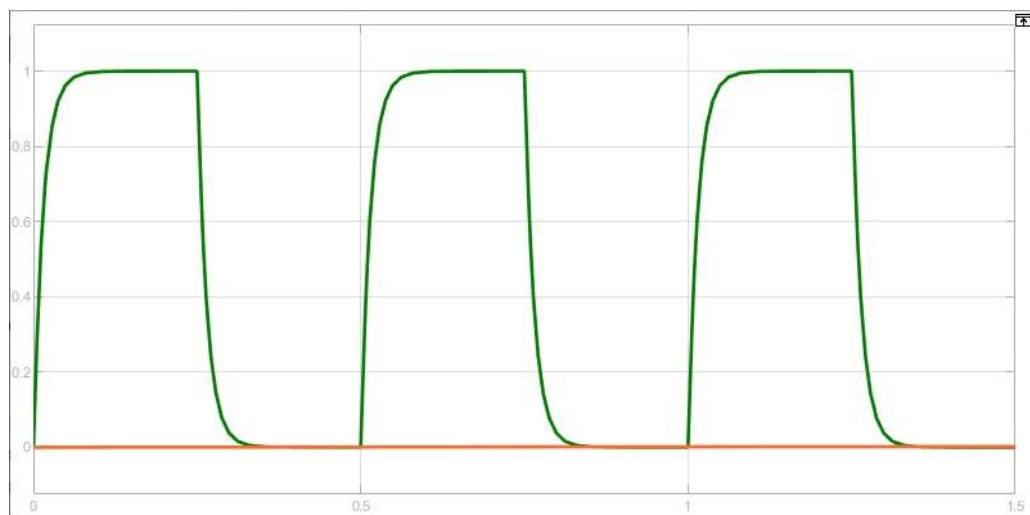
**Рисунок 2.** Характер изменения сигнала управления по крену до начала вычислений в системе. Входной сигнал управления подается в импульсном виде для изучения проведения модели



**Рисунок 3.** Поведение входного сигнала начальных значений для определения управления: красная линия – импульсный сигнал управления на входе; синяя линия – сигнал, полученный после вычисления ПИД регулятора. Подобранные коэффициенты управления показывают адекватное поведение траектории БПЛА заданным характеристикам



**Рисунок 4.** Поведение выходных сигналов после применения управления: красная линия – сигнал управления до входа в систему; синяя линия – сигнал управления после ПИД регулятора. ПИД регулятор сглаживает резкие изменения импульса, поддерживая полет в пределах допустимых границ



**Рисунок 5.** Характер изменения угловых скоростей при заданном управлении (движение по наклону, крену и рысканью при применении ПИД регулятора): зеленая линия – вектор скорости по крену (ПИД регулятор сглаживает неровности скорости); красная линия – рыскание

*Заключение.* В данной статье показана нелинейная математическая модель с ПИД регулятором и каскадным П и ПД в Simulink. Модельные данные полета в разомкнутом и замкнутом циклах и полученные результаты показали, что применение регуляторов улучшает результаты изменения динамики полета квадрокоптера. Продемонстрирована возможность управления полетом квадрокоптера с помощью, построенной Simulink модели. Результирующие параметры полетных данных показывают эффективность ПИД регулятора и в данной модели стабилизируют квадрокоптер при различных маневрах.



## Список литературы

1. Francesco Sabatino. Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation, Stockholm, Sweden June. – 2015.
2. Abdulkader Joukhadar, Mohammad Alchehabi, Adnan Jeje. Advanced UAVs Nonlinear Control Systems and Applications. – IntechOpen, 2019.
3. Simulated Annealing-Based Optimal Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller Design: A Case Study on Nonlinear Quadcopter Dynamics. Kristofer Kevin Nemirsky. – San Jose State University, SJSU ScholarWorks, Spring 2017.
4. Claudia Mary, Luminita Cristiana Totu, Simon Konge Koldbæk, Modelling and Control of Autonomous Quad-Rotor. Masters Thesis, 2010.
5. Shim, H.D. Hierarchical flight control system synthesis for rotorcraft-based unmanned aerial vehicles: Ph.D. Thesis. – The University of California: Berkeley (2000).
6. M.A. Beisenbi, S.T. Suleimenova, A.A. Taurbekova, Research of robust stability of control systems with  $m$  inputs and  $n$  outputs in the case of catastrophe elliptical umbilic // Journal bulletin of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. – Issue 5. – P. 142-147. – Publisher Natl Acad Sci Republic Kazakhstan, 2017/1/1.
7. M.A. Beisenbi, A.Z. Zakarina, V.V. Nikulin, Y.F. Bulatbayeva. Design of control system with increased potential of robust stability in a class of four-parameter structurally stable mappings for spacecraft model // International Journal of Applied Engineering Research. – V 11, Issue 22. – 2016.

АВТОМАТИКА. ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ  
АВТОМАТИКА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
AUTOMATION. COMPUTER ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_25  
МРНТИ 50.43.17

**А.А. Аубакиров, А.Ж. Закарина**

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Казахстан  
E-mail: arman-a86@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА БПЛА  
С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ПО ТАНГАЖУ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ**

**ПИД-РЕТТЕГІШІ БАР, ТАНГАЖ БОЙЫНША АЛТЫ ДӘРЕЖЕЛІ ЕРКІНДІГІМЕН  
ПҰА-НЫҢ ҰШУ ДИНАМИКАСЫНЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС МОДЕЛІН ЗЕРТТЕУ**

**INVESTIGATION OF A NONLINEAR MODEL OF UAV FLIGHT DYNAMICS WITH 6  
DEGREES OF FREEDOM IN PITCH WITH A PID CONTROLLER**

**Аннотация.** В статье рассматривается нелинейная 6DOF модель управления траекторией полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Это связано с тем, что в настоящее время подобные модели БПЛА становятся перспективными для широкого круга задач наблюдения, поисково-спасательных операций, строительных инспекций, интерактивных игр и медицинских приложений. Развитие техники и технологий, микроэлектроники, информатики и микропроцессоров дают возможность современным квадрокоптерам стать высокоманевренными БПЛА в отличие от их более ранних аналогов.

В ходе работы выбрана математическая модель, описывающая динамику полета квадрокоптера с использованием двух допущений. Перечислены коэффициенты усиления, используемые в ПИД контроллере. Исследованы механизмы и каскадные схемы ПД-регулятора для корректировки полета БПЛА. Изучен режим тангажа полета квадрокоптера. Отражена динамика полета квадрокоптера. Показаны результаты моделирования с полученными параметрами полетных данных, при которых конструкция модели хорошо стабилизирует квадрокоптер при различных маневрах.

**Ключевые слова:** БПЛА, квадрокоптер, нелинейная 6DOF модель, ПД-регулятор, каскадный регулятор.

**Аңдатпа.** Мақалада квадрокоптер ұшқышсыз ұшу аппаратының (ҰҰА) ұшу траекториясын басқарудың сызықтық емес 6DOF моделі қарастырылады. Бұл қазіргі уақытта ҰҰА-ның мұндай моделі бақылау, іздестіру-құтқару операциялары, құрылыс инспекциялары, интерактивті ойындар мен медициналық қосымшалардың кең ауқымды міндеттері үшін қолайлы болуына байланысты. Техника мен технологияның, микроэлектрониканың, информатиканың және микропроцессорлардың дамуы, заманауи квадрокоптерлердің бұрынғы аналогтарынан қарағанда жоғары маневрлік ұшқыштарға айналуына мүмкіндік береді.

Екі болжамды қолдана отырып, квадрокоптердің ұшу өзгерісін сипаттайтын математикалық модель таңдалды. ПИД контроллерінде қолданылатын пайда коэффициенттері келтірілген. Ұшқышсыз ұшу аппаратының ұшуын түзету үшін, ПД реттеуіштің тетіктерімен каскадты сұлбасы зерттелді. Квадрокоптердің ұшу режимі зерттелді. Квадрокоптер ұшуының өзгерістері көрсетілген. Түрлі маневр жасалынған уақытында, квадрокоптерді жақсы тұрақтандыратын құрылмасы кезінде, ұшу деректерінің өлшемдерімен алынған модельдеу нәтижелері көрсетілген.

**Түйін сөздер:** UAV, квадрокоптер, сызықты емес 6DOF моделі, ПД реттегіш, каскадты реттегіш.

**Abstract.** The article considers a nonlinear 6DOF model for controlling the flight path of an unmanned aerial vehicle (UAV). This is due to the fact that at present such a model of UAVs is becoming promising for a wide range of surveillance tasks, search and rescue operations, construction inspections, interactive games and medical applications. The development of equipment and technologies, microelectronics, computer science and microprocessors, make it possible for modern quadcopters to become highly maneuverable UAVs in contrast to their earlier counterparts.

A mathematical model describing the dynamics of the quadcopter flight using two assumptions is selected. The gain factors used in the PID controller are listed. The mechanisms of the PD controller and the cascade scheme of PD controllers for adjusting the UAV flight are investigated. The mode of the quadcopter's pitch flight is studied. The dynamics of the quadcopter flight is reflected. The results of the simulation with the obtained flight data parameters are shown, in which the model design well stabilizes the quadcopter during various maneuvers.

**Keywords:** UAV, quadcopter, nonlinear 6DOF model, PD controller, cascade controller.

**Введение.** Квадрокоптеры – это летательные аппараты с четырьмя роторными двигателями, прикрепленными к жесткой раме. Эти четыре ротора управляют подъемной силой при совместной работе, а в различных комбинациях они используются для управления креном, тангажем и рысканием [1]. Квадрокоптеры способны выполнять маневры, подобно вертолетам. Небольшие размеры и вес квадрокоптера позволяют им получить доступ к окружающей среде, недоступной для существующих крупных летательных аппаратов, самолетов, вертолетов.

Конструкции квадрокоптера и его полетным свойствам присуща нелинейная динамика, которая обеспечивает отличный стенд для проверки концепций теории управления и лежащей в основе динамики. Многочисленные исследования различных авторов показали, что динамика квадрокоптера крайне нестабильна и демонстрирует нежелательные летные характеристики в отсутствие контроллера [2]. Причем квадрокоптеры имеют шесть степеней свободы (6DOF): три поступательные и три вращательные. Работа четырех двигателей описывается параметрами  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и  $U_4$ , которые обозначают факторы вертикальной тяги, крена, тангажа и рыскания соответственно. Если система 6DOF имеет менее шести входов, то она создает недостаточно активную систему. В этом случае управление квадрокоптером затруднено, поскольку существует больше степеней движения, чем имеется управляющих механизмов для создания каждого поступательного и вращательного движения [3]. Недостаточно активная система создает дополнительную проблему для стабилизации динамики системы. Для разработки такого типа контроллера необходимо построить соответствующую математическую модель динамики квадрокоптера. Эта методика позволит при неполных исходных данных получить ценную информацию о летных характеристиках и определить, полностью ли управляема система и каким образом каждый вход влияет на систему в целом.

Основная цель исследования состоит в том, чтобы представить настройки ПД-регулятора, способные наилучшим образом стабилизировать нелинейный квадрокоптер. Квадрокоптер использует архитектуру управления каскадным циклом, где внутренний цикл использует информацию об угловой скорости, а внешний цикл использует информацию об угле поворота. Совместное применение двух ПД-регуляторов может стабилизировать установку, что делает квадрокоптер готовым к устойчивому полету.

*Уравнения движения.* Обзор литературы показывает, насколько важно определить точную модель, которая должным образом характеризует динамику любой системы [4-5]. Для настройки квадрокоптера это также не является исключением. Таким образом, основная часть усилий направлена на выбор математической модели, наиболее лучше описывающей динамику полета квадрокоптера. При этом используются два допущения: а) квадрокоптер представляет собой твердое тело, б) масса квадрокоптера распределена равномерно, так что он симметричен по осям  $x$  и  $y$ , которые описывают динамику квадрокоптера. Здесь представлена математическая модель квадрокоптера для трехмерного движения твердого тела.

Существует несколько методов управления, которые можно использовать для управления БПЛА, начиная от классического ПИД или ПД контроллера до более сложных нелинейных схем, таких как контроллеры обратного или скользящего режима [6-7]. Наиболее распространенными методами управления являются ПИД или ПД-регулятор, линейный регулятор, используемый для нелинейной системы с несколькими переменными квадрокоптера.

Перед использованием каких-либо контроллеров или архитектур управления необходимо разработать математическую модель, которая достаточно хорошо отражает реальную динамику квадрокоптера. Для нашего исследования рассмотрим модель с 6-ю степенями свободы (1). Для этой математической модели мы построили модель в Simulink'е в общем виде (рис. 1).

Пусть  $[x, y, z, \varphi, \theta, \psi]$  – вектор, содержащий линейное и угловое положение квадрокоптера в системе координат Земли, и  $[u, v, w, p, q, r]^T$  – вектор, содержащий линейные и угловые скорости в системе координат тела.

Модель в пространстве состояний организована следующим образом:

$$x = [\varphi, \theta, \psi, p, q, r, u, v, w, x, y, z]^T \in R^{12}.$$

Перепишем уравнения динамики квадрокоптера в пространстве состояний

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varphi} = p + r[c(\varphi)t(\theta)] + q[s(\varphi)t(\theta)] \\ \dot{\theta} = q[c(\varphi)] - r[s(\varphi)] \\ \dot{\psi} = r \left[ \frac{c(\varphi)}{c(\theta)} \right] + q \left[ \frac{s(\varphi)}{c(\theta)} \right] \\ \dot{p} = rq \left[ \frac{I_y - I_z}{I_x} \right] + \left[ \frac{u_2}{I_x} \right] \\ \dot{q} = rq \left[ \frac{I_z - I_x}{I_y} \right] + \left[ \frac{u_3}{I_y} \right] \\ \dot{r} = rq \left[ \frac{I_x - I_y}{I_z} \right] + \left[ \frac{u_4}{I_z} \right] \\ \dot{u} = rv - qw - g[s(\theta)] \\ v = pw - ru + g[s(\varphi)c(\theta)] \\ \dot{w} = qu - pv + g[c(\varphi)c(\theta)] + U_1 \\ \dot{x} = w[s(\varphi)s(\psi) + c(\varphi)c(\psi)s(\theta)] - u[c(\varphi)s(\psi) - s(\varphi)c(\psi)s(\theta)] + u[c(\psi)c(\theta)] \\ \dot{y} = v[c(\varphi)c(\psi) + s(\varphi)s(\psi)s(\theta)] - w[s(\varphi)c(\psi) - c(\varphi)s(\psi)s(\theta)] + u[s(\psi)c(\theta)] \\ \dot{z} = w[c(\varphi)c(\theta)] - u[s(\theta)] + v[c(\varphi)c(\theta)] \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $I_x, I_y, I_z$  – моменты инерции;  $c, s, t$  – функции  $\cos(), \sin(), \tan()$ .

Имеется четыре ротора, и контролируется столько же степеней свободы: обычно учитываются управляющие входы, по одному для вертикальной тяги и по одному для каждого углового движения. Эти уравнения вместе с контроллером, который в настоящее время используется на платформе квадрокоптера, были реализованы в программном обеспечении Simulink MATLAB.  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , связанные с силой тяги, тангажем, креном и рысканием, соответственно и являются входами (рис. 1).

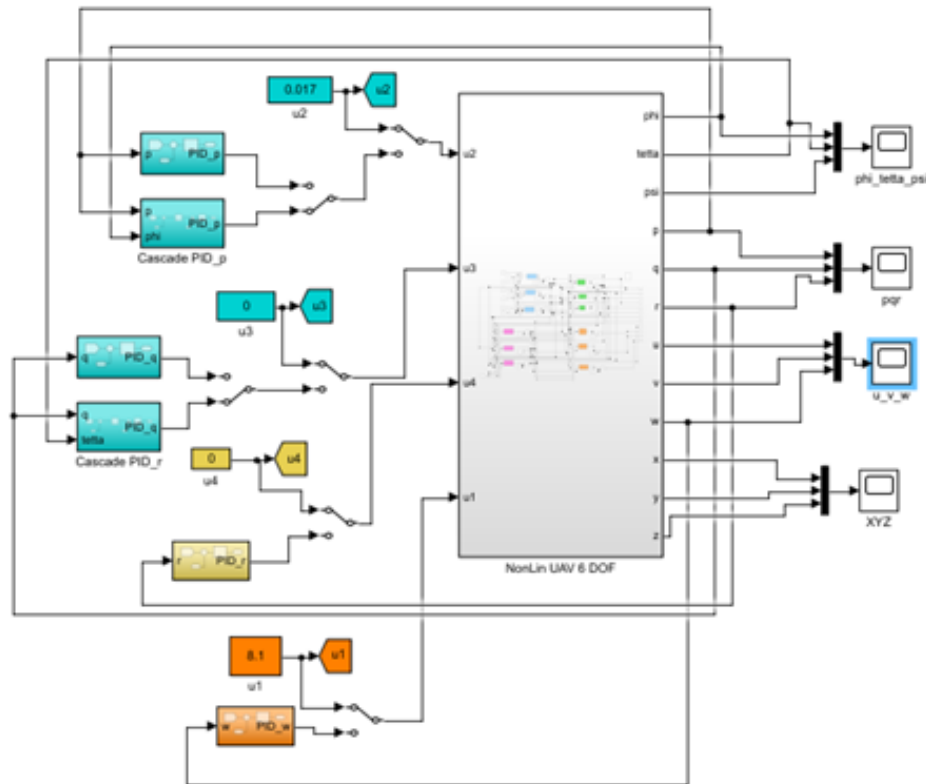


Рисунок 1. Модель в Simulink

Далее мы исследуем разработанную модель для разомкнутого и замкнутого циклов. *Моделирование разомкнутого цикла.* Система с разомкнутым контуром означает, что мы имеем систему без обратной связи, т.е. выход системы свободен от входа (рис. 2).

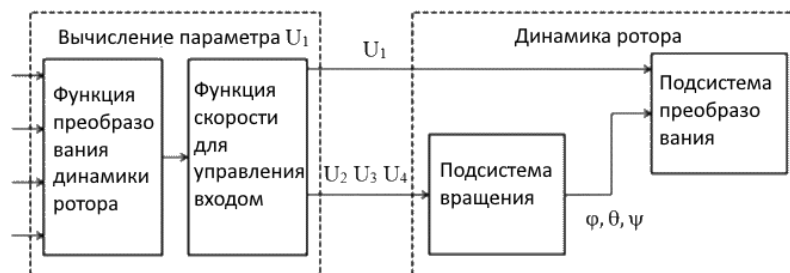
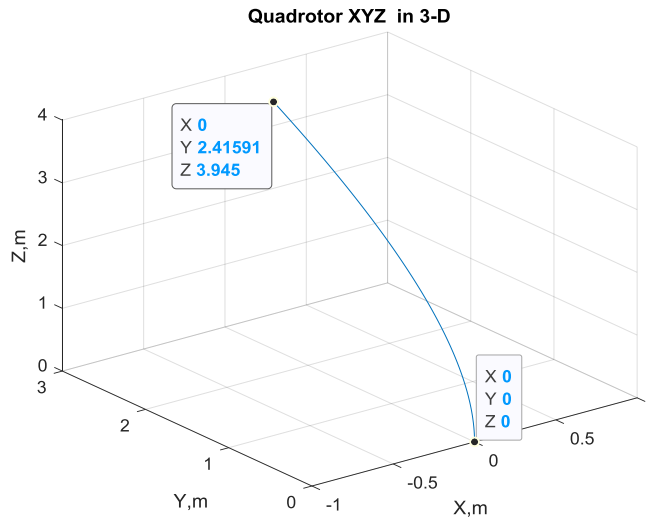


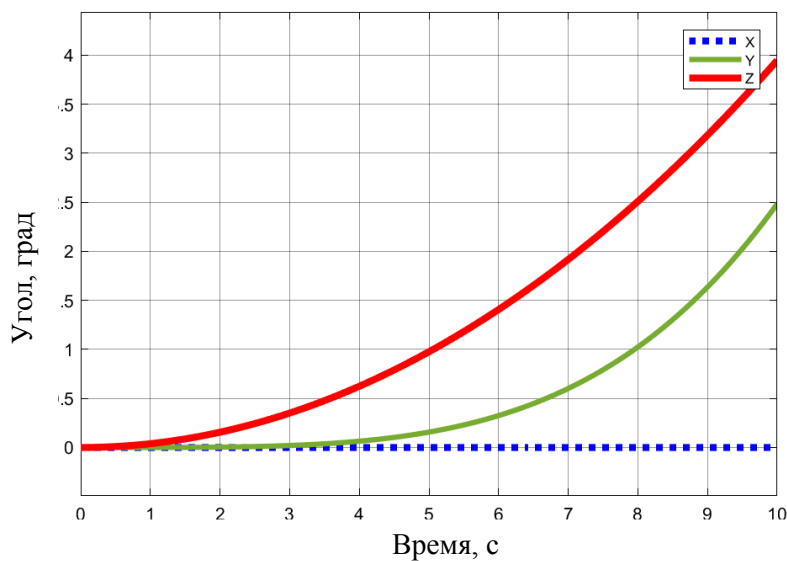
Рисунок 2. Система разомкнутого цикла для  $U_1 U_2 U_3 U_4 \varphi, \theta, \psi$

Для проверки математической модели было выполнено моделирование разомкнутого цикла, то есть системы без обратной связи, с использованием Simulink MATLAB. Блок-схема моделирования показана на рис. 1. Результаты моделирования представлены на рис. 3-6.

На рис. 3 и 4 показан полет БПЛА в 3-х мерном измерении и его проекция на двумерное измерение. При заданных начальных условиях (табл. 1) квадрокоптер за 10 секунд поднимается по оси z на отметку 3,945 метров, и пролетает в режиме тангажа по оси y на 2,41591 метров.



**Рисунок 3.** Модель в 3D, показывающий подъем дрона и тангаж. Данные согласно таблице 1.



**Рисунок 4.** Проекция рисунка 3 на двумерное измерение. Траектории квадрокоптера по x,y,z при начальных значениях из таблицы 1: красным обозначен подъем БПЛА вдоль оси z; зеленым – тангаж, движение вдоль оси y

На рис. 5 видно, что изменился угол только по тангажу, а углы по крену и рысканию нулевые. Рис. 6 отражает изменение угловых скоростей.

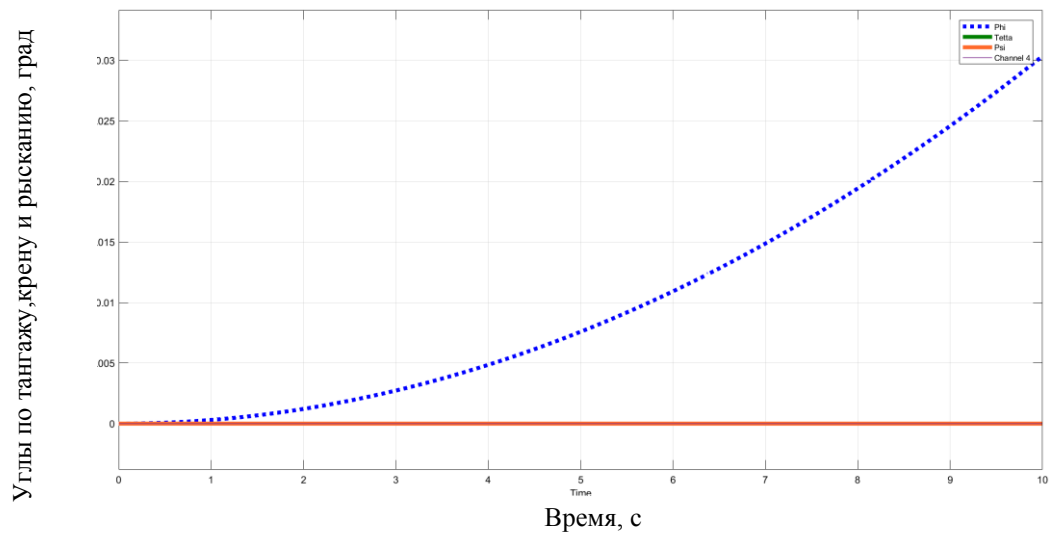


Рисунок 5. Углы по тангажу, крену, рысканию

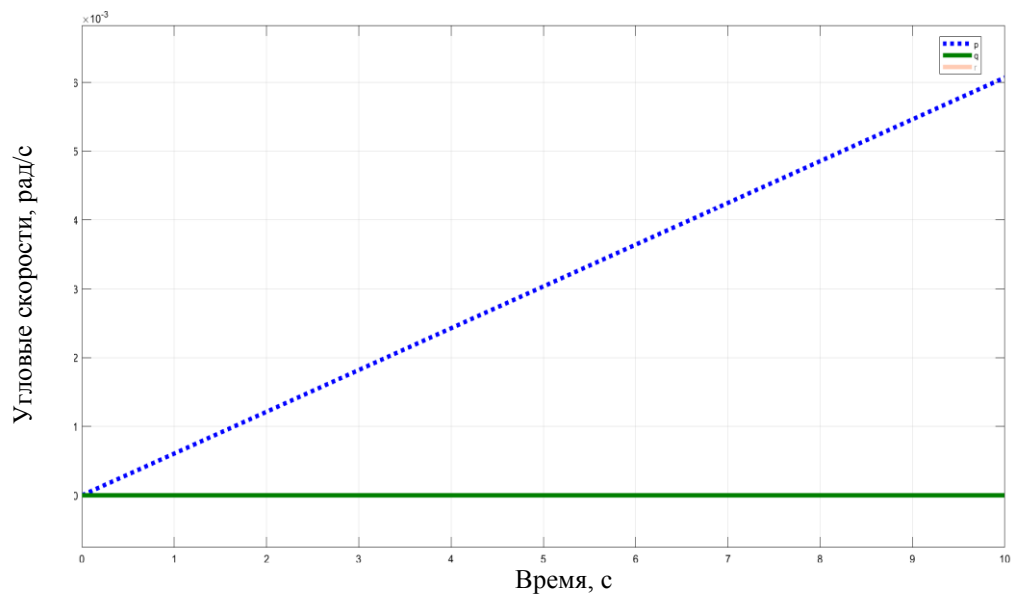
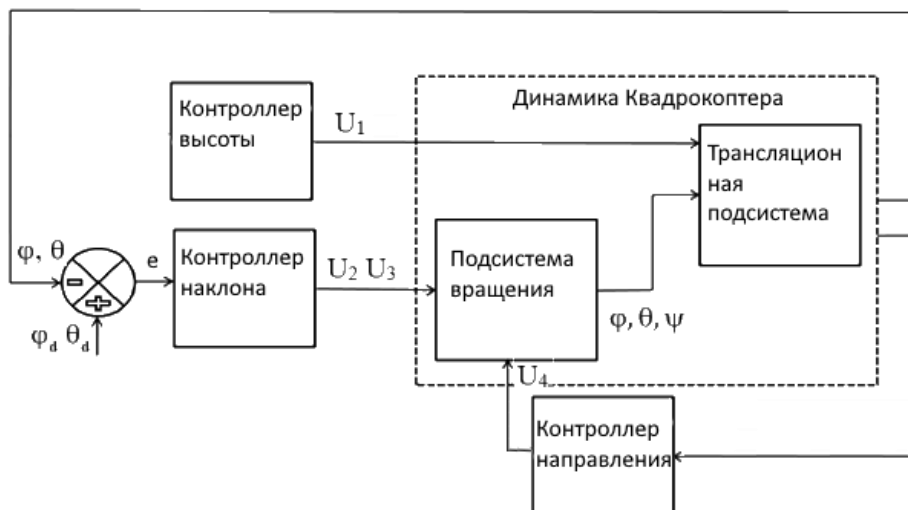


Рисунок 6. Движение по наклону, крену и рысканию

*Замкнутый цикл, ПИД-регулятор.* В системе с обратной связью желаемый выход зависит от входа. Такая система называется замкнутой системой с обратной связью (рис. 7).

После того, как полученная математическая модель квадрокоптера была проверена с использованием имитации разомкнутого контура, среда имитационного моделирования расширяется за счет включения контроллеров высоты, ориентации, курса и положения.



**Рисунок 7.** Система замкнутого цикла с обратной связью

Здесь используются входные данные по тангажу, крену и скорости рыскания, которые проходят через два ПИД-регулятора. Согласно модели (рис. 1) этими входами являются тангаж, крен, рыскание. Внешний цикл минимизирует ошибку информации об угле, а внутренний цикл минимизирует ошибку информации о скорости. Однако рыскание состоит только из одного ПИД-регулятора и сводит к минимуму только ошибку скорости рыскания.

В целом результаты показывают, что математическая модель точно отражает динамику квадрокоптера.

**Таблица 1.** Входные данные для расчета полета квадрокоптера

m	0,82		P	I	D
g	9,8	PID	0,12	0,11	0,01
		PID каскадный	1	0	0
u1	8,1				
u2	0.000017	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	
		$28,8 \cdot 10^{-3}$	$28,8 \cdot 10^{-3}$	$26 \cdot 10^{-3}$	

Перечисленные коэффициенты усиления используются в ПИД контроллере, который реализован на квадрокоптере с использованием микроконтроллера и соответствующего программного обеспечения. Серия из трех значений  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  составляет единичный регулятор. В данном случае мы имеем 5 контроллеров. Во время полета квадрокоптера они представляют собой контроллеры ПИД, показанные в Simulink модели, и фиксируют динамику квадрокоптера в полете. В результате применения этих контроллеров математическая модель лучше учитывает полетные данные.

На рис. 8-9 показаны результаты моделирования для замкнутого цикла с обратной связью.

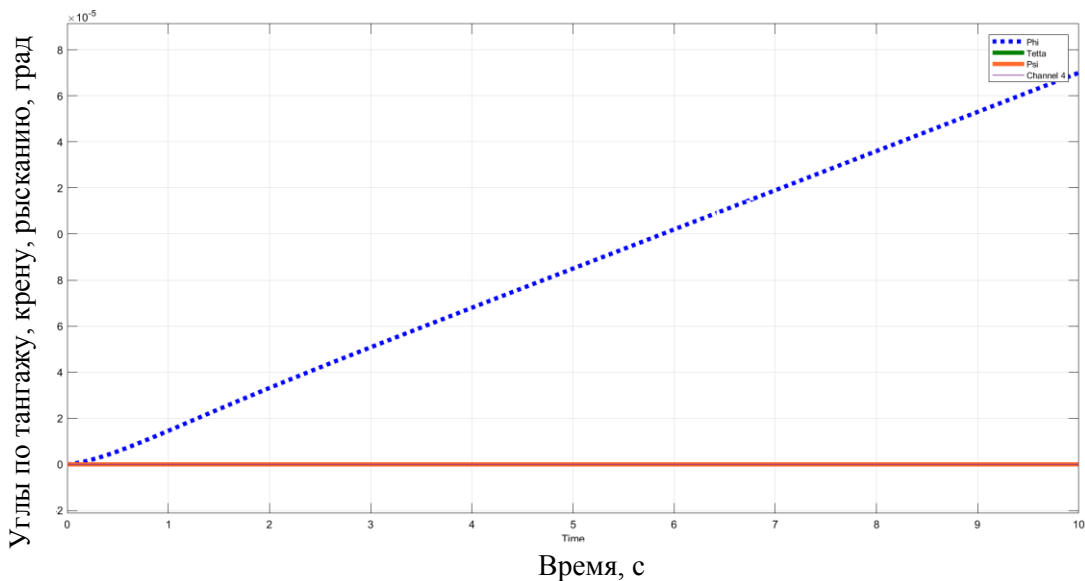


Рисунок 8. Углы по тангажу, крену, рысканию

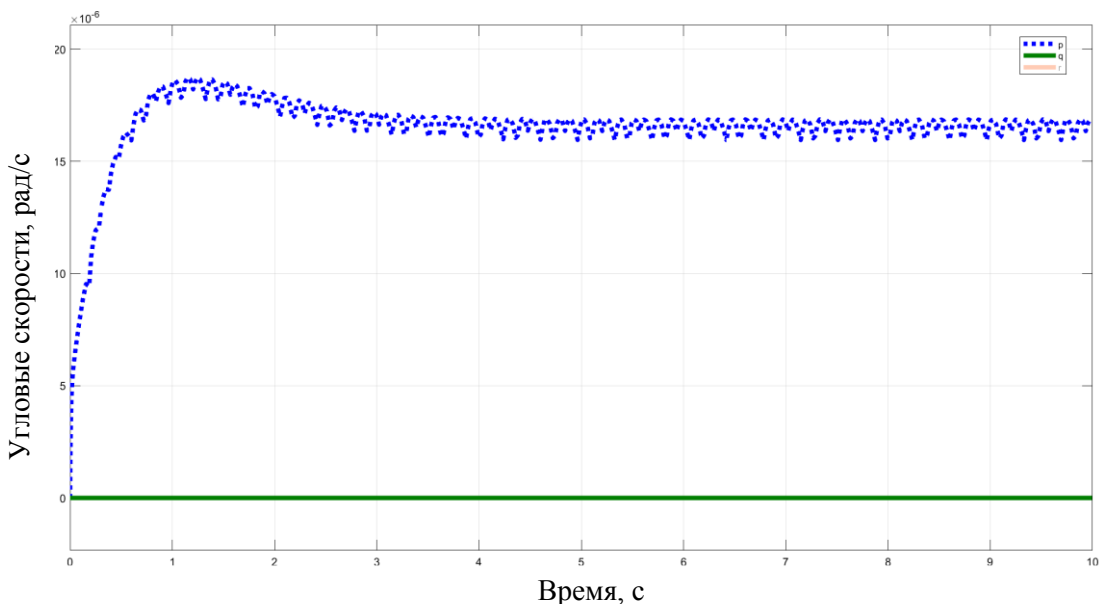


Рисунок 9. Движение по наклону, крену и рысканию

Представим каскадную архитектуру управления, в которой использовался внутренний цикл, который передает информацию об угловой скорости, и внешний цикл, который передает информацию об ориентации. Здесь внутренний цикл и внешний цикл используют информацию о состоянии, созданную динамикой квадрокоптера во время моделирования, сравнивают ее с входными данными и пытаются минимизировать разницу. Он известен как сигнал ошибки, который определяется как разница между заданным входным сигналом и измеренными выходными данными [6]. Рис. 10-11 иллюстрируют эту архитектуру каскадного управления.



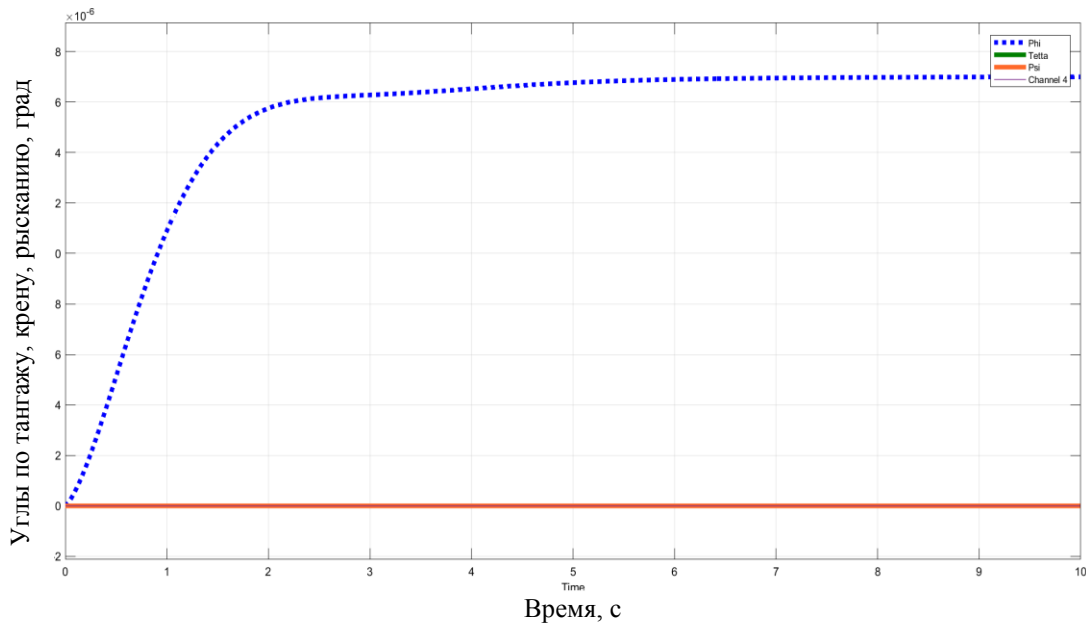


Рисунок 10. Углы по тангажу, крену, рысканию

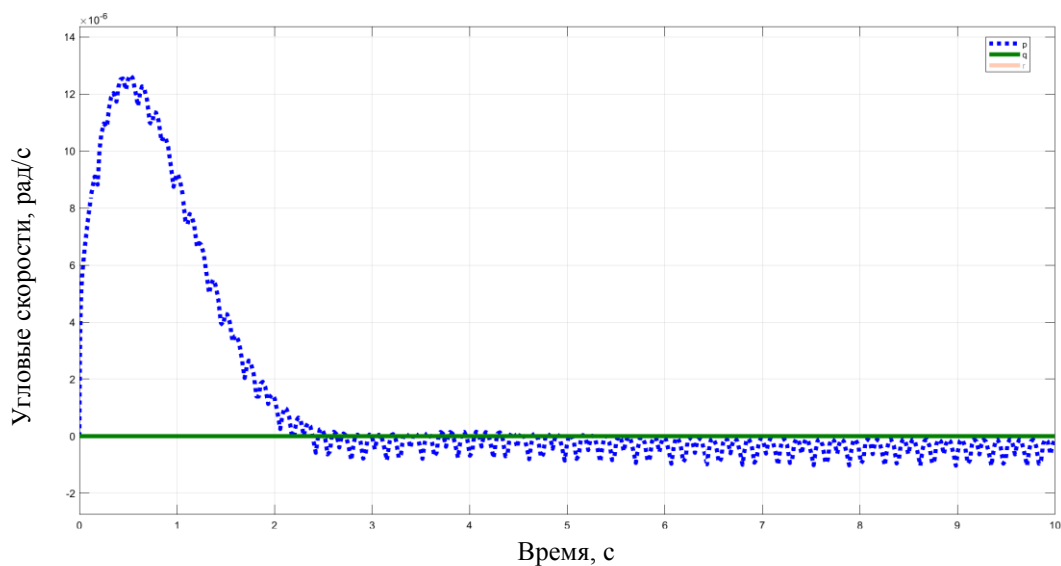


Рисунок 11. Движение по наклону, крену и рысканию

*Заключение.* В этом исследовании была разработана нелинейная математическая модель с ПИД-регулятором и каскадным П и ПИД в Simulink. Эта модель была проверена путем сравнения данных полета разомкнутого и замкнутого циклов, а полученные результаты показали более лучшие результаты изменения динамики полета квадрокоптера. Результаты исследования продемонстрировали возможность управления полетом квадрокоптера с помощью построенной Simulink модели. Полученные параметры полетных

данных удовлетворительны, при этом конструкция модели хорошо стабилизирует квадрокоптер при различных маневрах.

#### Список литературы

1. Francesco Sabatino. Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation, Stockholm, Sweden June. – 2015.
2. Abdulkader Joukhadar, Mohammad Alchehabi, Adnan Jeje. Advanced UAVs Nonlinear Control Systems and Applications. – IntechOpen, 2019.
3. Simulated Annealing-Based Optimal Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller Design: A Case Study on Nonlinear Quadcopter Dynamics. Kristofer Kevin Nemirsky. – San Jose State University, SJSU ScholarWorks, Spring 2017.
4. Claudia Mary, Luminita Cristiana Totu, Simon Konge Koldbæk, Modelling and Control of Autonomous Quad-Rotor. Masters Thesis, 2010.
5. Shim, H.D. Hierarchical flight control system synthesis for rotorcraft-based unmanned aerial vehicles: Ph.D. Thesis. – The University of California: Berkeley (2000).
6. M.A. Beisenbi, S.T. Suleimenova, A.A. Taurbekova, Research of robust stability of control systems with  $m$  inputs and  $n$  outputs in the case of catastrophe elliptical umbilic // Journal bulletin of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. – Issue 5. – P. 142-147. – Publisher Natl Acad Sci Republic Kazakhstan, 2017/1/1.
7. M.A. Beisenbi, A.Z. Zakarina, V.V. Nikulin, Y.F. Bulatbayeva. Design of control system with increased potential of robust stability in a class of four-parameter structurally stable mappings for spacecraft model // International Journal of Applied Engineering Research. – V 11, Issue 22. – 2016.

---

ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ  
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА  
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_34  
МРНТИ 67.15.63

**В.Ф. Демин, М.О. Иманов, Н.Г. Кожанов**

Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан

E-mail: spark.2011@mail.ru

#### УПРОЧНЕНИЕ ОСЛАБЛЕННЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ С УЧЕТОМ ИХ СОСТОЯНИЯ ӘЛСІРЕГЕН ТАУ СІЛЕМДЕРІН ОЛАРДЫҢ ЖАЙ-КҮЙІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП НЫҒАЙТУ STRENGTHENING OF WEAKEN MOUNTAIN MASSIVES TAKING INTO ACCOUNT THEIR CONDITION

**Аннотация.** Отдельные участки горных выработок пересекают зоны перемятых пород и угля, в которых необходимо применять комбинированную крепь совместно с рамной либо полностью переходить на крепление последней, для закрепления за сводом естественного равновесия пород, со шивкой переслаивающихся пород кровли. Также при отработке лав на мощных пластах для укрепления обрушившихся пород в верхнем слое, при нарушенных кровлях угольных пластов и переходе выработок необходимо упрочнение околоконтурных пород.

**Ключевые слова:** сооружение искусственных полостей в земной коре, угольные шахты, деформации, дефектность, средства и способы упрочнения; смолы; горнотехнологические условия разработки.

**Аңдатпа.** Тау-кен қазбаларының жекелеген учаскелері мыжылған тау жыныстары мен көмір зоналарын қиып өтеді, онда тірек тіреуішпен бірге тірек тіреуішті пайдалану керек немесе

соңғысын бекітуге толық ауысу керек, доғаның артындағы жыныстардың табиғи тепе-теңдігін қамтамасыз ету керек төселген шатыр жыныстары. Сондай-ақ, көмір қабаттарының шатыры сынған және жұмыс қабаттарының ауысуы бар жоғарғы қабаттағы құлаған жыныстарды нығайту үшін қалың қабаттарда ұзын қабырғалармен жұмыс істеу кезінде контурға жақын жыныстарды нығайту қажет.

**Түйін сөздер:** жер қыртысында жасанды қуыстар салу, көмір шахталары, деформациялар, ақаулар, нығайту құралдары мен әдістері; шайырлар; тау-кен технологиясының даму шарттары.

**Abstract.** Separate sections of mine workings intersect zones of crumpled rocks and coal, in which it is necessary to use a combined support together with a frame support or completely switch to fastening the latter, to secure the natural balance of rocks behind the arch and with stitching of interbedded roof rocks. Also, when working longwalls on thick seams to strengthen the collapsed rocks in the upper layer, with broken roofs of coal seams and the transition of workings, it is necessary to strengthen the near-contour rocks.

**Keywords:** construction of artificial cavities in the earth's crust, coal mines, deformations, defective-ness, means and methods of strengthening; resins; mining technology development conditions.

*Введение.* Решение этой задачи значительно облегчается с применением технологий укрепления трещиноватых пород и углей твердеющими химическими составами на основе полиуретановых, фенольных и органоминеральных смол. Способ упрочнения пород химическими составами заключается в нагнетании компонентов в трещиноватый массив. В результате нагнетания образуется вспененная отвержденная масса, а возникающий при этом распорный эффект, и высокая адгезия состава к породе и углю обеспечивают устойчивость массива. Пластичные свойства нагнетаемых смол препятствуют разрушению адгезионных связей при смещениях частей массива и приложенных к нему динамических нагрузок. По истечении 10-15 мин. химический состав обретает рабочую прочность, при которой можно приступать к ведению подготовительных работ, а по истечении 1-3 час. (в зависимости от вида используемых смол) нагнетенный химический состав приобретает свои окончательные свойства и в зоне нагнетания можно производить выемку угля. В последнее время при ведении горных работ в угольных пластах, ослабленных трещиноватостью, и в зонах геологических нарушений все большее распространение получает способ повышения их устойчивости нагнетанием укрепляющих растворов на основе синтетических смол. Это ведет к увеличению эффективности и безопасности ведения горных и снижению потерь угля в недрах. Затвердевшая смола обладает остаточной пластичностью, что дает возможность упрочняемому массиву деформироваться без разрушения и выдерживать нагрузки горного давления. Вспениваясь, смола создает дополнительный распорный эффект, что повышает связи между блоками массива и улучшает его прочностные свойства [1-4].

*Материалы и методы исследования.* В основу фильтрационных методов расчета параметров нагнетания положено представление о распространении укрепляющих растворов на основе синтетических смол в угольном массиве, как трещиновато-пористой среде. Для применения стабилизирующего воздействия смолами необходимо определение области эффективного применения укрепления угольного массива растворами на основе синтетических смол, определение толщины укрепляемой зоны, давления нагнетания, гидравлических параметров угольного массива, технологических параметров укрепления [4 - 7]. Ниже изложены основные подходы для определения параметров эксплуатации комплексов для нагнетания смолоукрепляющих смесей.

*Область эффективного применения укрепления угольного массива растворами на основе синтетических смол.* В настоящее время укрепление угольного массива синтетическими смолами применяется при вскрытии выбросоопасных пластов, проходке пластовых горных выработок и отработке пластов в зонах геологических нарушений. Кроме этого, синтетические смолы инъецируют в угольные пласты с целью блокировки газов

пылеподавления. Прочность укрепленного угольного массива определяется его начальной прочностью, прочностью отвержденного инъецируемого раствора и его количеством в единице объема массива. Верхнюю техническую границу применения этого способа определяют из условия обеспечения устойчивости укрепленного угольного массива вокруг выработки. Целесообразность применения укрепления определяют в каждом конкретном случае технико-экономическим сравнением с другими способами или видами крепи и методами повышения устойчивости.

*Определение толщины укрепляемой зоны.* Толщину минимальной зоны укрепления определяют в зависимости от ширины зоны неупругих деформаций, формы и размеров поперечного сечения горной выработки, физико-механических свойств укрепленного угольного массива, проявлений горного давления.

*Определение давления нагнетания.* Определяется максимальное и активное давления нагнетания. Расчет дополнительных потерь давления, возникающих при удалении насосной установки от нагнетательной скважины и из-за наличия резких перепадов сечений и изгибов, подводящих трубопроводов и шлангов, осуществляют согласно законам гидравлики.

*Определение гидравлических параметров угольного массива* осуществляют перед производством работ на основе результатов опытного нагнетания на участке, подлежащем укреплению. Нагнетание производят через скважину с диаметром и длиной более 5,0 м. В опытную скважину, нагнетают укрепляющий раствор при проектных значениях концентрации, времени схватывания и давления. Нагнетание производят до момента снижения относительного темпа нагнетания на 15-20 %. Определяется количество раствора, нагнетаемое в скважину и производят отбор проб укрепленного угля на расстоянии 0,05-0,2 м от нагнетательной скважины и неукрепленного угля. В результате определения плотности и зольности укрепленного угля и зольности чистого угля рассчитывают максимальный удельный расход с установлением приведенных радиуса скважины, расхода, времени нагнетания (радиальный поток).

*Определение технологических параметров укрепления.* При проектировании и производстве работ по укреплению угольного массива приходится решать следующие основные задачи: при заданном (исходя из горно-технических условий) расстоянии между скважинами или размерами зон эффективного укрепления, которые необходимо получить, определяют количество необходимого раствора, времени нагнетания, зону укрепления и количество необходимого раствора. При укреплении слабонарушенных мощных угольных пластов необходимо учитывать их анизотропию. С учетом анизотропных свойств зона распространения раствора будет иметь форму эллипса. Основными технологическими параметрами при укреплении угле-породного массива химическими растворами являются длина и расстояние между скважинами (шпурами), давление и время нагнетания и т. д. При разработке угольных месторождений в окружающих очистной забой породах и угле происходит перераспределение напряжений с концентрацией их в отдельных зонах. Для обеспечения устойчивости обнажений должно быть соблюдено неравенство (1).

$$R_{szh} \geq \gamma * H * K, \quad (1)$$

где  $R_{szh}$  – предел прочности пород непосредственной кровли при одноосном сжатии МПа;  $\gamma$  – объемный вес пород непосредственной кровли т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина разработки, м;  $K$  – коэффициент концентрации напряжений.

В результате действия статических и динамических нагрузок (при осадке основной кровли) в непосредственной кровле образуется зона разрушенных пород впереди очистного забоя.

С увеличением глубины разработки увеличиваются размеры зоны нарушений. Поэтому условие устойчивости с учетом ослабления пород определяется неравенством (2).

$$\theta * R_{szh} \geq \gamma * H * K, \quad (2)$$

где  $\theta$  – коэффициент структурного ослабления (отношение прочности породы в массиве к прочности в куске при одноосном сжатии или растяжении).

Таким образом, повышение коэффициента структурного ослабления является одной из основных задач повышения устойчивости обнажений. В зонах нарушения породы кровли обладают, в сравнении с нетронутым массивом, повышенными фильтрационными характеристиками, обуславливающими их хорошую проницаемость. Нагнетанием химических растворов с высокой проникающей способностью в трещины ослабленной зоны можно склеить слои пород, что предотвратит их дальнейшее расслоение и повысит несущую способность непосредственной кровли.

Экспериментальные исследования при химическом укреплении пород, проведенные на шахтах Карагандинского бассейна, позволили рекомендовать количественные зависимости для определения основных параметров при нагнетании укрепляющих растворов.

Длина шпуров –

Пример формулы 3:

$$L_{shp} = \frac{\ell_n}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

где  $\ell_n$  – среднее значение зоны предельных состояний пласта для условий Карагандинского бассейна, на практике принимается равным 3 м;  $\alpha$  – угол наклона шпуров, на практике принимается равным 10 - 15 град.

Расстояние между шпурами зависит от радиуса распространения раствора, который определяется из эмпирической зависимости [1].

$$R = Kexp \left\{ X_1 \left[ -108 \cdot \left( \frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{szh}} \right)^2 + 664 \cdot \left( \frac{\gamma \cdot H}{\sigma_{szh}} \right) - 4 \right] + 100 \cdot X_2 \right\}, \quad (4)$$

где  $Kexp$  – параметр функции – зона обработки 3-4 м;  $X_1$  – коэффициент, характеризующий изменение радиуса в зависимости от глубины разработки и прочности вмещающих пород (табл. 1);  $X_2$  – коэффициент, характеризующий изменение радиуса в зависимости от давления нагнетания раствора с учетом соотношения глубины разработки и прочности вмещающих пород (табл. 2);  $\sigma_{szh}$  – прочность пород на одноосное сжатие 15-20 МПа.

*Результаты и их обсуждения.* Обработка результатов исследований методами математической статистики позволила получить усредненные численные значения коэффициентов для условий Карагандинского бассейна с распределением по характерным интервалам состояния устойчивости пород (табл. 1).

**Таблица 1.** Численные значения расчетных коэффициентов

$\gamma \cdot H / \sigma_{сж}$	$X_1$	$X_2$	$K, м$
До 0,3	0,016	0,0017	10
0,31-0,5	0,015	0,0035	10
Более 0,5	0,1	0,0055	10

С целью исключения гидроразрыва при химическом укреплении пород давление нагнетания раствора не должно превышать предела прочности пород на растяжение (5).

Пример формулы 5:

$$P_H \leq \sigma_{РАСТ}. \quad (5)$$

Предел прочности пород на растяжение (аргиллитов, алевролитов и песчаников) варьирует в пределах 3,7-7,8 МПа. Процент категории пород с прочностью на растяжение более 10 МПа незначителен. Поэтому нагнетание химических растворов в массив необходимо производить при давлении 2-7 МПа. Подставляя полученные значения коэффициентов и давления в уравнение (4), определяется радиус для различных типов пород (табл. 2).

**Таблица 2.** Радиус для различных типов пород

$\gamma \cdot H / \sigma_{сж}$	R, м
До 0,3	3,0
0,31-0,5	2,0
Более 0,5	1,0

Расстояние между шпурами –  
Пример формулы 6:

$$\ell_0 = 2R - c, \quad (6)$$

где  $c = 0,3$  – величина зоны перекрытия, м.

Установленные значения расстояния между шпурами уточняются в производственных условиях. Для этого бурятся три шпура на расстоянии, например, 2 м друг от друга. В крайние шпуры нагнетается раствор и устанавливается время появления его в центральной шпуре. Расстояние между шпурами [2] –

Пример формулы 7:

$$\ell = \ell_0 \sqrt{\frac{t_n}{t_{np}}}, \quad (7)$$

где  $\ell_0$  – расчетное расстояние между шпурами, м;

$t_n$  - время на бурение, промывку и герметизацию шпура, с;

$t_{np}$  - время появления раствора в центральной скважине, с.

Время нагнетания раствора –

Пример формулы 8:

$$t_H = \frac{R^2 \cdot K_{mp} \cdot \beta}{4,42 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-0,32 \cdot X} \cdot \frac{\mu}{\mu_p} \cdot P_H}, \quad (8)$$

где  $K_{mp} = 0,23 - 0,7$  – коэффициент трещиноватости различных типов пород в условиях Карагандинского бассейна [3 - 5];  $\beta = 0,4 - 0,8$  – коэффициент заполнения трещин;  $X$  – расстояние до забоя в направлении подвигания лавы, м;  $\mu$  – вязкость воды, сП;  $\mu_p$  – вязкость раствора, сП.

Расход раствора на шпур (скважину) –

Пример формулы 9:

$$Q = 4,12 * \pi * K_{mp} * L_{SHP}. \quad (9)$$

Производительность насосной установки –

Пример формулы 10:

$$n = \frac{Q}{t_n}, \quad (10)$$

**Заключение.** 1. Одной из основных задач, которые необходимо решить при совершенствовании технологии инъецирования полимерных смол в нарушенный горный массив является повышение устойчивости и стабилизации горного массива при производстве технологических процессов, предлагается внедрение в производственную практику мето-

дики расчета, технологии и обоснование параметров упрочнения, связывания и стабилизации, нарушенных вмещающих угле-породных массивов с учетом их геомеханического техногенного состояния.

2. Упрочнение пород кровли пластовой выработки в процессе ее проведения определяется: длиной скважины под инъекционный анкер-репер; расстоянием между скважинами; установкой анкер-репера; изоляцией поверхности выработки; выбором концентрации раствора; упрочнением трещин, вскрытых скважиной, тонких трещин; определением конечного давления нагнетания; процессом смолянизации; оборудованием для нагнетания смол; определением параметров трещиноватости; контролем качества упрочнения породной кровли пластовой выработки; расчетом крепи пластовых выработок с упрочненной породной кровлей.

#### Список литературы

1. Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. и др. Экспериментальные исследования устойчивости повторно используемых выемочных выработок на пологих пластах Донбасса. – Днепропетровск: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. – 426 с.
2. Лушников В.Н., Еременко В.А., Сэнди М.П. и др. Крепление горных выработок в условиях деформируемых и удароопасных массивов горных пород // Горный журнал. – № 4, 2014. – С. 37-43.
3. Eremenko V.A. Louchnikov V.N. Sandy M.P. Mikin D.A. Milsin E.A. Gornyi Zhurnal – Mining Journal. – № 7, 2013. – Pp. 59-67.
4. Демин В.Ф., Немова Н.А., Демина Т.В., Зейтинова Ш.В. Управление геомеханическими процессами для повышения устойчивости углепородного массива // Научный вестник Национального горного университета. – Днепропетровск, Украина. – № 2, 2016. – С. 5-10.
5. Демин В.Ф., Немова Н.А., Демина Т.В., Каратаев А.Д. Деформирование вмещающих пород вокруг горных выработок в зависимости от влияющих факторов // Научный вестник Национального горного университета. – Днепропетровск, Украина. – № 4 (148), 2015. – С. 35-38.
6. Демин В.Ф., Бейсембаев К.М., Маусымбаева А.Д., Демина Т.В. и др. Технологические схемы крепления сопряжений выработок, лав с примыкающими выработками, выработок вспомогательного назначения // ООО «Редакция журнала «Уголь». – № 7, 2013. – С. 35-39.

---

ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ  
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА  
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_39  
MPHTI 67.15.13

**В.Ф. Демин, М.О. Иманов, Н.Г. Кожанов**  
Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан  
E-mail: spark.2011@mail.ru

#### **ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ ТҰРАҚСЫЗ ТАУ СІЛЕМДЕРІН ТҰРАҚТАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ TECHNOLOGY FOR STABILIZING UNSTABLE MOUNTAINS**

**Аннотация:** Одной из основных задач, которые необходимо решить при совершенствовании технологических схем нагнетательного инъецирования полимерных смол в нарушенный горный массив является разработка методики расчета, технологии, обоснование параметров упрочне-

ния и связывания нарушенных вмещающих угленосных массивов с учетом их геомеханического техногенного состояния для повышения устойчивости и стабилизации горного массива при производстве технологических процессов.

**Ключевые слова:** стабилизация горного массива, угольные шахты, деформации, дефектность, приконтурные породы, средства, смолы, горно-технологические условия разработки.

**Аңдатпа:** Полимерлі шайырларды бұзылған тау жынысы массасына айдаудың технологиялық сызбаларын жетілдіру кезінде шешуді қажет ететін негізгі міндеттердің бірі – есептеу әдісін, технологиясын, бұзылған иесі көмір-тас массивтерін қатайту және байланыстыру параметрлерін негіздеу, технологиялық процестерді өндіруде массивтің тұрақтылығы мен тұрақтылығын арттыру үшін олардың геомеханикалық техногендік күйін ескеру.

**Түйін сөздер:** тас массасын тұрақтандыру, көмір шахталары, деформациялар, ақаулар, шекара жыныстары, құралдар; шайырлар; тау-кен технологиясының даму шарттары.

**Abstract:** One of the main tasks that must be solved when improving the technological schemes of injection injection of polymer resins into a disturbed rock mass is the development of a calculation method, technology, substantiation of the parameters of strengthening and bonding of disturbed host coal-rock massifs, taking into account their geomechanical technogenic state to increase the stability and array in the production of technological processes

**Keywords:** rock mass stabilization, coal mines, deformations, defectiveness, border rocks, means; resins; mining technology development conditions.

*Введение.* На сегодняшний день такие работы, как добытие угля из очистных и горно-подготовительных забоев шахт в ситуациях трещиноватых нестабильных угленосных массивов подвержены высокой степени травматизма рабочих. Негативные эффекты при отжиме и вытряхивании угля, а также при разрушении различных типов кровли выражаются в недостаточно оптимальной работе очистных забоев, снижении общей доли добычи и темпов проходок выработок, а также в снижении положительных свойств угля. Так, необходимое использование механических способов предупреждения вывалообразований пород и удержания крепления подводящих выработок путем установки штанговых крепей, выкладки клетей и применения других мер требует дополнительных расходов материалов и связано с трудоемкими, сопряженными с опасностью травматизма горнорабочих работами.

Однако, несмотря на имеющийся положительный опыт укрепления угольного массива синтетическими смолами, выбор параметров технологии укрепления пока еще недостаточно обоснован. Одной из главных причин этого является отсутствие фильтрационных методов расчета параметров нагнетания укрепляющих растворов на основе синтетических смол с учетом специфики угольного массива, как фильтрующей среды, и коллектора жидкости и газа.

Самым оптимальным материалом для укрепления горной массы являются полиуретановые смолы, которые имеют свойство наилучшей способности проникания. Такая смесь позволяет добиться коэффициента заполняемости всех трещин до 0,9...0,95 при накачивании под большим давлением. Обработанный полиуретан отличается остаточной пластичностью, что позволяет закаленной массе сохранять устойчивость даже при больших нагрузках горных пород и деформироваться без нарушения связей. При этом создается вспомогательное действие подушки при вспенивании полиуретана, позволяющее повысить свойство устойчивости и укрепить связи между блоками матрицы [1-3].

Для обоснования выбранной исследовательской модели/стратегии при подготовке материалов статьи использовался комплекс методов, включающий: анализ и обобщение сведений, содержащихся в научно-технической, патентной и специальной литературе, испытания технологических разработок, технический анализ и производственные эксперименты.



*Технология упрочнения смолянизацией слоистой породной кровли пластовых выработок.* Решению проблемы повышения эффективности крепления горных выработок посвящены работы многих исследователей. Большие научные изыскания проводились в области создания новых технологий проведения и крепления горных выработок. Однако, большинство этих исследований носили немасштабный характер и были ограничены благоприятными горно-геологическими условиями.

К аномальным относятся участки выработок, находящиеся: в зонах влияния геологических пликативных и дизъюнктивных нарушений; повышенной трещиноватости вмещающих пород и угля; повышенной обводненности вмещающих пород и угля; повышенного горного давления на подработанных или надработанных пластах свиты; на пластах опасных, угрожаемых, а также несклонных к горным ударам и внезапным выбросам угля(породы) и газа; в ненарушенном массиве; в зонах повышенного горного давления, в зонах влияния пликативных и дизъюнктивных нарушений; вне зон и в зонах влияния очистного выработанного пространства; в обводненных и необводненных породах и др.

К факторам, которые влияют на возможность применять смолоукрепление системы при проведении подготовительных выработок относятся: прочность вмещающих пород; размер зон опасных деформаций породы вокруг горных выработок; величина смещений горных пород, находящихся в кровле, величина конвергенции, срок службы выработки, а также предельная величина безопасного смещения (опускания) пород кровли, закреплённых в горной выработке.

Как показывают лабораторные и шахтные исследования, в процессе нагнетания раствора в массив происходит уменьшение скорости распространения раствора на отрезках укрепляемой зоны, связанное главным образом с различием вязкости раствора и изменением пористости за счет образования пленки фильтруемой жидкости вокруг частиц породы.

Нагнетание химического раствора производится через шпур, пробуренные непосредственно из очистного забоя.

Для укрепления пород кровли шпур бурят под таким углом наклона, чтобы его забой располагался над пластом на высоте 0,5...0,6 м, устья шпуров располагают на контакте кровля-пласт или на расстоянии 0,2...0,3 м от кровли лавы.

*Технология упрочнения горного массива.* Упрочнение горного массива – технология, предупреждающая возникновение аварийных ситуаций в следующих случаях:

- горно-геологические нарушения;
- «заколы», возникающие на контакте угля и пород кровли, вызванные длительными остановками лавы и недостаточной скоростью подвигания очистного забоя;
- неблагоприятное расположение фронта лавы по отношению к кливажу;
- несоответствие типа крепи данным горно-геологическим условиям.

Для устранения негативных последствий нарушений кровли необходимо:

- закрепить кровлю;
- пробурить шпур диаметром 42 мм и длиной не менее 2,5 м на протяжении обрушения. Количество шпуров зависит от мощности пласта. Обычно по обеим границам нарушенной зоны бурятся шпур по вертикальному ряду, на расстоянии до 1,0 м друг от друга;
- ввести в приготовленные шпур инъекционные анкера. На конец анкера накручивается адаптер с Т-образным фитингом, к нему подключаются два шланга диаметром 10 мм, по которым закачивают смолу и катализатор (отвердитель) пневматическим или гидравлическим насосом.

Расход двух компонентов смолы на один шпур – не более 1 комплекта (65 кг). Угол наклона шпуров выбирается в зависимости от мощности нарушенных пород, от характера их трещиноватости, они должны быть ориентированы в крест простирания основного направления трещин. При малой трещиноватости и небольшой мощности нарушенной кровли (до 1,5 м) угол наклона  $10^{\circ}$ , при развитой трещиноватости и мощности нарушенных пород свыше 1,5 м –  $20...25^{\circ}$ . Расстояние между шпурами определяется экспериментальным путем из условия минимальных затрат труда на укрепление неустойчивого массива.

В местах отжима угля из очистного забоя шпуры бурятся по возможности перпендикулярно к плоскости обнажения массива. Длина шпуров должна быть не менее чем на 0,5 м больше суточного подвигания лавы при расстоянии между ними 2...3 м. В каждом конкретном случае расстояние между шпурами должно устанавливаться расчетным методом и корректироваться результатами экспериментов в производственных условиях. При очередном цикле бурения шпуры располагают в шахматном порядке с ранее обуренным циклом. Шпуры герметизируют на глубину 0,7...1,2 м. Темп нагнетания – 5...30 л/мин. При нагнетании давление у устья шпура не должно превышать 4...6 МПа. Средний расход скрепляющего раствора – 25...40 л/м шпура.

По характеру предназначения использование метода предварительного упрочнения возможно в следующих случаях: для повышения устойчивости горных выходов; территориального выделения фильтрационной способности угольной горной массы; повышения несущей способности угольных горных столбов в целях безопасности в глубинах массива.

В связи с горно-геологическими и горно-техническими характеристиками для закаленных объектов предварительный метод используется, в случае:

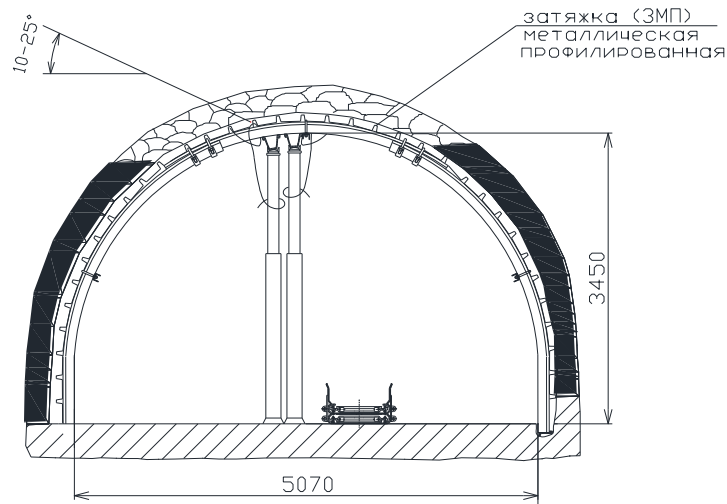
- пересечения с тектоническими разломами;
- пересечения с угольными пластами большой толщины, кровля и почва которых состоят из неустойчивых и слабых слоев горных пород;
- пересечения областей, горные породы которых имеют тонкую слоистую структуру и разбиты системой из определенного количества трещин;
- необходимости проведения работ в местах их соединения;
- проведения работ в выемке или ее построения в рабочем пространстве.

Предварительное уплотнение угольного массива заключается в закачке химических растворов в области боковых пород, почвы и кровли выработок по отдельности или в любой комбинации между ними, в зависимости от конкретных горно-геологических условий.

Анализ зарубежного опыта, а именно Германии, Польши, Австралии, показывает эффективность использования полимерных смол для упрочнения ненадежных частей в массиве горных пород. Для устранения схождения, упрочнения почвы в рыхлых породах, опережающего крепления горных выработок, а также наполнения пустот в тоннелестроении, на рудниках и шахтах используются полимерные смолы [4 - 5].

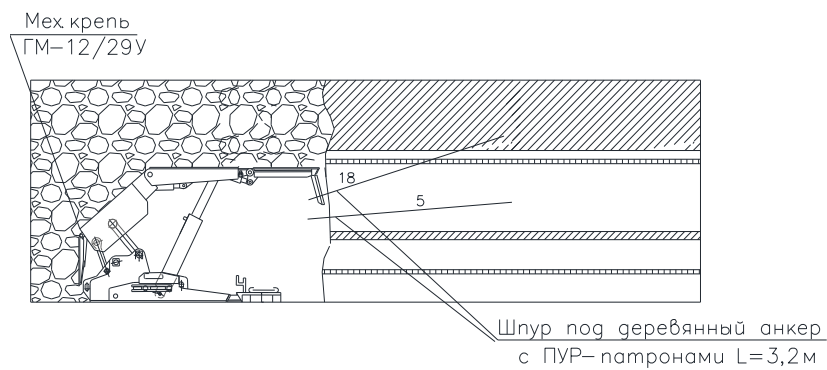
Следует отметить, что опыта работ по упрочнению массива путем инъекций смол в Казахстане и странах СНГ на сегодняшний день недостаточно, тем более нет исследований с учетом напряженно-деформированного состояния неустойчивых пород и методик расчета их параметров в производственной практике. Эта проблема требует дополнительных теоретических и промышленно-экспериментальных исследований.

На угольных шахтах эти методы применяются для повышения устойчивости кровли очистных забоев, сопряжений лав со штреками, межслоевых пачек при разработке мощных пологих пластов (рис. 1), кровель и нависающих угольных массивов при упрочнении кровли монтажных камер, повышения устойчивости горных пород в лавах (рис. 2), в зонах геологических нарушений (в том числе под- и надработки пластов) – рис. 3; переходах одних выработок другими и прочих ослабленных зон [6-9].

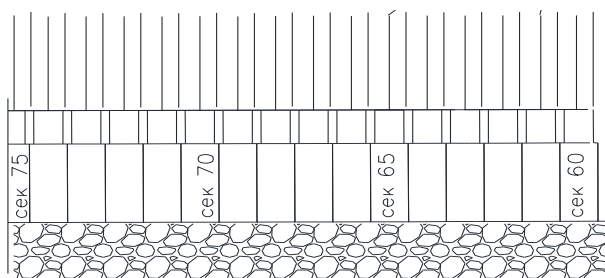


**Рисунок 1.** Химическое укрепление сопряжения лавы при отработке нижнего слоя мощного пласта дб в Тентекском угленосном районе Карагандинского угольного бассейна

Для укрепления определенных или больших участков трещиноватых массивов используется способ нагнетания укрепляющих составов в породный массив при разработке месторождений.



*a*

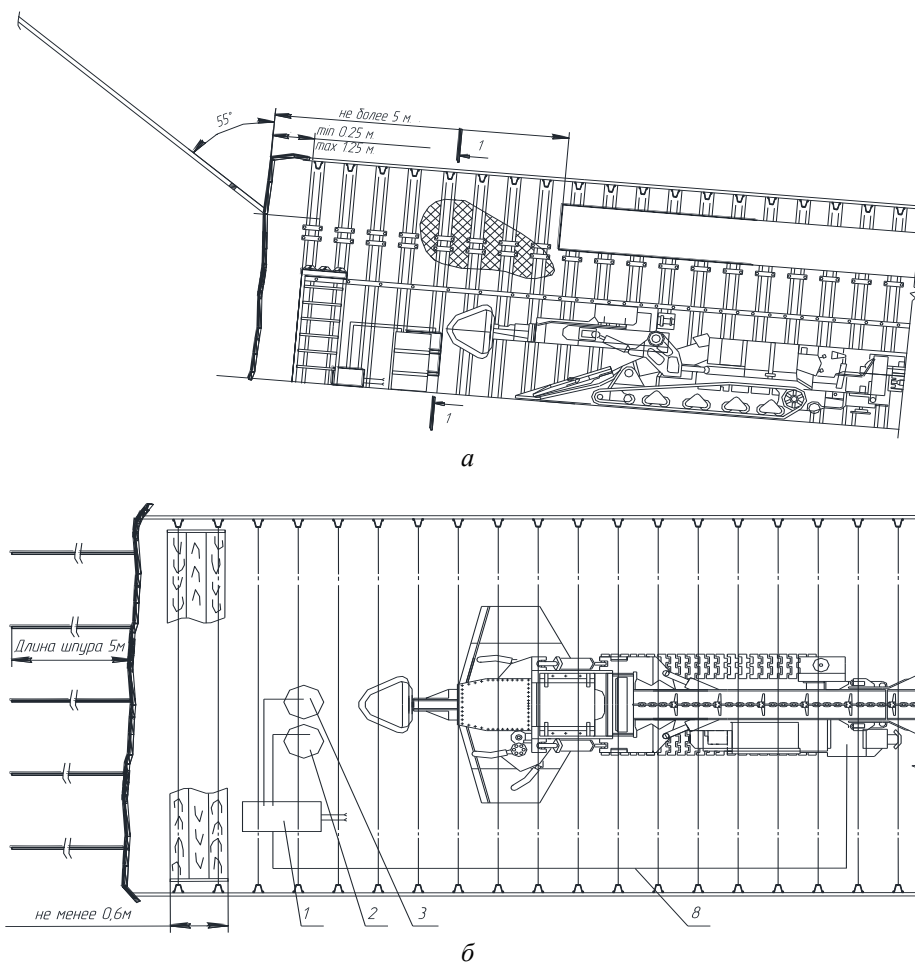


*б*



*в*

**Рисунок 2.** Упрочнение пород кровли смолами в лаве 4.01дб-1-в шахты им. Ленина Карагандинского угольного бассейна: а – профиль; б – план; в – вид в лаве



**Рисунок 3.** Технология упрочнения неустойчивых пород при проведении подготовительных выработок: а – профиль; б – план

Научная ценность статьи состоит в формировании методического подхода и условий для обоснованного применения технологических средств стабилизации неустойчивых горных массивов посредством смолянизации неустойчивых зон пород.

*Заключение.*

1. Предложена технология закалки смолянизацией слоистой породной кровли пластовых выработок: изоляция на поверхности пластовых выработок трещин, гидравлически связанных с цементирующей скважиной; обнаружение на поверхности пласта точек выхода трещин; изоляция крупных трещин на поверхности пластовой выработки; армирование пород кровли пластовой выработки в процессе ее эксплуатации; назначение концентрации фиксирующего раствора и способа его закачки; длина скважины для упрочнения; расстояние между скважинами; назначение концентрации закрепляющего раствора и способ его нагнетания, расхода раствора в скважину, конечного давления нагнетания и объема раствора; установка анкерного крепления в скважине; заполнение мелкозернистых трещин.

2. Актуальным является разработка и внедрение в производственную практику технологии и обоснование параметров упрочнения, связывания и стабилизации нарушенных вмещающих угле-породных массивов с учетом их геомеханического техногенного состояния.

## Список литературы

7. Zubov V.P., Nikiforov A.V. Features of Development of Superimposed Coal Seams in Zones of Disjunctive Geological Disturbances // International Journal of Applied Engineering Research. – ISSN 0973-4562. – Volume 12, Number 5 (2017). – P. 765. – © Research India Publications. <http://www.ripublication.com> 765.
8. Zubov V.P., Nikiforov A.V. and Kovalsky E.R. Influence of geological faults on planning mining operations in contiguous seams (Received 22 January, 2017; accepted 15 March, 2017). – Eco. Env. & Cons. 23 (2), 2017. – P. 1176-1180. – Copyright© EM International ISSN 0971-765X\*.
9. Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. и др. Экспериментальные исследования устойчивости повторно используемых выемочных выработок на пологих пластах Донбасса. – Днепропетровск: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. – 426с.
10. Лушников В.Н., Еременко В.А., Сэнди М.П. и др. Крепление горных выработок в условиях деформируемых и удароопасных массивов горных пород // Горный журнал. – № 4, 2014. – С. 37-43.
11. Eremenko V.A. Louchnikov V.N. Sandy M.P. Mikin D.A. Milsin E.A. Gornyi Zhurnal // Mining Journal. – № 7, 2013. – P. 59-67.
12. Демин В.Ф., Немова Н.А., Баизбаев, М.Б., Шмидт-Федотова И.М. Внедрение эффективного способа борьбы с пучением горных выработок // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск, Украина. – № 5 (148), 2016. – С. 13-19.
13. Демин В.Ф., Фофанов О.Б., Демина Т.В., Яворский В.В. Напряжения в зоне влияния горных работ с учетом закрепительных систем: Конференция Скопус / MEACS2016 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (March 2017). 10th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016, MEACS 2016. – Tomsk, Russian Federation; 27 October 2016 through 29 October 2016; Code 126826.
14. Демин В.Ф., Яворский В.В., Демина Т.В., Томилов А.Н. Разработка эффективных способов борьбы с пучением пород почвы в подготовительных выработках угольных шахт // Горный журнал. – № 4, 2018. – С. 52-56.
15. Журов В.В. Совершенствование методики расчета параметров крепления выработок с учетом горно-технологических факторов: дис. ... канд. тех. наук: шифр 25.00.22. – Караганда: КарГТУ, 2010. – 115 с.

ФИЗИКА  
ФИЗИКА  
PHYSICS

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_45  
IRSTI 29.19.16:

**N. Kantay<sup>1,2</sup>, B. Rakhadilov<sup>1</sup>, A. Nabioldina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Non-limited company «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>2</sup>D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan  
E-mail: [nurgan85@mail.ru](mailto:nurgan85@mail.ru)

**INVESTIGATION OF THE ADHESION STRENGTH AND CORROSION RESISTANCE OF THE COATING BASED ON ALUMINUM OXIDE AND ZIRCONIUM OBTAINED BY THE DETONATION METHOD**

**ДЕТОНАЦИОННОЕ АДСПЕН АЛЫНҒАН АЛЮМИНИЙ МЕН ЦИРКОНИЙ ОКСИДИ НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫННЫҒ АДГЕЗИОННОЕ БЕРІКТІГІН ЖӘНЕ КОРРОЗИЯҒА ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ ПОЛУЧЕННОГО ДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

**Abstract.** In this work,  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2$  powders were applied to the substrate surface by the detonation method, a structural analysis of the cross section of the obtained coatings and an EDC analysis were

carried out. The effect of temperature on the structural-phase exchange is considered, the adhesion and tribomechanical strength of  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2$  coatings is checked, their resistance to corrosion in NaCl and 0.5 molar acid  $H_2SO_4$  is determined. It was found that the value of the abrasive wear coefficient  $K$  in the  $Al_2O_3$  coating is more than 2 times, the value of the  $ZrO_2$  coating is more than 1.5 times, that is, the abrasive wear resistance of  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2$  coatings obtained by detonation method. It was found that the  $Al_2O_3$  coating is 1.5 times more resistant to corrosion than the substrate, and the  $ZrO_2$  coating is about 10 times more resistant to corrosion.

**Keywords:** detonation method, coating, corrosion, structure, coefficient of friction, tribology, adhesion, microhardness.

**Аңдатпа.** Жұмыста  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  ұнтақтары детонациялық әдіспен төсеніштің (подложка) бетіне жағылды, Алынған жабындардың көлденең қимасынан құрылымдық талдау жасалып, ЭДС талдау жасалды. Температураның құрылым-фазалық алмасуға әсері қарастрылды,  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  жабындардың адгезиялық және трибомеханикалық беріктігі тексеріліп, NaCl және 0.5 молярлы  $H_2SO_4$  қышқылында коррозияға тұрақтылығы анықталды.  $Al_2O_3$  жабынындағы абразивті тозу коэффициентінің мәні 2 еседен астам,  $ZrO_2$  жабынының мәні 1,5 еседен артық екендігі, яғни детонация әдісімен алынған  $Al_2O_3$  және  $ZrO_2$  жабындарының абразивті тозуына төзімділігі анықталды. Төсеніш материалмен салыстырғанда  $Al_2O_3$  жабыны 1.5 есе,  $ZrO_2$  жабыны 10 есеге жуық коррозияға тұрақты екені анықталды.

**Кілттік сөздер:** детонация әдісі, жабын, коррозия, құрылым, үйкеліс коэффициенті, трибология, адгезия, микроқаттылық.

**Аннотация.** В данной работе порошки  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$  наносились на поверхность подложки детонационным методом, проводился структурный анализ поперечного сечения полученных покрытий и ЭДС-анализ. Рассмотрено влияние температуры на структурно-фазовый обмен, проверена адгезия и трибомеханическая прочность покрытий из  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$ , определена их коррозионная стойкость в NaCl и 0,5 молярной кислоте  $H_2SO_4$ . Установлено, что значение коэффициента абразивного износа  $K$  в покрытии  $Al_2O_3$  более чем в 2 раза, значение покрытия  $ZrO_2$  более чем в 1,5 раза, то есть сопротивление абразивному износу покрытий  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$ , полученных детонационным методом. Было обнаружено, что покрытие из  $Al_2O_3$  в 1,5 раза более устойчиво к коррозии, чем подложка, а покрытие из  $ZrO_2$  примерно в 10 раз устойчивее к коррозии.

**Ключевые слова:** детонационный метод, покрытие, коррозия, структура, коэффициент трения, трибология, адгезия, микротвердость.

**Introduction.** Currently the surface of the piping elements of the boilers of thermal power plants or the blades of the steam turbines are often damaged by high temperatures and steam pressure. The damage caused by accidents results in the enormous damage to boiler parts. This has a direct impact on all other fields of society and creates a major economic crisis. Any (special) super alloys applied to the parts of the boiler corrode over time under the influence of high temperatures and pressures and lose their physical, mechanical and tribological properties. In order to prevent these shortcomings, in recent years, instead of inventing new materials, scientists have focused on the development of new coating technologies that improve the surface properties of metals and alloys and study the properties of the obtained coatings [1-4]. Coatings are widely used in automotive parts, boiler components, chemical process and medical equipment, aircraft engine elements, surface and offshore turbines, in the shipbuilding industry, etc. [5-7]. Thermal spraying, which is one of the technologies of surface treatment, is a cheap way to improve the surface properties of metal particles, to obtain a thick and high-quality coating. Among the thermal spraying methods are detonation spraying (DS) and high-velocity oxide spraying (HVOS), which allows to obtain a hard, dense and wear-resistant coating with excellent adhesive strength, low porosity and compressive residual stresses [8-12]. At the same time, the initial powder causes minimal oxidation of the material and provides high speed and relatively low temperature [13-15]. The sprayed powder particles adhere to the substrate at a speed of 800-1200 m/s under the influence of detonation waves [16]. The quality of detonation coatings is directly related to the surface roughness of the pavement material (degree of

processing), the chemical composition of the pavement material, the size of the granules, the ratio of gases that cause detonation explosions, impurities. In The problems require further study, as the physical-mechanical, tribological properties and formation of the phase structure of various coatings obtained by detonation and other spraying methods have not yet been fully studied. Therefore, The aim of this work is to study the effect of temperature on the structural, phase and mechanical properties of coatings based on aluminum and zirconium oxides.

*Materials and methods.* Detonation spraying was employed as the method of producing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  coatings. Alumina powder (20-60  $\mu\text{m}$ ) and zirconium powder (20-80  $\mu\text{m}$ ) were used. Spraying was carried out using a CCDS2000 detonation gun with an 800 mm long 20 mm diameter barrel (fig. 1), installed in the Research Centre for Surface Engineering and Tribology, Kazakhstan. The distance between the barrel and the sample was 250 mm. Samples made of titanium-alloyed austenitic stainless steel 12Ch18N10T, corresponding to steel AISI 321, were used as the substrate for coating deposition.



**Figure 1.** Diagram of the detonation spraying unit "CCDS-2000"

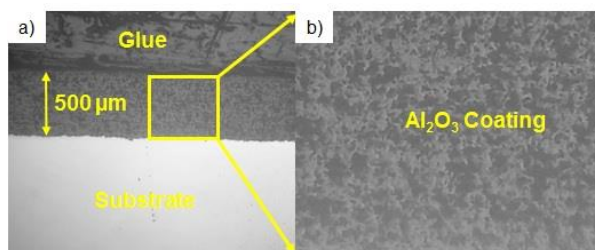
The chemical composition of the tested steel is specified in standard GOST 4986-79 [17]. The steel samples' dimensions were 75x50x5 mm and their roughness was  $Ra = 0.088 \mu\text{m}$ . First the substrates were chemically cleaned for 7-10 minutes. Then the dried substrates were sand-blasted (using Contracor Eco140S, Germany) with electrocorundum with a grain size of about 300  $\mu\text{m}$  to achieve an average roughness of 4.5  $\mu\text{m}$ . When obtaining the aluminum oxide coating, the filling of the shaft with gases ( $\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$ ) was 71%, the filling of the dispenser with powder was 66%, the surface roughness of the obtained coating was 5.10  $\mu\text{m}$ .

Surface morphology, refractive index, and friction pathways were studied using Phenom ProX raster electron microscope (Phenom-World BV, Netherlands). The elemental composition of the coatings was analyzed by characteristic X-ray spectra using an X-ray energy dispersion spectrometer (EDS) located inside a microscope. X-ray diffraction study of coated samples was performed on Xpert PRO diffractometer ( $U = 40\text{kV}$ ,  $I = 30\text{mA}$   $\text{CuK}\alpha$ ) in point scanning mode with a step of  $2\theta = 0.02$  degrees (PANalytical, Netherlands). The hardness of the coatings was measured using a Vickers instrument for measuring microhardness DuraScan-20. The innovative load range from 10 gf to 62 kgf greatly expands the field of use. for each position an average value was obtained, measured 3 times from the coating surface to ensure the accuracy of the experimental data. Anton Paar scratch testers were used to determine the adhesion of the coating, resistance to scratches and damage. The experimental process as follows: the initial load of the indenter is 0.01 N, and it is loaded from 0.01 N to 30 N at the loading rate of 29.99 N/min. The slip speed is 6.79 mm/min and the scratch length is 7 mm. The critical load ( $L_c$ ) was estimated by the acoustic signal. And the critical load referred as the load that the interface between coating and substrate begins to separate. Therefore, for showing the adhesive properties of the

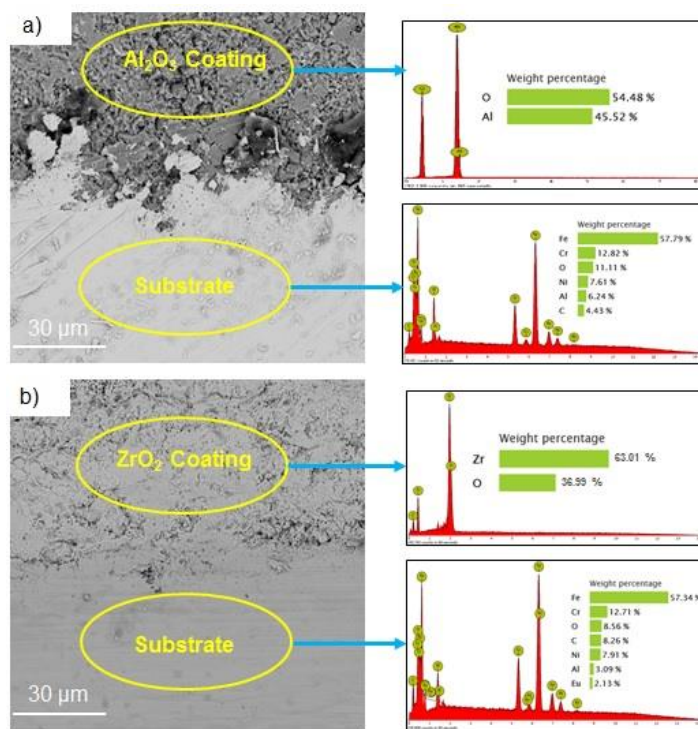


coating more intuitively, the testing instrument of SEM and was used. Tribological tests were performed in the air on a friction machine "Tribometer TRB<sup>3</sup>" (CSM Instruments, Switzerland) by the "ball-disk" scheme. A ball made of 100Cr6 certified material with a diameter of 6.0 mm was used as counterbody. The load was 10 N and the rotational speed is 10 cm/s. Test conditions comply with international ASTM G99-959 and DIN50324 standards. Cross-section roughness of the sample was determined using Profilometer 130. The structure of the trace of the ball on the surface of the coating was studied using Neophot-21 optical microscope.

*Results and discussion.* The surface structure of the cross section of the coating is shown in Figure 2. The study of surface morphology reveals an increase in the thickness of the layer, a decrease in surface roughness, which is characteristic of the detonation method. Point elemental analysis of the cross section of the coatings was performed (Figure 3).



**Figure 2.** Surface structure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings obtained by detonation: a) Cross-sectional structure b) surface structure obtained from the coating



**Figure 3.** SEM image and EDS analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> coating: a) Cross-sectional structure (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); b) surface structure obtained from the coating (ZrO<sub>2</sub>)



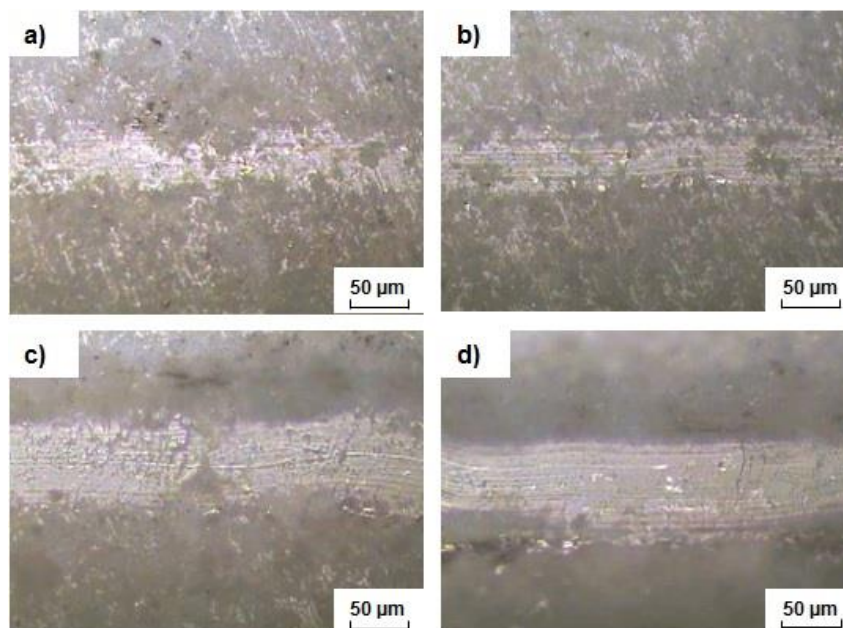
During detonation, the elements of the gas mixture are not on the surface of the coating. It was shown that the elemental composition of the main coating surface is  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and the light strip on the surface contains Fe, Cr, Ni, Al, C, O, according to the results of elemental analysis. The presence of Fe, Cr, Ni comes from the substrate, i.e. the impurities accumulated in the hollows on the surface during polishing of the sample.

[18-21] stated that the powder based on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  has the ability to undergo several modifications under the influence of high temperatures. Also, the composition of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating during thermal spraying is  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\theta$ , and different phases, of which the formation of  $\alpha$  and  $\gamma$  phases is predominant.

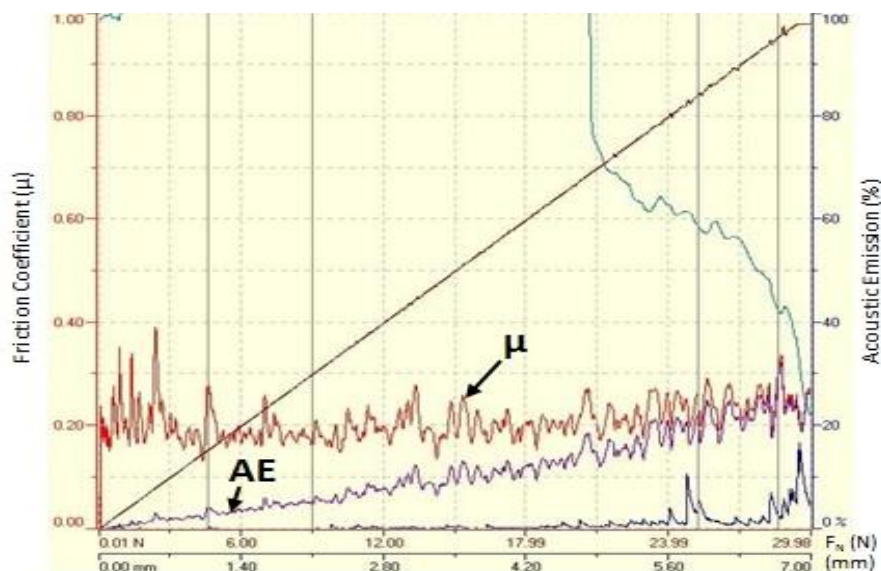
**Table 1.** The result of the adhesive test of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  coatings

Critical load	Coating	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{ZrO}_2$
$L_{C1}$	4.57	11.06
$L_{C2}$	8.98	16.32
$L_{C3}$	25.24	26.28
$L_{C4}$	28.61	29.65

Table 1 shows the results of testing the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  coating for adhesion strength. Adhesion strength refers to the critical load value  $L_C$ , which has a more informative characteristic during abrasion of the sample during testing (Figure 4). Comparison of surface profiles with polished steel discs (substrate) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating deposition, detonation explosion temperature (volume of shaft gas filling), spraying speed, size of alumina powder, distance between the shaft and lining material, etc. leads to an increase in the surface roughness.



**Figure 4.** Microphotograph of the area in contact with the diamond indenter during scratch testing of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating (Fig. 6): a – region 1; b – region 2; c – region 3, d – region 4

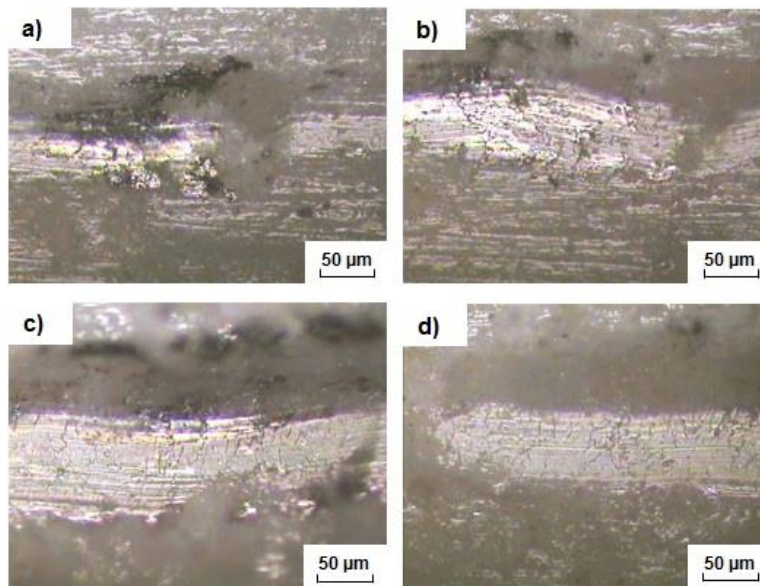


**Figure 5.** Correlation between the coefficient of friction under load and acoustic emission signal used in scratch testing of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating

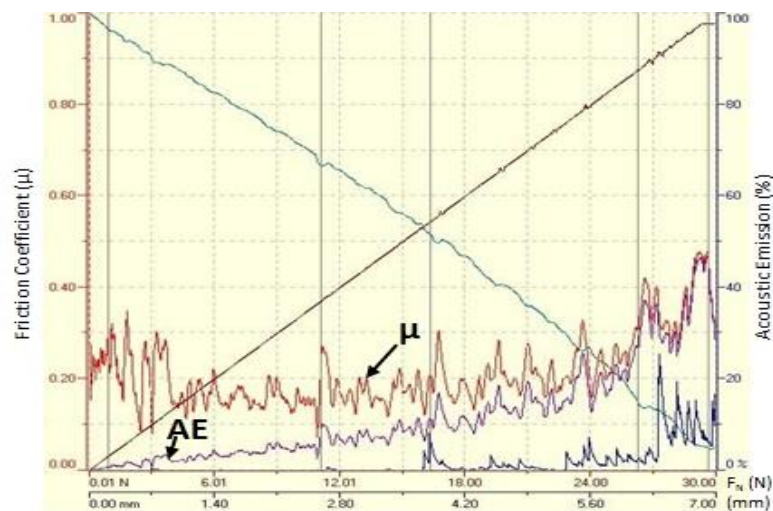
The results of the study of adhesive-cohesive strength and scratch resistance are shown in Figures 5 and 6. Characteristic values of the critical load were determined by the change in the values of the coefficient of friction and acoustic emission signal with increasing scraping load (Fig. 4)  $L_C$ :  $L_{C1}$  - the appearance of the first chevron crack at the bottom;  $L_{C2}$  - the appearance of numerous chevron cracks at the bottom of the cracks and the local peeling of the coating, the appearance of chevron cracks at the bottom of the cracks;  $L_{C3}$  - cohesion-adhesion damage of the coating;  $L_{C4}$  - plastic abrasion coating. For the criterion of adhesive strength, the value of  $L_{C4}$  of the critical load at which the coating is rubbed was adopted.

According to these criteria, the process of destruction of the coating when drawn with an indenter can be divided into four stages. Monotonic penetration of the indenter into the coating in the load range from  $F = 0.70$  N to 4.57 N, with a slight increase in the coefficient of friction, and the acoustic emission signal remains unchanged. At the load of  $F = 8.98$  N, the indenter is completely immersed in the coating, and the diamond indenter with a coefficient of friction of 0.35 slides over the coating. As the load increases ( $F = 25.2$ -28.6 N), the compression of the material in front of the indenter in the form of a bump and the depth of penetration of the indenter increases.

The substrate and the surface of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating after tribological examination were photographed using Neophot-21 optical microscope, the surface of the substrate and the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating with a 6 mm diameter 100Cr6 ball at a speed of 2 cm/s and a vertical force of 10 N. A trace of 4000 revolutions was made on the surface of the sample, and the depth of friction of the trace was determined using "Profilometer 130". The average value of the coefficient of friction of the tribological test on the floor was  $\mu \approx 0.669$ , the depth of the groove was  $h = 8.82$   $\mu\text{m}$ . The average value of the coefficient of friction of the coating coated with alumina powder was  $\mu \approx 0.603$ , the depth of the groove was  $h = 0.44$   $\mu\text{m}$ . In comparison, there is not much difference in the coefficient of friction of the substrate and the coating, but in the depth of the groove the coating is 20 times less abrasive, i.e. the detonation of the coating leads to abrasion (wear).



**Figure 6.** Microphotograph of the area in contact with the diamond indenter during scratch testing of ZrO<sub>2</sub> coating: a - region 1; b - region 2; c - region 3, d - region 4

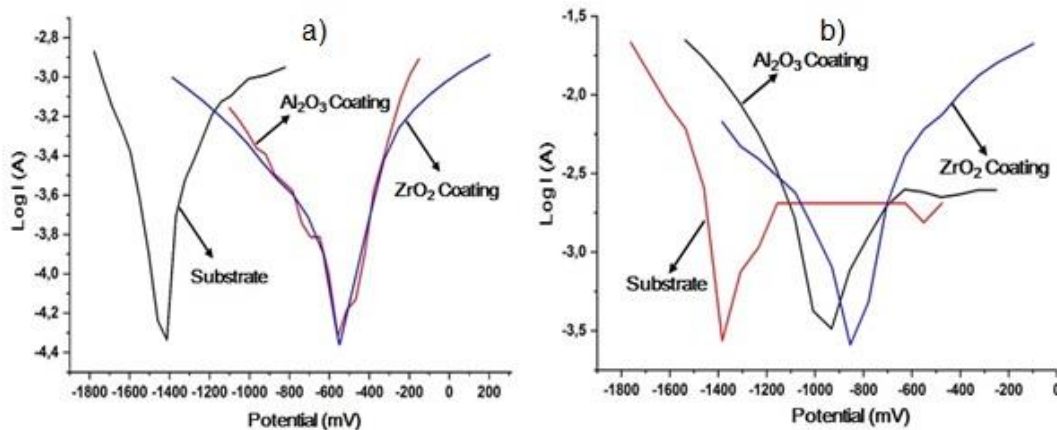


**Figure 7.** Correlation between the coefficient of friction under load and acoustic emission signal used in scratch testing of ZrO<sub>2</sub> coating

**Table 2.** The result of the abrasion and corrosion resistance of the coatings

Sample	Steel 40X	Substrate	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Coating	ZrO <sub>2</sub> Coating
$\Delta W_{[c]}$	0.0308	0.0314	0.0275	0.0266
K	1	0.968	2.189	1.59
$R_{corr}$ (cm/ Year)	-	0.928	0.737	0.586
NaCl acid				
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> acid	-	1.540	0.928	0.147

According to these criteria, the process of destruction of the coating when drawn with an indenter can be divided into four stages (Fig. 6). Monotonic penetration of the indenter into the coating in the load range from  $F = 0.60$  N to 11.06 N, with a slight increase in the coefficient of friction, and the acoustic emission signal remains unchanged. At the load of  $F = 16.32$  N, the indenter is completely immersed in the coating, and the diamond indenter with a coefficient of friction of 0.26 slides over the coating. As the load increases ( $F = 26.2$ -29.6 N), the compression of the material in front of the indenter in the form of a bump and the depth of penetration of the indenter increases (Fig. 7).



**Figure 8.** Relative graph of the corrosion resistance of the substrate material,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  coatings versus potential (E) and current (Log I): a)  $\text{NaCl}$  acid b)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  acid

Figure 8 shows the results of the study of the substrate  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  coatings in  $\text{NaCl}$  acid and 0.5 molar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  acid (Fig. 8, b) in the relative form of the substrate (Fig. 8, a) (Table 2). It was found that the value of the abrasive wear coefficient  $K$  in the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating is more than 2 times higher than in the coating material, and the value of the  $\text{ZrO}_2$  coating is more than 1.5 times, i.e.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  coatings obtained by the detonation method are resistant to abrasive wear. With the help of potentiostat we see that the annual corrosion rate in  $\text{NaCl}$  acid decreased from 0.928 in the substrate  $R_{\text{corr}}$  (cm/year) to 0.737 in the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating and 0.586 in the  $\text{ZrO}_2$  coating.  $\text{ZrO}_2$  in the coating decreased by 0.147, the results of the corrosion study showed that the coatings are quite resistant to acid. It was found that the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating is 1.5 times more resistant to corrosion than the substrate, and the  $\text{ZrO}_2$  coating is about 10 times more resistant to corrosion.

**Conclusions.** Thus, the obtained theoretical and experimental results of the study are a new step in solving the problem of creating protective coatings based on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$ , structural and phase characteristics of which allow to increase the durability of various critical parts operating at high temperatures, loads, pressures and aggressive environments.

1. The mechanical and tribological properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder were significantly increased by spraying  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder on the substrate using CCDS-2000. X-ray phase analysis of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder consisted of R-3c hexagonal  $\alpha$ -lattice, and semi- $\gamma$ -phase lattices were formed after detonation spraying.

2. The result of scratch testing of the coating was determined by the relationship between the coefficient of friction and the acoustic emission signal, and for the criterion of adhesion strength was determined  $L_{C4}$  value of the critical load at which the coating is rubbed.

3. It was found that the value of the abrasive wear coefficient  $K$  in the  $Al_2O_3$  coating is more than 2 times, the value of the  $ZrO_2$  coating is more than 1.5 times, that is, the abrasive wear resistance of  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2$  coatings obtained by detonation method.

4. The annual corrosion rate in  $NaCl$  acid decreased from 0.928 in the  $Al_2O_3$  coating to 0.737 in the  $Al_2O_3$  coating and from 0.586 in the  $ZrO_2$  coating in the  $R_{corr}$  (cm/year) substrate, the annual corrosion rate in the  $H_2SO_4$  acid from  $R_{corr}$  in the substrate from 1.540 to 0.9. It was found that the  $Al_2O_3$  coating is 1.5 times more resistant to corrosion than the substrate, and the  $ZrO_2$  coating is about 10 times more resistant to corrosion.

*Acknowledgements.* This research was carried out as part of state research project BR05236748 funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

#### References

1. High temperature oxidation studies of cold sprayed Ni-20Cr and Ni-50Cr coatings on SAE 213-T22 boiler steel / N. Bala, H. Singh, S. Prakash // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 255. – P. 6862-6869.
2. Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WCCoCr prepared by laser heat treatment and HVOF / Z. Shi-Hong, Y. Jae-Hong, W. Fang, S. Ki-O, L. Ming-Xi, J. Yun-Kon, C. Lee // *Mater. charact.* – 2008. – 59. – P. 1412-1418.
3. Evaluation of Hot Corrosion Behaviour of HVOF Sprayed NiCrAl Coating on Superalloys at 900°C / R.A. Mahesh, R. Jayaganthan, S. Prakash // *Mater. Chem. Phys.* – 2008. – Vol. 111. – P. 524- 533.
4. Materials for ultrasupercritical coal-fired power plant boilers / R. Viswanathan, K. Coleman, U. Rao // *Int J Pressure Vessels Piping.* – 2006. – Vol. 83. – P. 778-83.
5. High performance thermal-sprayed WC-10Co-4Cr coatings in narrow and complex areas / R. Upadhyay, S. Tailor, S. Shrivastava, S.C. Modi // *Surf. Eng.* – 2018. – Vol. 34. – P. 412–421.
6. Measuring mechanical properties of plasma-sprayed alumina coatings by nanoindentation technique / B. Dhakar, S. Chatterjee, K. Sabiruddin // *Mater. Sci. Technol.* – 2017. – Vol. 33. – P. 285-293.
7. Performance of plasma sprayed Nanostructured and Conventional Coatings / C. Vikas, S.B. Singh, D. Puri, S. Prakash // *Journal of the Australian Ceramic Society.* – 2008. – Vol. 44. – P. 56-62.
8. Microstructure and wear properties of  $Al_2O_3$  -  $CeO_2$  /Ni- base alloy composite coatings on aluminium alloys by plasma spray / L. He, Y. Tan, X. Wang, T. Xu, X. Hong // *Appl. Surf. Sci.* – 2014. – Vol. 314. – P. 760-767.
9. Influence of detonation gun sprayed alumina coating on AA 6063 samples under cyclic loading with and without fretting / B. Rajasekaran, S. Sundara Raman Ganesh, S.V. Joshi, G. Sundararajan // *Tribology International.* – 2008. – Vol. 41. – P. 315-322.
10. Surface Engineering and Detonation Gun Spray Coating / G. Rakesh, S.B. Singh, J.S. Grewal // *International Journal of Engineering Studies.* – 2010. – Vol. 2. – P. 351-357.
11. Effect of heat treatment of the alumina powder on the microstructure and properties of coatings // P. Mayya, K. Marina, A. Marii, Y. Maxim, N. Vseslav, S. Vyacheslav, T. Yurii, K. Oleg, V. Nikolay / 2015 the 4<sup>th</sup> International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2015), 30, 01003, DOI: 10.1051/mateconf/20153001003.
12. Application detonation coatings to design a new metal cutting tool / A.A. Gallyamov, M.V. Nenashev, I.D. Ibatullin, A.Y. Murzin // *Trans. Inst. Met. Finish.* – 2018. – Vol. 96. – P. 290-294.
13. Effect of  $TiO_2$  addition on the microstructure and nanomechanical properties of  $Al_2O_3$  suspension plasma sprayed coatings / E. Bannier, M. Vincent, E. Rayon, R. Benavente, M.D. Salvador, E. Sanchez // *Appl. Surf. Sci.* – 2014. – Vol. 316. – P. 141–146.
14. Plasma-sprayed alumina coating on Inconel 600 for fast reactor neutron detector application / A. R. Shankar, K. Thyagrajan, C. Upadhyay, C. Mallika, U. Kamachi Mudali // *Surf. Eng.* – 2018. – Vol. 34. – P. 721-727.
15. Detonation spraying of Ti-Al Intermetallics: phase and micro-structure developments of the coatings / D.V. Dudina, I.S. Batraev, V.Y. Ulianitsky, N.V. Bulina, M.A. Korchagin, O.I. Lomovsky // *Mater. Manuf. Process.* – 2015. – Vol. – P. 724-729.
16. Evaluation of Hot Corrosion Behaviour of HVOF Sprayed NiCrAl Coating on Superalloys at 900°C / R.A. Mahesh, R. Jayaganthan, S. Prakash // *Mater. Chem. Phys.* – 2008. – 111. – P. 524- 533.
17. GOST 4986-79, Cold-rolled band from corrosion-resistant and heat-resistant steel, USSR State Committee for Standards, 1979.



18. Thermal spray coatings in renewable energy applications / S.Wijewardane // Types, Designs, Manufacture and Applications. – 2015. – P. 241-257.
19. Interaction between nitrogen plasma and tungsten / T. Tulenbergenov, Skakov, A. Kolodeshnikov, V. Zuev, B. Rakhadilov, I. Sokolov, D. Ganovichev, A. Miniyazov, O. Bukina // Nuclear Materials and Energy. – 2017. – Vol. 13. – P. 63-67
20. Influence of temperature on structural-phase changes and physical properties of ceramics on the basis of aluminum oxide and silicon / N. Kantay, N. Kasmamyrov, B. Rakhadilov, S. Plotnikov, M. Paszkowski, Sh. Kurbanbekov // Materials Testing. – 2020. – Vol. 62. – P. 716–720
21. Method of Electrolyte-Plasma Surface Hardening of 65G and 20GL Low-Alloy Steels Samples // B. Rakhadilov, L. Zhurerova, A. Pavlov / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, – 2016. – Vol. 142(1). – P. 012028.

ЕҢБЕКТИ ҚОРҒАУ  
ОХРАНА ТРУДА  
WORK SAFETY

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_54  
MFTAA 86.21

**Б.К. Макашев, Н.Р. Жолмагамбетов, М.М. Едіге, А.Е. Орынбек, А.Т. Махаббатова**  
Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ.  
E-mail: muratovich98@bk.ru

**ЖҰМЫС АЙМАҒЫНЫҢ ШАҢДАНУЫН ТӨМЕНДЕТУ ЖӨНІНДЕГІ ІС-ШАРАЛАР  
МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ЗАПЫЛЕННОСТИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ  
MEASURES TO REDUCE THE DUST CONTENT OF THE WORKING AREA**

**Аңдатпа.** Бұл жұмыста өндірістік ортаның шаңдануы, микроклимат параметрлері, газдану және оны азайту шаралары бойынша өндірістік кеңістіктердің жұмыс аймағының жайлылығын бағалаудың әртүрлі әдістері қарастырылған. Мақалада шпулярниктерден талшықты шаңды кетіруге арналған пневматикалық құрылғы, ауа ағынын тегістейтін құрылғы, түту машинасында дақтарды жинауға және кетіруге арналған пневматикалық құрылғылар көрсетілген.

**Түйін сөздер:** өндірістік орта, жұмыс аймағы, шаңдану, газдану, жайлылық.

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены различные способы оценки комфортности рабочей зоны производственных помещений по запыленности производственной среды, по параметрам микроклимата, по загазованности и мероприятия по ее снижению. В статье представлены пневматическое устройство для удаления волокнистой пыли со шпулярников, устройство для выравнивания воздушного потока, пневматическое устройство для сбора и удаления угаров на чесальной машине.

**Ключевые слова:** производственная среда, рабочая зона, запыленность, загазованность, комфортность.

**Abstract.** In this article, the various ways to assess comfort of working zone of industrial premises for dust production environment, the microclimate parameters on gas content and activities for its reduction. The article presents a pneumatic device for removing fibrous dust from the bobbins, a device for leveling the air flow, a pneumatic device for collecting and removing carbon monoxide on a carding machine.

**Keywords:** production environment, working area, dustiness, gas pollution, comfort.

Өндірістегі көптеген технологиялық процестер шаңның, сондай-ақ булар, газдар түріндегі зиянды заттардың (топырақты өңдеу, тұқымдарды дәрілеу; өсімдіктерді химиялық қорғау, астықты ұнтақтау, жемшөп дайындау, жануарларға күтім жасау және т.б.) едәуір бөлінуімен қатар жүреді.

Шаң – ауада тоқтатылған күйде болуы мүмкін қатты заттардың ең кішкентай бөлшектері.

Органикалық шаң (өсімдік шаңы – ағаш, зығыр және т.б., сондай-ақ жануарлар – жүн және т.б.), бейорганикалық (металдық, минералдық) және аралас болады. Шаң адам ағзасына улы, тітіркендіргіш және фиброгенді әсер етуі мүмкін. Кейбір заттар мен материалдардың шаңы (шыны талшық, әк және басқалары) жоғарғы тыныс жолдарына, көздің шырышты қабығына, теріге тітіркендіргіш әсер етеді. Улы заттардың шаңы (қорғасын, хром және т.б.) өкпе арқылы адам ағзасына еніп, физикалық, химиялық және физикалық-химиялық қасиеттеріне байланысты оларға тән улы әсерге ие [1]. Фиброген – бұл шаңның әрекеті, онда өкпеде дәнекер тінінің өсуі, ағзаның қалыпты құрылымы мен функцияларын бұзады.

Шаңның зиянды әсері көбінесе дисперсиямен (шаң бөлшектерінің мөлшерімен), бөлшектердің пішінімен, қаттылығымен, талшықтығымен, электр өткізгіштігімен, ерігіштігімен және басқаларымен анықталады [1-2].

Адам ағзасының зақымдану дәрежесіне шешуші әсер шаңның концентрациясы және оның әсер ету ұзақтығы болып табылады.

Өндірістік шаңның зияндылығы оның өкпенің кәсіби ауруларын, ең алдымен пневмокониозды тудыруы мүмкін. Пневмокониоздың ең көп таралған және ауыр түрі – кремний диоксиді қоспалары бар шаңды ингаляциялау нәтижесінде пайда болатын силикоз (өкпенің шаң фиброзы). Мұндай ауруларға асбестоз, талькоз, цементоз және т.б. жатады, сонымен қатар пневмокониоздың металлокониоз, мақта, астық және т.б. түрлері бар. Тітіркендіргіш әсері бар өндірістік шаң, кәсіби шаң бронхит, пневмония, астматикалық ринит, бронх демікпесін тудыруы мүмкін, ағзаның қорғаныш қасиеттерін төмендетуі мүмкін. Металл аэрозольдері, пестицидтердің шаңы осы улы затқа тән созылмалы және өткір улануға әкелуі мүмкін [2].

Осыған байланысты ауадағы зиянды заттарды уақтылы анықтау және олардан қорғау қауіпсіз еңбек жағдайларын қамтамасыз ету үшін үлкен маңызға ие.

Ол үшін жұмыс аймағының ауасындағы зиянды заттардың мөлшері белгіленген шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК) аспауы тиіс.

Жұмыс аймағының ауасындағы зиянды заттардың шекті рұқсат етілген концентрациясы (ШРК) деп барлық жұмыс уақыты кезінде 8 сағат ішінде немесе басқа ұзақтықта (бірақ аптасына 40 сағаттан артық емес) күнделікті (демалыс күндерінен басқа) жұмыс істеу кезінде жұмыс процесінде немесе қазіргі және кейінгі ұрпақтардың ұзақ өмір сүру мерзімінде денсаулық жағдайында аурулар немесе ауытқулар туғыза алмайтын (зерттеудің қазіргі заманғы әдістерімен анықталатын) концентрация түсініледі.

Адам ағзасына әсер ету дәрежесі бойынша зиянды заттар ГОСТ 12.1.007-76 сәйкес қауіптіліктің 4 класына бөлінеді:

- 1 – өте қауіпті заттар (ШРК  $< 0,1 \text{ мг/м}^3$ );
- 2 – жоғары қауіпті заттар (ШРК  $0,1 \dots 1,0 \text{ мг/м}^3$ );
- 3 – орташа қауіпті заттар (ШРК  $1,1$ -ден  $10 \text{ мг/м}^3$  дейін);
- 4 – қауіптілігі төмен заттар (ШРК  $10,0 \text{ мг/м}^3$  астам).

Қауіптіліктің 1-класының зиянды заттары үшін бақылау ШРК-ның асу сигналын беретін өздігінен жазатын автоматты аспаптардың көмегімен үздіксіз жүзеге асырылады.

Қауіптіліктің 2, 3 және 4-кластарындағы зиянды заттардың концентрациясы мезгіл-мезгіл анықталады [3].

Жұмыс аймағындағы ауа тазалығының гигиеналық сипаттамасында ондағы шаңның сандық және сапалық сипаттамаларын анықтау маңызды. Бұл ретте шаңның мөлшерін ( $\text{мг/м}^3$ ) және оның физикалық-химиялық қасиеттерін (морфологиялық құрылысы, химиялық құрамы, электрлік жай-күйі) ескеру қажет.

Жұмыс аймағының жайлылығын оның шаңдану параметрлері бойынша бағалауды қарастырайық [4].

Жұмыс аймағының шаңдануын бағалау тәсілі ауа көлемінің белгілі бір сүзгісіне аэродисперсті қоспаларды мәжбүрлеп тұндырудан тұрады, ол үшін алдымен таза сүзгі массасын анықтау үшін аппаратураны дайындайды және ретке келтіреді, содан кейін таза сүзгіні таразыда (аналитикалық немесе электрондық) өлшейді, содан кейін өндірістік үй-жайдың жұмыс аймағында шаң аэрозолын мәжбүрлеп тұндыруға арналған қондырғыны баптайды, содан кейін шаң бөлшектерін сүзгіге ұстап ауа сынамасын іріктеп алады, сүзгі ұсталған шаң бөлшектерімен өлшенеді және текше метрге миллиграмм шаң аэрозолының концентрациясын есептейді, содан кейін алынған концентрацияны рұқсат етілген шамамен салыстыра отырып, жұмыс аймағының ауасының тозаңдануын бағалайды (1-кесте).

**1-кесте.** Жұмыс аймағының ауасының шаңдануы

Зат	ШРК, мг/м <sup>3</sup>	Қауіптілік класы
Азот оксидтері	5	3
Аммиак	20	4
Ацетон	200	4
Бензин	100	4
Бензол	10	2
Керосин	300	4
Күкірт қышқылы	1	2
Тұз қышқылы	5	3
Ксилол	50	4
Күкіртті антигрид	10	3
Күкіртеутегі	10	3
Көміртегі оксиді	20	4
Хлор	1	2
Этиль эфиірі	0,15	2
Толуол	30	4
Өсімдік және жануар текті шаң:		
а) астық	4	3
б) ұн, ағаш, және т.б.	6	3
в) тінді, мақта-мата, мақта, зығыр, жүн, мамық	2	3
г) кремний диоксиді қоспасы 2-ден 10 пайызға дейін	4	3

Ауа шаңын зерттеудің қолданыстағы әдістері екі негізгі топқа бөлінеді:

1. Дисперсті ортадан (ауадан) дисперсті фазаның (шаңның) бөлінуіне негізделген әдістер, тұндыру және аспирация, салмақ және есептеу.

2. Дисперсті фазаны бөлусіз әдістер: оптикалық, фотометриялық, электрометриялық.

Сандық тозаңды ауа көлемінің бірлігіндегі шаңның массасы (мг) бойынша (мг/м<sup>3</sup>) – салмақтық әдіс және тозаң саны бойынша (1 см<sup>3</sup>) – есептеу әдісі бойынша анықтауға болады. Сонымен қатар, шаңның концентрациясы мен оның дисперсті құрамын зерттеу үшін фотометриялық және радиометриялық әдістер қолданылады.

Ауа сынамаларын алу аспирациялық (аспираторлар, сынама алғыштар) немесе белгілі бір бетіндегі шаң жиналуына негізделген седиментациялық тәсілмен (кәдімгі жабысқақ) табиғи шөгу жолымен

Сынамаларды іріктеу өзіне тән өндірістік жағдайларда тыныс алу аймағында жүргізілуі тиіс.



Салмақ әдісі. Өндірістік кеңістіктің жұмыс аймағындағы ауаның шаңын бағалаудың негізгі және гигиеналық негізделген әдісі шаңның дисперсиялық сипаттамасымен үйлескен салмақ әдісі болып табылады. Бұл әдіс қолданыстағы санитарлық нормалардың негізі ретінде стандартты болып табылады және сүзгі арқылы алынған ауаның белгілі бір мөлшерін тарту арқылы алынған шаңның массасын анықтауға негізделген, содан кейін ауаның текше метріне жатады. Тозанды өлшеу әдісі бойынша зерттеу нәтижелерін бағалау оларды ауадағы шаңның ШРК нормаларының талаптарымен салыстыру арқылы жүргізіледі.

Есеп әдісі. Ауаның шаңын анықтаудың бұл әдісі ауадағы шаң мөлшерін сандық бағалаумен қатар, оның дисперсиясы туралы мәліметтер алуға мүмкіндік береді. Бұл әдіспен шаң есептегіштердің көмегімен слайдтың бетіне шаң жиналады. Ауаның шаңдану дәрежесін ауаның  $1 \text{ см}^3$  шаң бөлшектерінің саны бойынша анықтайды. Ауаның  $1 \text{ см}^3$  шаң бөлшектерінің саны әйнектің бүкіл аймағында микроскоппен есептелген шаң бөлшектерінің санын осы шаң бөлшектері орналасқан ауа көлеміне бөлу арқылы анықталады [1-2].

Фотометриялық әдіс. Жұмыс принципі тоздандырылған ауа арқылы өтетін жарық ағынының қарқындылығын фотометриялық әдіспен өлшеуге негізделген фотополимерлердің, аспаптардың көмегімен ауадағы шаңның концентрациясын оңай және тез анықтайды. Бұл әдіс өлшеу дәлдігінде салмақ әдісінен едәуір төмен.

Радиометриялық әдіс. Радиометриялық құрылғылардың жұмыс принципі сүзгіден алынған сынаманың альфа сәулеленуінің сіңу дәрежесін анықтауға негізделген. Бірақ өлшеу қателігі 30 пайызды құрайды.

Кәсіпорындардың шаңды цехтарында ауа ортасының жай-күйін анықтау үшін жұмыс орындарындағы ауаның тоздандыруына мезгіл-мезгіл талдау жүргізу қажет. Егер осының нәтижесінде шаңның нақты концентрациясы ШРК-дан асатыны анықталса, онда жұмыс орындарында қалыпты еңбек жағдайларын жасау үшін бірқатар технологиялық, техникалық және санитарлық-гигиеналық шаралар өткізіледі [3].

Ауадағы шаңның құрамын анықтауға арналған салмақ және есептеу әдістері бір-бірін жоққа шығармайды. Керісінше, шаңды күрделі өндірістік жағдайда мұқият зерттеу үшін екі әдіс те зерттеледі, өйткені ауаның  $1 \text{ м}^3$  миллиграммында көрсетілген шаңның концентрациясы ғана емес, сонымен қатар дисперсия дәрежесі де үлкен мәнге ие.

Жұмыс аймағының жайлылығын оның газдану параметрлері бойынша бағалауды қарастырайық. Жұмыс аймағының газдануын бағалау тәсілі жұмыс аймағының ауасындағы зиянды заттардың концентрациясын индикаторлық шыны түтігі бар әмбебап газ талдағыштың көмегімен анықтаудан тұрады, оған сәйкес индикаторлық ұнтақ құйылады, ол өз түсін түтіктің белгілі бір ұзындығына өзгертеді, ал боялған ұнтақ қабатының ұзындығы ауадағы зиянды заттың мөлшеріне пропорционалды, индикатор түтігі арқылы созылады; содан кейін алынған концентрацияны рұқсат етілген мәнмен салыстыра отырып, жұмыс аймағының ауасының газдануы бағаланады [4].

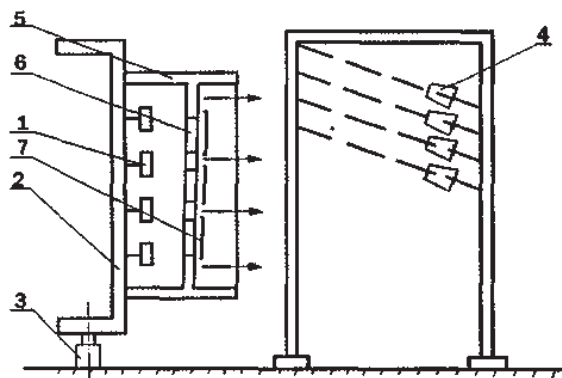
Жұмыс орындарының шаңын азайту шараларын қарастырайық. Тоқыма өнеркәсібінің маңызды мәселесі – қалдықтарды тазарту және жою.

Бұл ретте жұмыс аймағының ауасын бір мезгілде шаңсыздандыру арқылы қалдықтарды ұстау мен өңдеуді қамтамасыз ету талап етіледі.

Тоқыма жабдықтарының шпулярниктерінен талшықты шаңды кетіру сапасын жақсарту үшін пневматикалық құрылғы жасалды, ол жоғарыда аталған зиянды заттарды шпулярниктің биіктігі бойынша біркелкі жергілікті ауа беру арқылы алып тастайды, оларды сору жүйелері арқылы кәдеге жарату бункерлеріне тасымалдайды және кейіннен ауаны тазартады (1-сурет) [5].

Пневматикалық құрылғы 1 желдеткіштерден тұрады, олар бекітілген және жалпы тірекке 2-ден 3-дискімен 4-орамалар бойымен қозғалады.

Ауа ағынын теңестіру әртүрлі жолдармен жүзеге асырылуы мүмкін. Мысалы, желдеткіштердің алдында тірекке бекітілген және көлденең осьтерге қатысты айналатын ойысы бар доңғалақтарды орнатыңыз.



**1-сурет.** Пневматикалық талшықты шаңды шпулярниктерден шығаратын құрылғы:  
1 – желдеткіштер; 2 – жалпы қолдау; 3 – жетек; 4 – орамалар; 5 – тесілген қорап;  
6 – тесіктер; 7 – экрандар

Желдеткіштердің осьтері мен доңғалақтардың осьтері өзара перпендикуляр. Көрші доңғалақтардың иық пышақтары қарама-қарсы жақтарға қарама-қарсы бағытта ауа ағынына қарама-қарсы бағытталған, нәтижесінде шыбықтың биіктігі бойынша ағындардың жылдамдығы тегістеледі.

Тіректі қаптамалар бойымен жылжытқан кезде желдеткіштерден ауа доңғалақтар арқылы қаптамадан шаң мен мамықты кетіреді. Ауа ағынының әсерінен доңғалақтар бұрыла бастайды және желдеткіш осінен ауаның бір бөлігін ойысқан беттерімен бұра бастайды, осылайша ауа ағынын шұңқырдың биіктігіне теңестіреді.

Мұның бәрі үрлеу аймағын арттырады, шаңды мақсатты түрде кетіруді қамтамасыз етеді және сәйкесінше жұмыс және технологиялық аймақтардағы қоршаған ауаның ластануына жол бермейді. Пневматикалық құрылғының жалпы тірегінде реттелетін айналу жиілігі бар электр қозғалтқыштары түрінде реттелетін жетек болуы мүмкін. Қанатшалардың көлденең осьтері тірекке орнатылған және тік жазықтықта қанатшалардың осьтерімен бірге бұрыштық қозғалыс жасауға мүмкіндігі бар аспалардың саңылауларында жұмыс жағдайында бекітіледі. Реттелетін жетек тіректің қажетті айналу жылдамдығын және тиісінше, шыбықтың үрлеу дәрежесін қамтамасыз етеді, осылайша құрылғының тиімділігін арттырады [6].

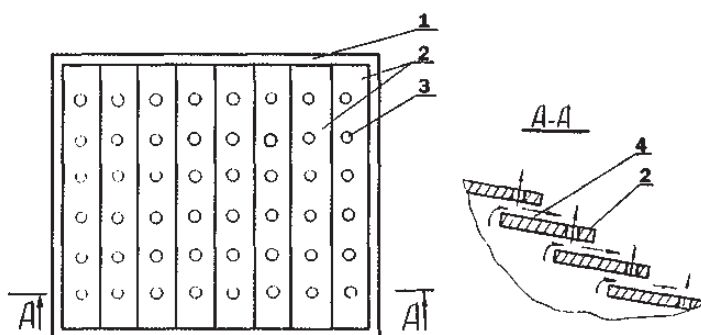
Суспензиялардың бұрыштық қозғалысы, тік жазықтықтағы доңғалақтардың осьтерімен бірге, ағынды ағындағы доңғалақтың бұрыштық орналасуын өзгертуге болады, бұл шыбықтардың үрлеу дәрежесін реттеуге мүмкіндік береді. Суспензияға қатысты доңғалақ осінің саңылауларындағы бойлық қозғалыс арқылы сіз ағындағы доңғалақтың орнын реттей аласыз және жұмыс аймағынан зиянды заттарды кетірудің тиімділігін арттыра аласыз.

Әрбір редуктор тиісті суспензияға орнатылған және белгілі бір позицияда қозғалуға және бекітуге мүмкіндігі бар реттелетін айналу жиілігі бар электр жетегіне қосылған. Электр қозғалтқышының шығыс білігі доңғалақ осіне параллель орналасқан. Дизайнды жеңілдету үшін желдеткіштердің алдында орналасқан ауа ағынын теңестіру құрылғысы 5 тірегіне орнатылған және барлық желдеткіштерді қамтитын тесілген қорап түрінде жаса-

луы мүмкін. Қораптың сыртқы жағында 6 тесіктері бар және тіректер арқылы бекітілген 7 экрандар бір-біріне қатысты саңылаулармен орналастырылған. Қорапта оның периметрі бойынша оның сыртқы жағына перпендикуляр орналасқан шағылысатын күнқағарлар болады.

Қарама-қарсы ауа ағындары оппозициялық саңылаулардан шығып, соқтығысады, турбулентті қозғалысты құрайды, соқтығысқан кезде олар жылдамдығын төмендетеді және жылдамдық өрістерін тегістейді. Шағылыстырғыш күнқағарлар ағып жатқан ағынды шпулярник бағытында орталықтандыруға мүмкіндік береді [7].

Дизайнды одан әрі жеңілдету үшін ауа ағынын туралау құрылғысын шыбықтардың астында орналасқан 1 тікбұрышты түтік түрінде жасауға болады. Түтік бойлық параллель саңылаулар түрінде 3 саңылаулары бар 2 тарату бетімен жабдықталған. Саңылаулар аймағында түтіктің ішінде бойлық тақталар 4 орналасқан (2-сурет).



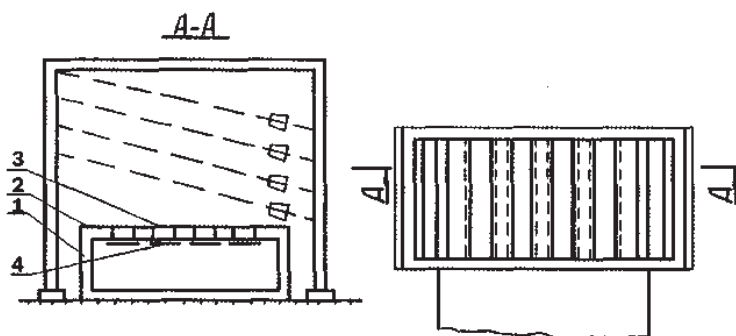
**2-сурет.** Ауа ағынын теңестіру құрылғысы:

1 – тікбұрышты түтік; 2 – тарату беті; 3 – саңылаулар; 4 – бойлық плиталар

Мұндай құрылғы неғұрлым ықшам, бұл оның пайдалану қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді.

Ұсынылған пневматикалық құрылғылар шаңды желдетудің бір бөлігі ретінде тиімді.

Түту машинасында улы заттарды жинау және жою үшін пневматикалық құрылғы ұсынылады, ол 1 – табаннан, 2 – пластинадан тұрады, бір-бірінен бөлек-бөлек және олардың қабаттасу аймағында 3 перфорациямен жабдықталған. 2 плиталарының арасында ауаны беру үшін 4 саңылаулары бар (3-сурет) [8].



**3-сурет.** Түту машинасында улы заттарды жинауға және жоюға арналған пневматикалық құрылғы: 1 – табандық; 2 – табанға төбесімен орнатылған пластиналар; 3 – қабаттасу аймағында перфорация; 4-ауаны беру үшін саңылаулар

Су бүрку жүйелері ауа шаңын басатын ең көп қолданылатын жүйелердің бірі болып табылады, алайда бұл жүйелер көбінесе нашар болғандықтан құрылғы зардап шегетін жүйелер санатына жатады, бұл төмен түсіру тиімділігіне және техникалық қызмет көрсетудің болмауына әкеліп соғады, бұл төмен түсіру тиімділігін арттырады (4-сурет).



**4-сурет.** Жалпы өнеркәсіптік бүрку жүйесі

Су бүрку жүйелерін қолдана отырып, ауа шаңын алу механизмдері жүйеде саптаманы пайдалану кезінде пайда болатын су тамшыларының мөлшеріне және қолдану кезінде көрінетін шаңның қасиеттеріне байланысты. Шаң бөлшегін су бүрку жүйесі ұстап алады, ол су тамшысымен байланысқа түседі, бұл ылғалдың салмағының жоғарылауына байланысты немесе ол басқа шаң бөлшектерімен агломерацияланғандықтан, салмақты арттырады және оны жерге түсіреді. Сондықтан шаң бөлшектерінің су тамшысымен соқтығысу ықтималдығын барынша арттыру су тозаңдану шаңын басу жүйесінің тиімділігін арттырудың маңызды аспектілерінің бірі болып табылады. Осыған байланысты бұл факторға ауа ағындары әсер етеді, олар ауа арқылы қозғалу кезінде су тамшыларын ағып кетеді. Егер тамшының диаметрі шаң бөлшектерінің диаметрінен әлдеқайда үлкен болса, онда шаң бөлшектері тамшыға тиіп кетудің орнына су тамшысының айналасындағы ауа ағындарына көбірек ұшырайтыны анықталды [9-10].

Осылайша, жұмыс аймағының жайлылығын үш көрсеткіш бойынша кешенді бағалауды жүзеге асыра отырып: микроклимат параметрлері бойынша жұмыс аймағының жайлылығын бағалау; жұмыс аймағының ауа ортасының шаңдану параметрлері бойынша; жұмыс аймағының газдануы бойынша белгілі бір жұмыс орнын тексеру кезінде орын алатын ең маңызды зиянды факторларды ескере отырып, қорғаныс құралдарын (жеке – ЖҚК, сондай-ақ ұжымдық – ЖҚК ) қолдану стратегиясын әзірлеуге болады, мысалы, жалпы цех бойынша ауаны баптау жүйесін (ЖҚК) енгізу арқылы жеке тозаңданған немесе газдалған учаскелерде тыныс алу органдарын жеке қорғау құралдарын (ТОЖҚК) пайдалану арқылы шешіледі.

Қорытындылай келе, жұмыс аймағына бөлініп шығатын шаң бөлшектері, адам денсаулығына қауіпті және зиянды болып есептелгендіктен, оларды алдын алу шараларын ұйымдастырып отыру керек. Жоғарыда айтып кеткендей, талшықты шаңды шпуклярниктерден шығаратын пневматикалық құрылғыны, жұмыс аймағында құрамында шаң бөлшектері бар ауа ағынын теңестіретін құрылғыны және түту машинасында улы заттарды жинауға және жоюға арналған құрылғыларды пайдалана отырып жұмыс кеңістігінде таралатын ауаның құрамындағы шаң мөлшерін азайтуға қол жеткізуге болады.

## Әдебиеттер тізімі

1. Шашкин Б.Ф. Учебно-методическое пособие «Определение запыленности воздуха производственных помещений весовым методом» / Б.Ф. Шашкин, И.Д. Брус, Н.С. Тураев. – Томск: ТПУ, 1999. – 4 с.
2. Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. и др. Безопасность жизнедеятельности. – М.: Высш. школа, 1999. – 448 с.
3. Макаров Г.В., Васин А.Я., Маринина Л.К., Софинский П.И., Старобинский В.А., Торопов Н.И. Охрана труда в химической промышленности. – М.: Химия. 1989. – С. 61-52 б.
4. Гетия С.И., Кочетов О.С., Стареева М.О. Социально-экономическая оценка мероприятий по охране труда // Вестник МГУПИ», серия «Социально-экономические науки». – М.: МГУПИ, 2012. – № 39. – С. 131-140.
5. Кочетов О.С. Лабораторный практикум по производственной санитарии: учебное пособие для вузов. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2004. – 168 с.
6. Пат. 2420732 Российская Федерация. Газоанализатор / Кочетов О.С.; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16.
7. Пат. 2422802 Российская Федерация. Способ оценки запыленности воздуха рабочей зоны / Кочетов О.С.; опубл. 10.06.2011, Бюл. №18.
8. Пат. 2442934 Российская Федерация. Способ оценки комфортности рабочей зоны по параметрам микроклимата / Кочетов О.С.; опубл. 20.02.2012, Бюл. №15.
9. NIE Wen, CHENG Weimin, YU Yanbin, et al. The research and application on whole-rock mechanized excavation face of pressure ventilation air curtain closed dust collector system [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 37(7): 1166-1170.
10. J. Brahm, "Airborne Particulates: Dealing with Dust," Filtration+Separation. – Vol. 49. – 2017. – No. 4. – P. 32-33.

ФИЗИКА  
ФИЗИКА  
PHYSICS

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_61

MFTAA 29.19

**С.А. Пазылбек<sup>1</sup>, И. Кудрявцева<sup>2</sup>, А.А. Джакишев<sup>3</sup>, М. Дүйсехан<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік педагогикалық университеті, Шымкент қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Тарту университеті, Физика институты, Тарту қ., Эстония

<sup>3</sup>Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*E-mail: pazylbek.sapargali@yandex.kz*

**CaSO<sub>4</sub>:RE<sup>3+</sup> ФОСФОРЫН РЕНТГЕНДІК СӘЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕ ЖАҢА ҚҰРЫЛЫМДЫҚ  
АҚАУЛАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ**

**СОЗДАНИЕ НОВЫХ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ РЕНТГЕНОВСКОМ  
ОБЛУЧЕНИИ ФОСФОРА CaSO<sub>4</sub>**

**CREATION OF NEW STRUCTURAL DEFECTS DURING X-RAY IRRADIATION  
OF CaSO<sub>4</sub> PHOSPHORUS**

**Аңдатпа.** Рентген сәулеленуінің үлкен дозаларында максимумы 710 К болатын жоғары температуралы ТЫЛ шыңы жаңа радиациялық ақаулардың пайда болуымен байланысты. Бұл жаңа ақаулардың пайда болуы CaSO<sub>4</sub> өткізгіштік зонасының арнайы құрылымы ықпал етеді, мұнда әдетте көптеген материалдар үшін болатын s – зона астында р – зона асты жоқ, содан кейін бірден ұзақ өмір сүретін d – электрондар бар зона асты болады. Бұл нәтиже физика институтында жасалған теориялық есептеулерге сәйкес келеді.

**Түйін сөздер:** өткізгіштік зона,  $\text{CaSO}_4:\text{RE}^{3+}$ , рентгендік сәулелену, люминесценция.

**Аннотация.** При больших дозах рентгеновской радиация зарегистрирован новый высоко-температурный пик ТСЛ с максимумом при 710 К, связанный с созданием новых радиационных дефектов. Предполагается, что созданию этих новых дефектов способствует особое строение зоны проводимости  $\text{CaSO}_4$ , где за s-подзоны нет обычной для многих материалов p-подзоны, а сразу следует подзона с долгоживущими d – электронами.

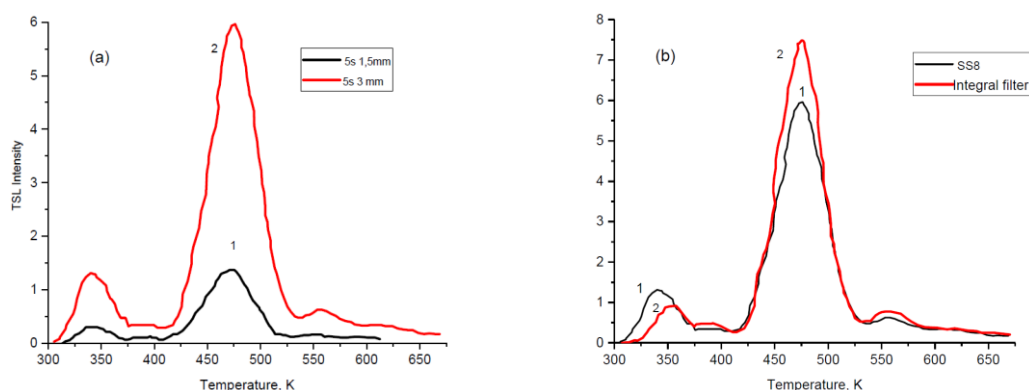
**Ключевые слова:** зона проводимости,  $\text{CaSO}_4:\text{RE}^{3+}$ , рентгеновское излучение, люминесценция.

**Abstract.** At high doses of x-ray radiation, a new high-temperature TSL peak with a maximum at 710 K was detected, which is associated with the creation of new radiation defects. It is assumed that the creation of these new defects is facilitated by the special structure of the  $\text{CaSO}_4$  conduction band, where the s – subband is not the usual p – subband for many materials, but immediately follows the subband with long – lived d – electrons.

**Keywords:** conduction band,  $\text{CaSO}_4:\text{RE}^{3+}$ , X-ray radiation, luminescence.

**Кіріспе.** Үш валентті сирек жер иондарымен легирленген  $\text{CaSO}_4$  ангидридінің кристалды құрылымы  $\eta > 1$  кванттық шығысымен көрінетін жарық шығару вакуумдық ультра-күлгін (ВУК) сәулеленудің тиімді спектрлік трансформаторлары, сондай-ақ рентген мен гамма-сәулеленудің жеке дозиметрі ретінде ұзақ уақыт функционалды материалда қолданылуда. Екі түрлі қоспалардан тұратын фосфорлар фото қозудан кейін өте күшті және баяу өшетін фосфоресценцияны береді, ол түнгі және апаттық жарықтандыру құрылғыларында қолданылады. Алайда,  $\text{CaSO}_4:\text{RE}^{3+}$  төзімділігі радиацияның әртүрлі түрлеріне байланысты айтарлықтай ерекшеленеді және белгілі болғандай кристалдық тор түйіндеріндегі  $\text{Ca}^{2+}$  иондарын алмастыратын  $\text{RE}^{3+}$  иондар концентрациясы мен фосфор синтезінің егжей-тегжейлі технологиясына тәуелді. Ұзақ әсер ететін сәулелену әсерінен  $\text{CaSO}_4:\text{RE}^{3+}$  тіпті жоғары температураға дейін күйдіргеннен кейін де жойылмайтын ақаулар саны айтарлықтай жинақталатыны белгілі болды. Иондаушы сәулелену материалдың құрылымында әртүрлі ақаулардың пайда болуымен әсер етеді. Ақаулардың концентрациясы үлкен болса олар тұрақты, яғни сәулелену әсеріне материал аса берік болады [1-7].

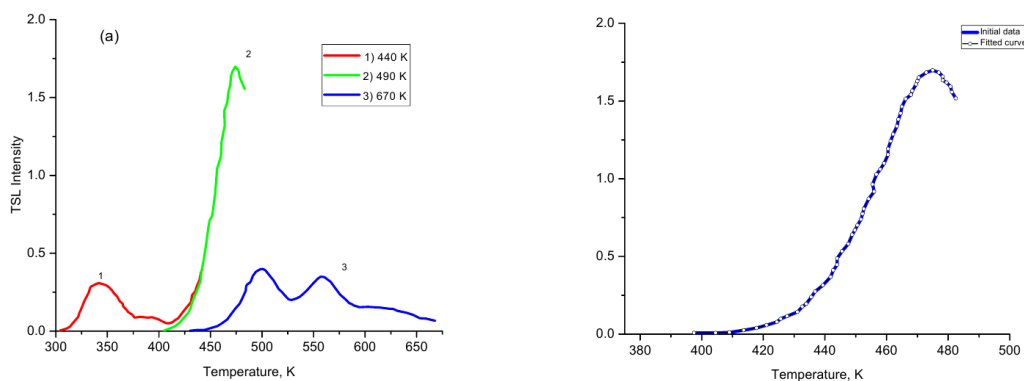
**Зерттеу нәтижелері мен талқылау.**  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  үлгілері диаметрлері 1,5 мм мен 3 мм мыс ұстағышта 10 с ішінде (вольфрамдық антикатод, 50 кэВ, 15 мА) рентгендік сәулемен сәулелендірілді. Үлгілерді фотонмен сәулелендірілгеннен айырмашылығы ~460 К шыңы үлкен болады. Әртүрлі диаметрдегі ұстағыштағы үлгінің термоинталандырылған люминесценциясы (ТҮЛ) салыстырылып (1-сурет) көрсетілгендей тіркелген сигналдың интенсивтілігі үлгі бетінің ауданына тәуелді екенін көрсетеді.



**1-сурет.** 295 К кезіндегі рентгендік сәулемен сәулелендірілген  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  үлгісі үшін ұстағыштың диаметрі (а) немесе қолданылған әртүрлі жарық сүзгілеріне (б) тәуелді өлшенген ТҮЛ қисығы

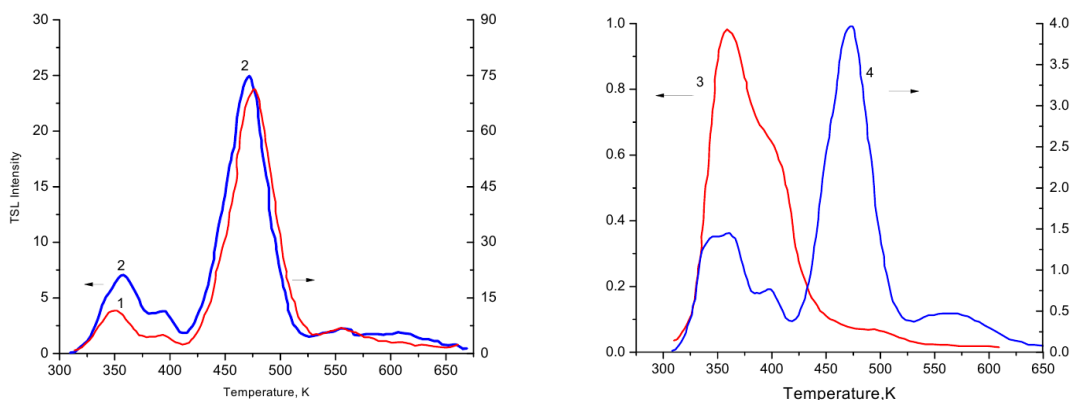
СС-8 сүзгісін пайдаланып құрылғының жоғары температуралы жылулық жарқырауының (жылулық фон) интенсивтілігі азайтылды. СС-8 сүзгісі стандартты мөлдір шыныдан жасалған сүзгімен салыстырғанда тіркелетін ТЫЛ сигналының интенсивтілігін аз өзгертеді.

Рентгендік сәулемен сәулелендірілген  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  үлгісінің  $\sim 460$  К облыстағы ТЫЛ элементар шығын бөлу үшін сатылы (фракционды) қыздыру 440, 490 және 670 К температураға дейін жүргізілді. Бірінші ретті кинетика 474, К кезіндегі аса интенсивті шың үшін бірінші ретті кинетика бойынша жиілік факторы  $\rho_0 = 3 \cdot 10^{12} \text{c}^{-1}$  және активация энергиясы  $E_T = 1,257$  эВ (2-сурет).



**2-сурет.** 295 К кезіндегі рентгендік сәулемен  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  үлгісі 10 с сәулелендірілген (а) және «Origin» бағдарламасы мен «peak fitting» функциясы көмегімен өңделген максимумы  $\sim 475$  К ТЫЛ қисығы

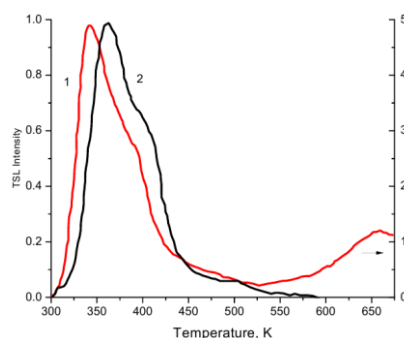
$\text{CaSO}_4$  фосфоры тулий немесе тербиймен белсендіріліп, мұнда компенсатор ретінде  $\text{F}^-$  немесе  $\text{Rb}^+$  иондары алынып бірдей шартта сәулелендірілген ТЫЛ қисықтары салыстырылды (3-сурет). Рубидий натрийдың орнына сол топтағы элемент болғандықтан орналасады, бірақ үлкен иондық радиуспен. ТЫЛ қисығының формасы ұқсас, ал  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Rb}^+$  ТЫЛ жарық суммасы  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$ -дан 3 есе аз (3, а-сурет). Тербийлік фосфорда рубидий болғанда жинақталған жарық суммасы бірнеше есеге ұлғаяды (3, б-сурет).



**3-сурет.** Алдын ала 295 К кезінде 10 с рентгендік сәулемен сәулеленген  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  (1) мен  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}, \text{Rb}^+$  және  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Na}^+$  мен  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Rb}^+$  фосфорлары үшін ТЫЛ қисықтары

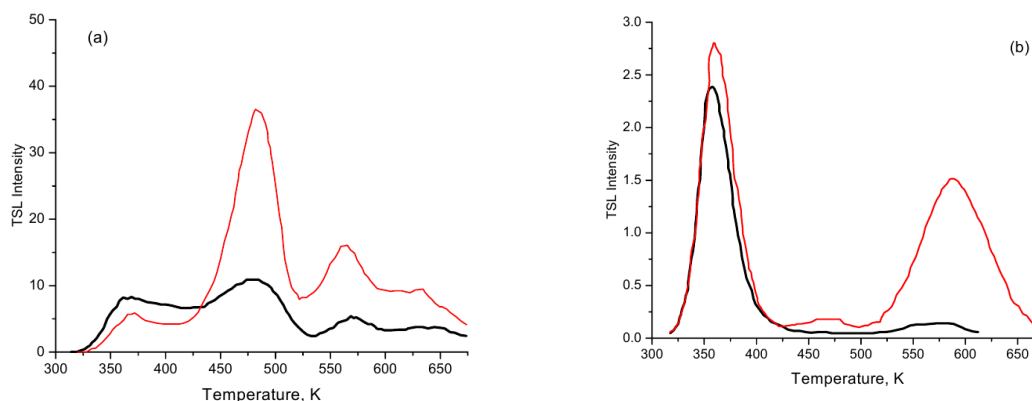


Температурасы 295 К кезінде рентгендік сәулемен сәулеленген  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}, \text{Na}^+$  мен  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Na}^+$  фосфорлары үшін ТЫЛ қисықтары көрсеткендей тулий үлгісінде қосымша жоғары температуралы шың  $\sim 650$  К тіркелді (4-сурет).



**4-сурет.** 295 К кезінде 10 с ішінде рентгендік сәулемен сәулеленген  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}, \text{Na}^+$  мен  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Na}^+$  үшін ТЫЛ қисықтары

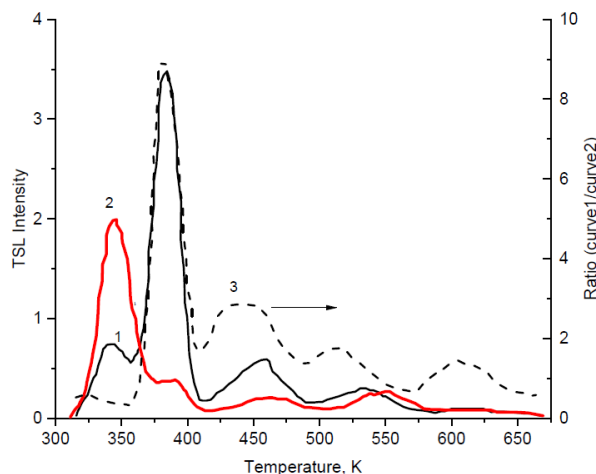
Зерттеулер көрсеткендей әсіресе терең тұзақтағы (мысалы:  $\text{Tm}^{3+}$  қоспалық ионының электронын қармау кезінде пайда болған  $\text{Tm}^{2+}$  орталығы) электрондардың қайта таралуы эффективті болады, ал сәулеленген фосфорды қосымша қыздырудан соң босаған аса саяз электрондық тұзақтар фотоқоздырудың екісатылы процесі (қажетті екі фотонға қосынды энергия 7 эВ аймағында) нәтижесінде өтеді (5-сурет).  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}, \text{F}^-$  фосфоры рентгендік сәулемен сәулеленген және белгілі температураға (420 немесе 675) дейін қыздырылып қосымша аса жоғары қысымды СВД 120 а сынап лампасының интегралды жарығымен (5,2-2 эВ) сәулелендіріледі. Бұндай фотоқоздыру нәтижесінде фосфорды рентгенизациядан кейін бірден анықталатын анық ТЫЛ шыңдары тіркелді. Біздің ойымызша энергиясы 5 эВ (сынап разрядының интенсивті резонансты сызығы) шамасыдағы бірінші қоздырушы фотон алдын ала рентгенизацияда пайда болған  $\text{Tm}^{2+}$  орталығын ұзақ өмір сүретін ( $\sim 100$  мс) триплетті күйдегі қозуға, ал энергиясы  $\sim 3$  эВ екінші фотон ионизация күйіндегі  $\text{Tm}^{2+}$  орталығын қозуға әкеледі. Нәтижесінде  $\text{Tm}^{3+}$  мен ұсақ электрондық тұзаққа қармалатын өткізгіштік электрон болады, ол  $\sim 355$  К кезіндегі ТЫЛ шыңымен байланысты.



**5-сурет.** Сәулеленбеген үлгілердің (қара түс) сынап-кварцтық лампаның барлық диапазонында сәулеленгеннен кейін және рентгендік сәулемен сәулеленіп 670 К дейін қыздырылғаннан (қызыл түс) кейінгі  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}, \text{F}^-$  (a) мен  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Rb}^+$  үлгілері үшін өлшенген ТЫЛ қисығының салыстыруы



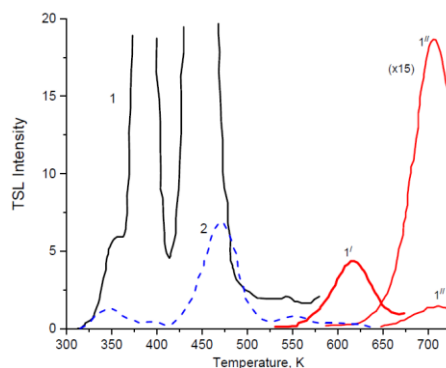
Өткізгіштік s-электрондар (10эВ) немесе өткізгіштік d-электрондарды (12,5 эВ) жасайтын изодозалық фотондармен сәулелендіргеннен кейін  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  фосфоры үшін ТЫЛ қисықтары 6-суретте салыстырылған. Екі сәулелену үшін ТЫЛ шыңдарының қатынасы  $T > 500$  К облысында ерекшеленеді (0,5-тен 1,5 дейін тербеледі), яғни бұл  $\text{CaSO}_4$  фосфорында өткізгіштік s- пен d-электрондардың қозғалысының әртүрлілігін көрсетеді.



**6-сурет.** 295 К кезінде 10 эВ (1) немесе 12,5 эВ (2) изодозалық фотондармен  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  үлгісін сәулелендірілгеннен соң өлшенген ТЫЛ қисығы. 3-1 мен 2 қисықтың қатынасы

Дозасы аз рентгендік сәулемен сәулеленген  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  мен  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  фосфорларында болатын радиациялық процестер кезінде, яғни сәулеленуден пайда болған электронды-кемтіктік процесс кезінде кристаллдық тордағы «радиацияға дейінгі» ақаулар мен қоспалық ақаулардың қайта зарядталуына әкеледі. Эксперимент нәтижесі көрсеткендей, сәулену дозасын ұлғайтқанда осындай қайта зарядталу процестерінің қанығуы болып жаңа радиациялы-индуцирленген құрылымдық ақаулар пайда бола бастайды.  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$  фосфорын сәулеленудің дозасын өсіру кезінде,  $9,90 \pm 0,15$  эВ фотондармен (валенттік зонаның үстінгі жағында p-кемтіктер мен s-өткізгіштік электрондар) 30 мин-тан 240 мин-қа дейінгі қысқа инкубациялық периодтан кейін  $T_m \sim 620$  К кезінде ТЫЛ шыңының жарықсуммасы уақытқа байланысты өсуі тіркелді.

Алынған эксперименттік мәліметтерді анализ жасау негізінде ТЫЛ шыңдарынан біреуін радиациялық ақаулардың пайда болуымен байланыстырамыз.  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}, \text{F}^-$  рентгендік сәулелену дозасы енуінің ТЫЛ қисықтары 7-суретте салыстырылғанда 1000 есе өзгешеленеді. ТЫЛ 2,4-3,1 эВ жарқырауды өткізетін (яғни  $\text{Tm}^{3+}$  орталығының жарқырауы, бірақ құрылғының фондық жылу жарқырауын кеседі) СС-8 сүзгісі арқылы өлшенді. 560 К мен 670 К дейінгі аралық қыздыру мынадай параметрлері бар – жиілік факторы  $p_0 = 1,16 \cdot 10^{12} \text{c}^{-1}$ ,  $T_m = 617$  К және активация энергиясы  $E_T = 1,16$  эВ,  $p_0 = 1,7 \cdot 10^{14} \text{c}^{-1}$ ,  $T_m = 617$  К және активация энергиясы  $E_T = 2,12$  эВ екі элементар шыңды бөліп алуға мүмкіндік берді. Жоғары температуралы шың күмәнсіз жасытуы салыстырмалы әлсіз жарқыраумен сәйкес келетін жаңа радиациялық ақаулардың пайда болуымен сәйкес келеді.



**7-сурет.**  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$ , F<sup>-</sup> үлгісін 295 К кезінде рентгендік сәулемен  $\sim 10^4$  с ( $1, 1', 1''$ ) немесе 10с (2) сәулелендіргеннен соң фракциялық қыздыру кезінде өлшенген ТЫЛ қисығы

*Қорытынды.*  $\text{CaSO}_4$  фосфорының өткізгіштік зонасында s- пен d-зона асты, бірақ олардың арасында көптеген кең саңылаулы материалдарда болатын p-зона асты болмайтындығы туралы теориялық есептеулерге біздің эксперименттік мәліметтер бойынша сәйкес келеді [8]. Сондықтан  $\text{CaSO}_4$  фосфорында  $h\nu > 11$  эВ фотондармен d-өткізгіштік электрондар пайда болып ұзақ уақыт болады, өйткені d→s күй арасындағы өту бірдей жұптылықпен тыйым салынған. Егерде фосфорды рентгендік сәулемен сәулелендірсек, онда валенттік зонаның үстінде аз қозғалатын p-кемтіктерден басқа ішкі қабықшада (негізгі) қозғалмайтын p-кемтіктерді де туғызуға болады. Сондықтан негізгі кемтіктер мен «ұзақ өмір сүретін» d-өткізгіштік электрондар мүмкін рекомбинация болады, ал бөлінетін энергия тек қана элементарлық радиациялық ақауларды тудыру үшін емес, тіпті кристалда наноөлшемді кластерде құрылымдық қайта құруға да жеткілікті болады. Мұндай элементарлы емес ақаулар өте жоғары температурада тұрақты болуы қажет.

#### Әдебиетер тізімі

1. Lushchik A., Lushchik Ch., Kudryavtseva I., Maaros A., Nagirnyi V., Savikhin F. Resonant processes causing photon multiplication in  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}$  // Radiat. Meas. – 2013. – Vol. 56 – P. 139-142.
2. Dorenbos P. Locating lanthanide impurity levels in the forbidden band of host crystals // J. Lumin. – 2004. – Vol 108. – P. 301-309.
3. Азмаганбетова Ж.Р., Лущик А.Ч., Маарос А., Нурахметов Т.Н., Токсанбаев Б.Ж. Термостимулированные и туннельные процессы в люминофорах  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Na}^{1+}$  // Известия НАН РК, Серия физико-математическая. – 2009. – № 3. – С. 25-30.
4. Huzimura R., Atarashi K. The role of sulphur-oxy radicals in thermoluminescence and exoelectron emission of  $\text{CaSO}_4$ , phosphors // Phys. Status Solidi A. – 1982. – Vol. 70. – P. 649-657.
5. Пазылбек С., Васильченко Е., Кудрявцева И., Лущик А., Маарос А., Нурахметов Т., Рогач С. Электронно-дырочные процессы в люминесцирующих  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}^{3+}$  // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – Астана, 2014. – № 4(101). – С. 240-250.
6. Danby R.J., Boas J.F., Calvert R.L., Pilbrow J.R. ESR of thermoluminescent centres in  $\text{CaSO}_4$  single crystals // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1982. – Vol. 15. – P. 2483-2493.
7. S. Nakonechnyi, T. Kärner, A. Lushchik, Ch. Lushchik, V. Babin, E. Feldbach, I. Kudryavtseva, P. Liblik, L. Pung, and E. Vasil'chenko. Low-temperature excitonic, electron-hole and interstitial-vacancy processes in LiF single crystals // J. Phys. Condens. Matter. – 2006. – Vol. 18. – P. 379.
8. Kudryavtseva I., Klopov M., Lushchik A., Lushchik Ch., Maaros A. and Pishtshev A. Electronic excitations and self-trapping of electrons and holes in  $\text{CaSO}_4$  // Phys. Scr. – 2014. – Vol. 89. – P. 044013. – doi:10.1088/0031-8949/89/4/044013.

ФИЗИКА  
ФИЗИКА  
PHYSICS

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_67  
MFTAA 29.19

**С.А. Пазылбек<sup>1</sup>, А. Луцик<sup>2</sup>, А. Ағабек<sup>1</sup>, Д. Ескермесов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік педагогикалық университеті, Шымкент қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Тарту университеті, Физика институты, Тарту қ., Эстония

<sup>3</sup>Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

E-mail: pazylbek.sapargali@yandex.kz

## АУЫР ИОНДАРЫ БАР МЕТАЛЛ ОКСИДТЕРІНДЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ АҚАУЛАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ

## СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОКСИДАХ МЕТАЛЛОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

## RADIATION DEFECTS CREATION IN HEAVY-ION CONTAINING METAL OXIDES

**Аңдатпа.** Сәулеленген кристалдарды ~70 % балку температурасына дейін қыздыру кезінде радиациялық индукцияланған сіңіруді, шашырауды және люминесценцияны кезең-кезеңімен күйдіру жүргізілді. Аса ауыр иондармен сәулелендірілген  $Gd_2SiO_5$  кристалында теориялық болжамдарға сәйкес дискретті солитондардың (бризерлердің) күйреуі кезінде көптеген иондардың қайта топталуы нәтижесінде пайда болатын термостабелді нановлшемді үш өлшемді ақаулардың ықтимал эксперименттік көріністері табылды.

**Түйін сөздер:** Френкель ақаулары, дискретті бризер коллапсы,  $Gd_2SiO_5$ , иондық саулелену.

**Аннотация.** Проведен поэтапный отжиг радиационно-индуцированного поглощения, рассеяния и люминесценции при нагреве облученного кристалла до ~70 % температуры плавления. В кристалле  $Gd_2SiO_5$  облученном быстрыми тяжелыми ионами обнаружены возможные экспериментальные проявления термостабильных наноразмерных трехмерных дефектов, создаваемых, согласно теоретическим предсказаниям, перегруппировкой многих ионов-хозяев при коллапсе дискретных солитонов (бризеров).

**Ключевые слова:** пороки Френкеля, дискретный коллапс бризера,  $Gd_2SiO_5$ , ионовое излучения.

**Abstract.** The step-by-step annealing of the radiation-induced absorption, scattering and luminescence has been performed at the heating of irradiated crystals up to ~70 % of a melting point. Possible experimental manifestations of the temperature-stable nanosize 3D defects created, according to theoretical predictions, via rearrangement of many host ions at the collapse of discrete solitons (breathers) are detected in  $Gd_2SiO_5$  crystal irradiated with swift heavy ions.

**Keywords:** Frenkel defects, discrete Breezer collapse,  $Gd_2SiO_5$ , Ionic saulenization.

**Кіріспе.** Кең саңылаулы материалдарды (КСМ,  $E_g = 5 - 15$  эВ) медициналық және өнеркәсіптік мақсаттарда пайдаланылатын жылдам және тиімді сцинтилляциялық детекторлар мен селективті дозиметрлер, сынапсыз люминесцентті лампалар мен дисплейлерге және т.б. арналған спектрлік трансформаторлар ретінде қажетті қасиеттері бар практикалық қолдану үшін елеулі шектеу болып табылады. Болашақта ядролық синтездің энергетикалық реакторларын салуда конструкциялық материалдар мен реакторлық материалдардың радиациялық төзімділігін елеулі арттырмай табысқа қол жеткізуге болмайды.

Сілтілі галоидты кристалдардың көпшілігінде Френкель ақауларының (ФА) интерстициал-вакансия жұбын құру энергиясы  $E_{ФА} < E_g$  энергетикалық саңылау енінен аспай-

тындығы бұрыннан белгілі болды. Сондықтан ФА эмбебап соққы механизмімен қатар (ядролармен ұшатын бөлшектердің серпімді соқтығысуы) автолокализацияланған экситондардың ыдырауында немесе толық релаксацияланған өткізгіш электрондары мен валенттік кемтіктердің толық рекомбинациясында пайда болады [1-4].

Көптеген екілік және күрделі металл оксидтері үшін  $E_{\text{ФА}} > E_g$  энергетикалық теңсіздігі, ал жоғарыда аталған ФА құрудың экситонды және электронды-кемтіктік механизмі энергетикалық себептерге байланысты мүмкін емес. Соңғы жылдары Тарту физиктері мұндай оксидтерінде ФА  $E_{\text{ФА}}$ -ден асып кетпейтін энергия кезінде бөлінетін релаксацияланбаған электрондар мен кемтіктерді рекомбинациялау кезінде пайда болуы мүмкін деп болжады [5-8]. Радиацияның «орташа» тығыздығы жағдайында мұндай «ыстық» рекомбинациялардың ықтималдығы төмен, бірақ ол, мысалы, аса ауыр жоғары энергиялы иондардың жолдарында пайда болатын электронды қозудың (ЭҚ) өте жоғары тығыздығымен күрт артады.  $^{238}\text{U}$  немесе  $^{197}\text{Au}$   $\sim 2$  ГэВ-иондарының энергиясының 99,9 %-дан астамы электрондық кіші жүйені қоздыру мен ионизациялауға, яғни ЭҚ жұмсалады [9-12].

*Зерттеу үлгісі мен әдістері.*  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  таза кристалдары сцинтилляциялық материалдар институтында (Харьков, Украина) Чохральский әдісімен өсірілді.  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  өсіру үшін бастапқы материалдар ретінде сирек кездесетін жер оксидтері  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , минималды тазалығы 4n стехиометриялық арақатынаста араласқан материалдар пайдаланылды. Диаметрі 50 мм-ге дейін және ұзындығы 150 мм Чохральский әдісі бойынша өсірілді [13].

Кристалдар аса ауыр иондармен сәулелендіру бөлме температурасында (БТ) жазықтыққа (100) перпендикуляр Дармштадттағы UNILAC GSI сызықтық үдеткішінде сәулелендірілді [14]. оптикалық жұтылу спектрлері JASCO V-660 жоғары жұтылу спектрометрмен (қос монохроматормен) 1,5-6,5 эВ аймағында және BMP-2 вакуумдық монохроматорымен 5,0-7,7 эВ аймағында өлшенді. Фотолюминесценция бойынша негізгі эксперименттер DESY ғылыми орталығындағы (Гамбург, Германия) HASYLAB зертханасының SUPERLUMI станциясындағы СС пайдалану арқылы жүргізілді [15]. Қозу және шағылысу спектрлері кристалға түсетін синхротронды сәулеленудің (4-40 эВ) тең кванттық қарқындылығына нормаланды.

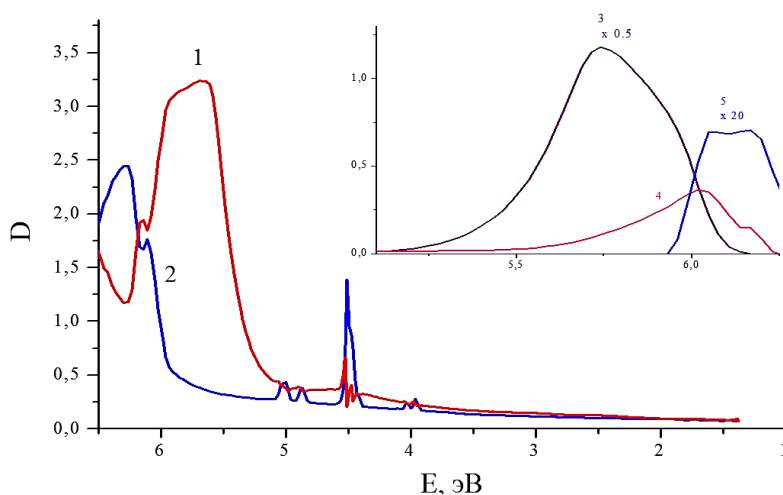
*Зерттеу нәтижелері мен талқылау.* Жоғарыда аса жоғары энергиялы иондардың,  $\text{LET} > 20$  кэВ/нм тректерінде ЭҚ аса жоғары тығыздығы кезінде «ыстық» e-h рекомбинациясының ықтималдылық шамасы күрт өсетіні атап өтілді. Аса тығыз сәулелену жағдайында ақаудың пайда болуының басқа да неғұрлым күрделі тетіктері қарастырылады. Д. Вайсбурд кең саңылаулы материалдардың сынғыш бұзылуы қуатты электрондық шокпен сәулелендірілген кристалда жергілікті фазалық ауысуды тудыратын жоғары дыбысты соққы толқындар әсерінен болады деп ұсынды [11-17]. Бұл процесс қазір радиациялық зақымдану механизмдерінің үшінші тобы ретінде қарастырылады (соққы механизмімен және әртүрлі ЭҚ құрылымдық ақауларына ыдыраумен бірге), ол материалдарды ауыр жоғары энергиялы иондармен сәулелендіру кезінде одан да айқын көрінеді.

Теориялық болжамдарға сәйкес, жүйенің тербеліс ангармонизміне бейім акустикалық фонондардың (яғни жоғары дыбысты тербелістер) шекті энергиясынан едәуір жоғары амплитудасы мен жиілігі бар арнайы типтегі өзіндік локализацияланған модтар – дискретті бризер немесе дискретті солитондар деп аталады [5-8]. Металдар мен қорытпалар үшін ангармонизм мен жоғары амплитудалы тербелісі бар кристалдық тордың арнайы нүктелерінде дискретті бризерлердің коллапсы қарастырылған, бұл кристалдық тордың жүздеген матрицалық атомдардан тұратын аймағын жергілікті қайта құруға әкеледі. Осындай кооперативті процестің нәтижесінде материал көлемінде үш өлшемді 3D ақаулар пайда болады, олар дислокация қозғалысы үшін стоппер

ретінде қызмет етеді, осылайша материалдардың жарылуына және соңында механикалық бұзылуына әкеледі.

Біз кең саңылаулы материалдың бірі ретінде жоғары қуатты ауыр иондармен сәулелендірілген  $Gd_2SiO_5$  күрделі металл оксидінде 3D ақауларының пайда болуының алғашқы тәжірибелік көріністерін іздедік ( $\sim 2$  GeV,  $^{238}U$ ,  $^{197}Au$ ,  $\sim 10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup>).  $Gd_2SiO_5$  монокристалының жылтыратылған пластиналары үшін иондық сәулеленуден туындаған оптикалық жұтылу спектрлері, сондай-ақ алдын ала сәулелендірілген үлгіні әртүрлі температураға дейін, әсіресе құрғақ атмосферада сатылы қыздыру кезіндегі жұтылу спектрлері зерттелді.

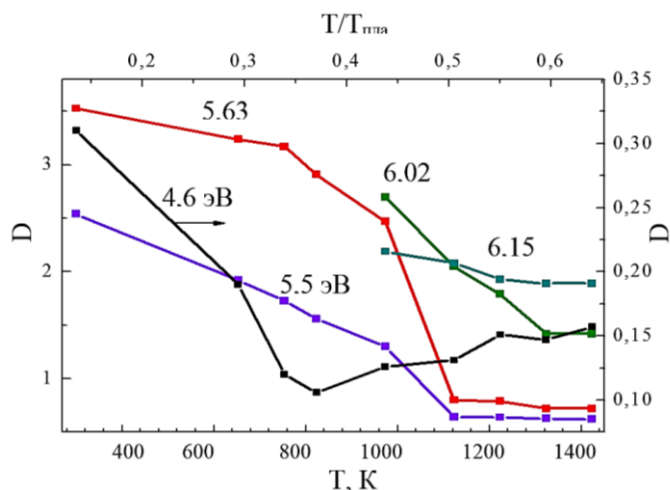
Екі тізбектелген қыздырудың арасында өтетін оптикалық жұтылу спектрлері, сондай-ақ белгіленген спектрлік аймақта өлшенетін оптикалық жұтылудың тәуелділігі 1 және 2-суреттерде келтірілген. Эксперименттік деректерді талдау кезінде кейбір ақаулар (негізінен F-тобынан шыққан Френкельдің қарапайым ақаулары) иондық өткізгіштік әлі әлсіз болған кезде және электронды-кемтік процесі маңызды рөл атқарған кезде балку температурасының жартысынан аспайтын температура аймағында ( $T_{балку} \sim 2223$  K) жойылады деген қорытындыға келуге болады.



**1-сурет.** Алдын ала сәулеленген  $Gd_2SiO_5$  кристалдың аралық қыздыруына байланысты жұтылған сәулеленудің азаю спектрлері (2,04 ГэВ,  $10^{12}$  Au/cm<sup>2</sup>, 300 K):

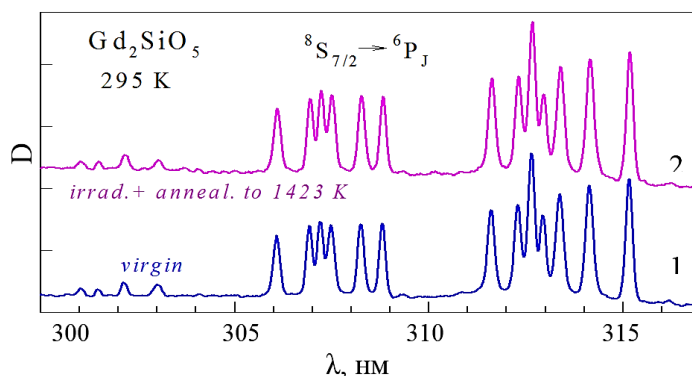
1 – бөлме температурасынан 753 K дейін; 2 – 823→973 K; 3 – 973→1123 K;  
4 – 1223→1323 K; 5 – 1323→1423 K

Біздің жағдайымызда мүмкін болатын максималды температураға дейін қыздырғаннан кейін радиацияның әсерінен пайда болған қалдық оптикалық жұтылу тіркелетініне күмән жоқ. Қалған жойылмаған үлес әсіресе спектрдің жоғары энергетикалық аймағында үлкен. Егер спектр аймағында 6,4 эВ-қа дейін өлшеулер жарықтың шашырау деңгейі төмен қос монохроматор арқылы жүргізілсе, онда вакуумдық ультракүлгін аймағында біз 7,5 эВ-тан жоғары оптикалық жұтылуды өлшеуге мүмкіндік бермейтін жалғыз монохроматор арқылы ғана жұмыс істеуге мүмкіндік алдық. Сондықтан ауыр алтын иондарымен сәулелендіру кезінде үш өлшемді құрылымдық ақаулардың пайда болуын біз  $Gd_2SiO_5$  қалдық оптикалық жұтылумен байланыстырамыз. Бұл процестерді егжей-тегжейлі және мұқият зерттеу әлі алда.

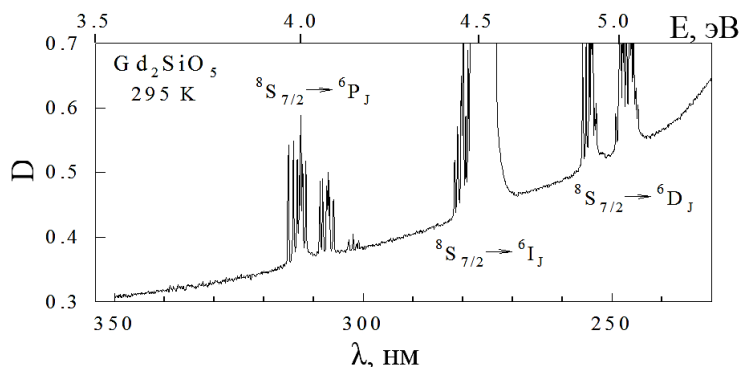


**2-сурет.** Көрсетіліп бекітілген спектрдің аймағындағы оптикалық жұтылу шамасының аралық қыздыру температурасынан тәуелділігі

Металдар мен қорытпаларға арналған нәтижелерге сәйкес [8] бризерлердің коллапсы кезінде пайда болған 3D ақаулары жоғары жылу тұрақтылығына ие, олар балқыту алдындағы температураға дейін толығымен жойылмайды және жарықтың шашырауын күрт арттырады. 3, 4-суреттерде «таза»  $Gd_2SiO_5$  монокристалы және Дармштаттағы ауыр иондар үдеткішінде (2,04 ГэВ,  $10^{12} Au/cm^2$ ) бөлме температурасында алдын ала сәулеленген үлгі үшін оптикалық жұтылу спектрі (дәлірек айтқанда, экстинкция, жарықтың шашырау процесін қоса алғанда) салыстырылады. Спектрлер JASCO V-660 спектрофотометрінде 0,1 нм ажыратымдылығымен және 0,025 нм қадамымен бөлме температурасында қос монохроматорды пайдалана отырып өлшенген. Сәулелендірілген  $5 \times 5 \times 0,4$  мм<sup>3</sup> өлшемді үлгі қосымша 1423 К температураға дейін қыздырылды, ол цилиндрлік иондық тректердің шеткері аймағында пайда болатын Френкельдің қарапайым ақауларының жойылуын қамтамасыз етеді, ал болжамды 3D ақаулары сақталуы керек болатын. 300-313 нм (3-сурет) кезінде жұтылудың әлсіз сызықтары  $Gd^{3+}$  ионындағы  $^8S_{7/2}$  негізгі күйінен  $^6P_1$  қозған күйге  $f-f$  ауысуларына сәйкес келеді.



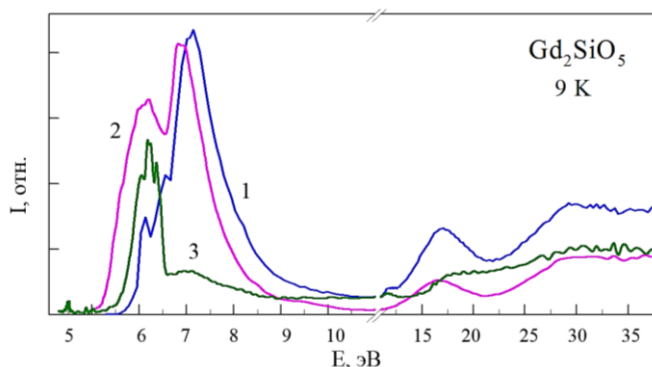
**3-сурет.** 295 К-де өлшенген сәулеленбеген  $Gd_2SiO_5$  (1) және  $^{197}Au$  (2,04 ГэВ,  $10^{12} Au/cm^2$ , 300 К) иондармен алдын ала сәулелендіріліп 1423 К дейін қыздырылған кристалл (2) үшін жұтылу спектрлері



**4-сурет.** 295 К-де өлшенген  $^{197}\text{Au}$  ( $2,04 \text{ ГэВ}$ ,  $10^{12} \text{ Au/cm}^2$ , 300 К) иондармен алдын ала сәулелендіріліп 1423 К дейін қыздырылған  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  кристалының жұтылу спектрлері

Сәулелендірілген үлгідегі 3D ақауларының болуы осы спектрлік аймақта іргелі жұтылудан алыс, шашыраңқы жарықтың фонын аздап арттырады. Алайда,  $8s_{7/2}$  қысқа толқындық аймақта жағдай күрт өзгереді  $\text{Gd}^{3+}$  ионындағы  $8s_{7/2} \rightarrow 6I_1$  мен  $8s_{7/2} \rightarrow 6D_1$  ауысулар (4-сурет) – қос монохроматор арқылы өлшегеннің өзінде шашыраңқы жарықтың күрт өсуі, біздің ойымызша, көлемді құрылымдық бұзылулардың жарықтың шашырау орталықтары болып табылатын 3D ақауларының болуын көрсетеді.

Іргелі жұтылудың шетіне жақын ( $E_g \approx 8,2 \text{ эВ}$ ) радиациялық ақаулардың жұтылуы болуын (5-сурет) келесі түрде түсіндіруге болады, яғни  $4,95 \text{ эВ}$   $\text{Gd}^{3+}$ -иондарының типтік жарқырауы тиімділігінің күрт өсуі сәулеленбеген  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  үлгісімен салыстырғанда үлкен энергияға қарай  $\sim 1 \text{ эВ}$ -қа жылжиды, бұған ұқсас өсу  $\sim 6 \text{ эВ}$  кезінде орын алады. Қоздырғыш фотондардың энергиясы ақаулар арқылы жұтылып  $\text{Gd}^{3+}$  ионына беріледі.



**5-сурет.**  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  кристалын 9К кезінде  $3,95$  (1 мен 2) және  $2,6 \text{ эВ}$  (3) жарқырауы үшін қоздыру спектрі: сәулелендірілмеген (1 мен 3) және Дармштатта алтын ионымен сәулелендірілген ( $2,04 \text{ ГэВ}$ ,  $10^{12} \text{ Au/cm}^2$ , 300 К). 2 қисығы  $1,5$  есеге үлкейтілген

*Қорытынды.* Кең саңылаулы материалдарда ФА құрылу механизмі ретінде  $E_{\text{ФА}} > E_g$  бар релаксацияланбаған тасымалдаушылардың «ыстық» рекомбинациясын қарастыру айтылғаннан кейін, мұндай ақау түзілу механизмінің мүмкін әлсірету/басу әдісі туралы идея да айтылды. [163, 164] еңбектерінде еркін атомдар үшін Франк-Герц эффектісінің [26, 27] қатты денедегі аналогы болатын ЭҚ көбею механизмдерінің бірін пайдалану

есебінен ыстық  $e-h$  рекомбинациясы нәтижесінде ФА құрылуын «люминесценттік қорғаныс» деп атау ұсынылды.  $E_g$ -ден едәуір жоғары энергиясы бар қоздырғыш фотондар тудыратын ыстық өткізгіш электрондар өзінің артық энергиясының бір бөлігін люминесцентті қоспалар орталықтарын тікелей қоздыруға жұмсай алады, олардың негізгі және қозған деңгейлерінің бірі энергиялық саңылаудың ішінде болады.

Мұндай процесс пен өткізгіштік «суыған» электрондардың кемтікпен рекомбинациясынан кейін бөлініп шығатын энергия ФА жұбын құруға жетпейді. Осылайша,  $E_{ФА} > E_g$  бар материалдың радиациялық тұрақтылығы энергияны диссипациялаудың сәуле шығарусыз каналы (құрылымдық ақауларды құру) мен қозған қоспалық ион негізгі күйге өтіп, қоспалық люминесценцияға тән квантын шығарған кезде пайда болатын сәуле шығару каналымен бәсекелестігі есебінен көтерілуі мүмкін.

Алайда «люминесцентной қорғау» іске асыру үшін бірқатар шектеулер болады. Біріншіден, мұндай процестер  $E_{ФА}$  мәні  $E_g$ -ден айтарлықтай аспаса ғана мүмкін болады,  $E_g$  ретті шамадан тыс энергиясы бар ыстық өткізгіштік электрон бәсекелес Оже процестерге қатысады. Екіншіден, эффектінің айтарлықтай мәні үшін жоғары легирленген материалдарды пайдалану қажет. Қоспалық иондардың концентрациясының жоғарылауы кезінде екі кеңістікке жақын қоспалық иондардың, сондай-ақ неғұрлым күрделі қоспалық орталықтардың жұптасқан орталықтарын қалыптастыру мүмкіндігін ескеру қажет.

Айта кету керек, жұптасқан қоспалар орталықтары, әсіресе (таза статистикалық қарастырудан едәуір үлкен ықтималдылықпен) коваленттіліктің жоғары үлесі бар материалдарда тиімді пайда болады. Олар ыстық (релаксацияланбаған) валентті кемтіктер үшін тиімді қармауыш бола алады, осылайша «ыстық» электронды-кемтіктік рекомбинациясының есебінен иондық трекердің шетінде Френкель ақауларының пайда болуына ықпал етеді.

#### Әдебиетер тізімі

1. Ch. Lushchik and A. Lushchik, Decay of Electronic Excitations with Defect Formation in Solids (Nauka, Moscow, 1989).
2. K.S. Song and R.T. Williams, Self-Trapped Excitons, second ed. (Springer, Berlin, 1996).
3. Ch. Lushchik and B. Lushchik, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 56, 201 (1992).
4. A. Lushchik, I. Kudryavtseva, Ch. Lushchik, E. Vasil'-chenko, M. Kirm, and I. Martinson, Phys. Rev. B 52, 10069 (1995).
5. A.J. Sievers and S. Takedo, Phys. Rev. Lett. 61, 970 (1988).
6. M. Haas, V. Hizhnyakov, A. Shelkan, M. Klopov, and A.J. Sievers, Phys. Rev. B 84, 144303 (2011).
7. H. Guo, M. Zhang, J. Han, H. Zhang, and N. Song, Physica B 407, 2262 (2012).
8. V.E. Zakharov and E.A. Kuznetsov, Phys. Usp. 55(6), 535 (2012) [Usp. Fiz. Nauk 55, 569 (2012)].
9. M. Toulemonde, S. Bouffard, and F. Studer, Nucl. Instrum. Methods B 91, 108 (1994).
10. K. Schwartz, A. E. Volkov, M. V. Sorokin, R. Neumann, and C. Trautmann, Phys. Rev. 82, 144116 (2010).
11. V.A. Skuratov, S.J. Zinkle, A.E. Efimov, and K. Havancsak, Nucl. Instrum. Methods B 203, 136 (2003).
12. A. Lushchik, T. Kārmer, Ch. Lushchik, K. Schwartz, F. Savikhin, E. Shablonin, A. Shugai, and E. Vasil'chenko, Nucl. Instrum. Methods B 286, 200 (2012).
13. V. Bondar, B. Grinyov, K. Katrunov, L. Lisetski, L. Nagornayaa, V. Ryzhikov, V. Spasov, N. Starzhinskiy, and G. Tamulaitis, Nucl. Instrum. Methods A 537, 215 (2005).
14. K. Schwartz, G. Wirth, C. Trautmann, and T. Steckenreiter, Phys. Rev. B 56, 10711 (1997).
15. G. Zimmerer, Radiat. Meas. 42, 859 (2007). [26] B. Henderson and E. Wertz, Defects in the A
16. D.I. Vaisburd and I. N. Balychev, Sov. Phys. JETP 15, 380 (1972).
17. D.I. Vaisburd, B.N. Semin, E.G. Tavanov, S.M. Matlis, I.N. Balychev, and G.I. Gering, Solid State High Energy Electronics (Nauka, Novosibirsk, 1982).
18. D.I. Vaisburd and K. E. Evdokimov, Phys. Status Solidi C 2, 216 (2005).



ФИЗИКА  
ФИЗИКА  
PHYSICS

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_73  
MFTAA 29.19.16

**Р.Е. Сакенова<sup>1,2</sup>, А.Д. Погребняк<sup>2</sup>, Н.К. Ердьбаева<sup>1</sup>, М.Қ. Қылышқанов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Сумы мемлекеттік университеті, Сумы қ., Украина

<sup>3</sup>С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан

E-mail: Sakenova\_rimma@mail.ru

**КРЕМНИЙ ИОНДАРЫМЕН ИМПЛАНТАЛАН CrN/ZrN/Cr/Zr НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ  
ЖАБЫНДАҒЫ ДИФфуЗИЯ ЖӘНЕ МИКРОСЕГРЕГАЦИЯ ПРОЦЕСТЕРІ  
ПРОЦЕССЫ ДИФфуЗИИ И МИКРОСЕГРЕГАЦИИ В НАНОСТРУКТУРНОМ ПОКРЫТИИ  
CRN/ZRN/CR/ZR, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ КРЕМНИЯ  
DIFFUSION AND MICROSEGREGATION PROCESSES IN A NANOSTRUCTURED  
CRN/ZRN/CR/ZR COATING IMPLANTED WITH SILICON IONS**

**Аңдатпа.** Бұл жұмыста болаттан жасалған төсеніш бетінде вакуумды катодты-догалы әдіспен тұндырылған CrN/ZrN/Cr/Zr жабындысы алынады. Көпқабатты CrN/ZrN/Cr/Zr жабындысын төменгі энергиялы кремний иондарымен импланттау кезінде алынған нәтижелер көрсетілген. Эксперименттік SAED және XRD, HRTEM, EDS, SIMS, HRTEM, TEM мен MAP-EDX және теориялық әдістері қолданылды, фазалық құрылымы зерттелді. Кремний асимметриялы түрде хром нитридін және цирконий нитридін қабаттары арасындағы бөліну шекарасын алып жатқан концентрациялары 10 және 6 пайызды құрады. Екі қабаттың орташа кезеңі 26 нм құрса, ал орташа ауытқуы 1-2 нм құрады. Жабынды кремний ионымен импланттауға дейінгі кезеңде CrN қабатының қалыңдығы 16,5÷17,2 нм, ал ZrN жуық шамамен 26 нм құрады, ал импланттау нәтижесінде ZrN қабаты 35÷36 нм-ге дейін кеңейген.

**Түйін сөздер:** құрылым, катодты доға, көпқабатты жабындар, наноқабаттардың архитектурасы, иондық имплантация, интерфейсстер, диффузия, сегрегация.

**Аннотация.** В данной работе покрытие CrN/ZrN/Cr/Zr, нанесенное вакуумным катодно-дуговым методом, получено на поверхности стального пола. Показаны результаты, полученные при имплантации многослойного покрытия CrN/ZrN/Cr/Zr низкоэнергетическими ионами кремния. Используются экспериментальные SAED и XRD, HRTEM, EDS, SIMS, HRTEM, TEM и MAP-EDX и теоретические методы, изучена фазовая структура. Концентрации кремния, асимметрично занимающего границу между слоями нитрида хрома и нитрида циркония, составляли 10 и 6. Средний период двух слоев составлял 26 нм, а среднее отклонение составляло 1-2 нм. При предварительной имплантации покрытия ионами кремния толщина слоя CrN составляла 16,5÷17,2 нм, а ZrN - около 26 нм, а в результате имплантации слой ZrN расширился до 35÷36 нм.

**Ключевые слова:** структура, катодная дуга, многослойные покрытия, архитектура нанопленок, ионная имплантация, границы раздела фаз, диффузия, сегрегация.

**Abstract.** In this work, a CrN / ZrN / Cr / Zr coating applied by the vacuum cathode-arc method was obtained on the surface of a steel floor. The results obtained during the implantation of a multilayer CrN / ZrN / Cr / Zr coating with low-energy silicon ions are shown. Experimental SAED and XRD, HRTEM, EDS, SIMS, HRTEM, TEM and MAP-EDX and theoretical methods were used, the phase structure was studied. The concentrations of silicon asymmetrically occupying the boundary between the chromium nitride and zirconium nitride layers were 10 and 6. The average period of the two layers was 26 nm, and the average deviation was 1–2 nm. Upon preliminary implantation of the coating with silicon ions, the thickness of the CrN layer was 16.5 ÷ 17.2 nm, and the ZrN layer was about 26 nm, and as a result of implantation, the ZrN layer expanded to 35 ÷ 36 nm.

**Key words:** *structure, cathode arc, multilayer coatings, nanofilm architecture, ion implantation, phase boundaries, diffusion, segregation.*

*Kipicne.* Ғарышта, әуе техникасында және ядролық реакторларда жұмыс істеуге арналған заманауи құрылғылар, механизмдер мен аппарат бөлшектерінің тозуға төзімділігі, үйкеліс коэффициенті, қаттылық, коррозияға төзімділігі және тағы басқа да жоғары өнімділік қасиеттерімен бірге плазма мен сәулелену ағындарына жоғары радиациялық төзімділікті қажет етеді. Беттік модификация құралдар мен бұйымдардың қызмет ету мерзімін ұзартудың тиімді және үнемді шешімдерінің бірі екені белгілі [1]. Осыған қатты жабындарды қолдану арқылы оңай қол жеткізуге болады. Ал, жабындар тұрғысынан алғанда олардың барлық механикалық-трибологиялық параметрлері [2, 3], тозуға төзімділігі, температуралық тұрақтылығы [4], қабаттар арасындағы өзара үйлесімділіктері, соның ішінде ең бастысы зерттеуді жүргізуге себепші болған жағдай өзге жұмыстарда зерттелмегендіктен радиациялық сәулеленудің жақсы сіңіп, жұтылуы болып табылды [5].

Si иондарын импланттау – бұл иондарды араластыру үрдісінің әсерінен бөлу шекараларының «бұлыңғырлану» үрдісін күшейтетін факторлардың бірі болып табылады [6, 7]. Айта кететін болсақ, ионды импланттау әртүрлі құрамдағы иондарға әсер еткенде жұқа қабаттардағы жаңа фазалар мен құрылымдарды құрудың және бетінің геометриялық өлшемдерін өзгертпейтін әдістің бірі. Ол қолданылатын энергиясы мен дозаларына қатысты үрдістердің қайталануы мен көбеюінің жоғарғы пайызымен сипатталады. Өзге де өңдеу әдістерімен салыстырғанда модификацияланған беткі қабаттар тамаша адгезияға, тозуға төзімді, термиялық тұрақтылыққа және тағы басқа да жағдайларға төзімді келеді [8].

Мультикабаттардың элементтік құрамы CrN/ZrN нитридтері мен Cr/Zr металдардың жақсы үйлесімділігінің, сондай-ақ олардың ерекше қасиеттерінің арқасында таңдалды. Атап айтқанда, цирконий қабықшалары жылу өткізгіштігі төмен, жарыққа төзімділігі мен ионды өткізгіштігі жоғары және биосәйкестілігі бар перспективалы материалдар ретінде қарастырылады. Хром қабықшаларының механикалық қасиеттері жоғары, үйкеліс коэффициенті мен коррозияға төзімділігінің арқасында материалдарды коррозия мен тоздан жақсы қорғайды [9].

Сондықтан да, бұл жұмыста алдыға қойған мақсат нанокабатты CrN/ZrN/Cr/Zr құрылымды жабынның микроқұрылымын, элементтік құрамын, диффузиясын, сонымен бірге кремний ионымен импланттау кезіндегі сегрегация үрдісін қарастыру болып табылады.

*Материал және зерттеу әдістері.* Зерттеу материалы ретінде нанокабатты CrN/ZrN/Cr/Zr жабындары таңдалды. Эксперименттік зерттеулер Сумы мемлекеттік университетінің (Украина) және Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Veritas» озық даму орталығының ғылыми зерттеу зертханаларында, Шығыс Қазақстан университетінің «Ұжымдық қолданыстағы ұлттық ғылыми зертханасында жүргізілді.

Зерттеу жұмысын жүргізуде төсеніш ретінде өлшемі 22x20x2 мм<sup>3</sup>, тот баспайтын SUS321 болаттан жасалған төсеніш алынды. Вакуумды-доғалы үдеткіште жабынның шөгуіне дейін вакуумда үлгілердің беті 300 В дейінгі потенциалды жарқырау разрядымен тазартылып дайындалады. Тұндыру реакция газы азот жіберілген кезде құрамы Zr ~99,98, Cr ~99,98 екі металды катодпен жүргізілді.

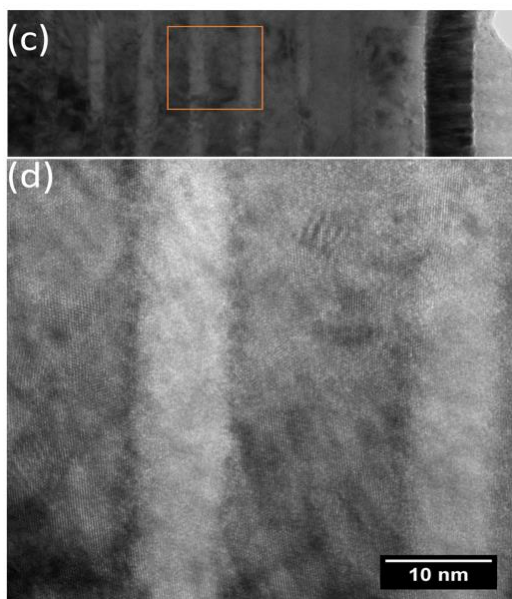
Ионды импланттау Nissin High Voltage Co Ltd [10] үдеткішінде жүргізілді. Үлгіні талдау кезінде авторлар мына әдістерді қолданды: XRD рентгендік талдау әдісін; TEM (HRTEM) жарықтандырғыш электронды микроскопия әдісін; JEOL F 2100 микроскопында электронды қуаты 200 кВ және STEM-EDX энергия дисперсиялы рентген спектро-

метрі бар электронды микроскопия мен электронды дифракция. SAED – таңдалған аймақ (электрон) дифракциясы, есептеулер жүргізу үшін молекулалық динамика, SIMS әдістері, сонымен бірге HAADF-STEM және STEM-EDX әдісі жеке жүргізілген [11-14].

Жабынның элементтік құрамын талдау үшін SIMS әдісін қолдандық. Біз зерттеу жұмысымызда CrN/ZrN/Cr/Zr наноқабатты құрылымдық жабындысының микроқұрылымын, элементтік құрамын, диффузиясын, сонымен қатар сегрегация үрдістерін анықтауда  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  мөлшеріндегі Si-мен иондау арқылы 60 кэВ энергияда имплантация жасадық. Иондар шоғырының энергиясы  $O_2^+$  2 кэВ құрады және вакуумды камераға  $1 \times 10^{-8}$  Торр қысымға дейін берілді. Ион имплантациясы 60 кэВ иондық энергиясында және  $1,36 \text{ мА/см}^2$  ток тығыздығы кезінде «Nissin High Voltage Co Ltd» үдеткішінде жүргізілді.

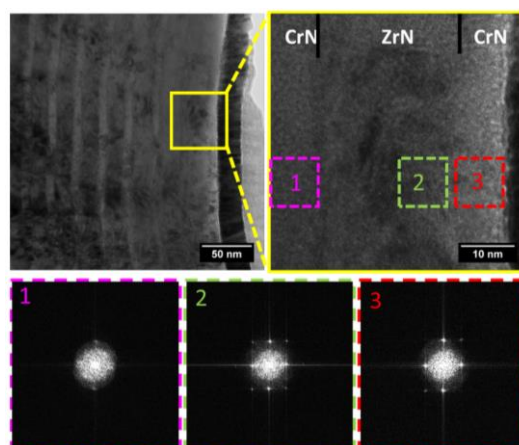
*Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау.* Тұндырылып алынған жабынның құрылымына зерттеу жүргізу үшін рентгендік фазалық талдау әдісі қолданылды. Алынған нәтижелер нанокристаллиттердің өсуі бойынша бағытталған (200) жазықтықтардың орташа қарқындылығымен (311) және (222) CrN мен ZrN қырлары центрленген текше (200) жазықтығынан басым дифракцияны көрсетеді.

1-суретте кремний ионымен имплантталмаған (1, с-сурет) және ионмен имплантталған (1, d-сурет) үлгінің көленең қимасы бойынша кремний ионымен имплантталған бөлімдерінің HRTEM және SAED кескіндері көрсетілген. HRTEM көмегімен алынған нәтижелер кремнийсіз аймақта мөлшері шамамен 10 нм болатын дәндердің дамуын көрсетті, ал имплантталған бөлікте дәндер тереңдікке байланысты біртіндеп 8-ден 4 нм өлшемге дейін таралады.



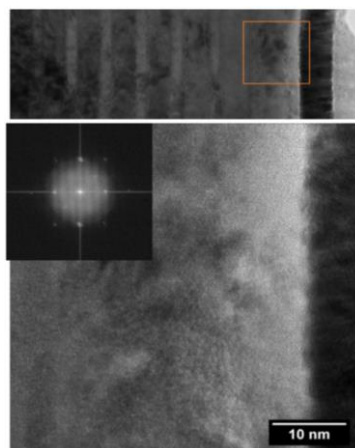
**1-сурет.** с – имплантталмаған, d – кремниймен имплантталған HRTEM және SAED көрінісі

Суреттерден көрініп тұрғандай, жабынның айқын поликристалды фазасы және дифракциялық спектрлерінде сақиналар түрінде көрінетін аймақтары бар. Дифракциялық кескіндерде CrN мен ZrN қабаттарыда айқын көрінеді, бұл осы қабаттардың релаксация үдерісінен өткендігін көрсетеді (2-сурет).



**2-сурет.** HRTEM кескіні және имплантталған CrN/ZrN жабынының таңдалған аймақтарының сәйкес келетін Фурьенің жылдам түрлендірулерінің үлгілері

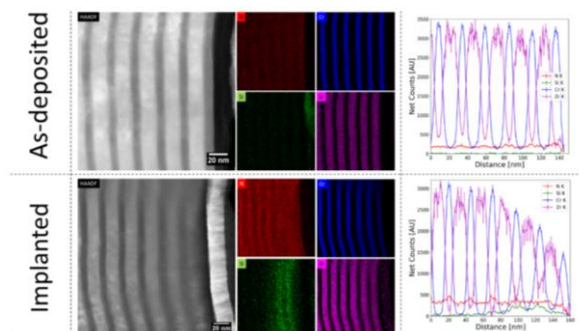
Жабынды TEM мен SAED әдістері бойынша зерттеу нәтижесі 3-суретте бетіне жақын Pt қабатының астында кремний иондарын импланттау арқылы пайда болған аморфты аймақ және карбид қышқылдарының (нитрид қышқылдарының) ішінара «иондық араласқан» қабатында аморфты аймақтың дифракциялық көрінісі байқалады, бірақ бұл аймақтың CrN мен ZrN фазаларына және қандай қабаттарына сәйкес келетінін болжау қиын. Екі қабаттың орташа кезеңі 26 нм құраса, ал орташа ауытқуы 1-2 нм құрады.



**3-сурет.** «Ион аралас» беттік қабаттың аморфталған аймағының TEM бейнесі мен SAED кескіні

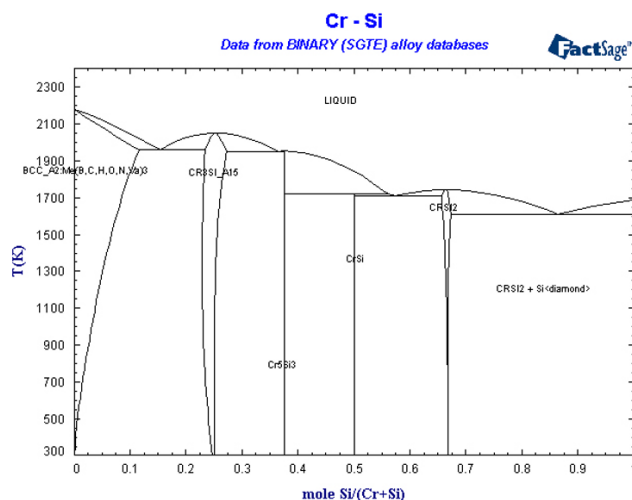
Si иондарын импланттаудан кейінгі көпқабатты наноқұрылымды жабынның бірінші қабаттарының элементтік құрамының нәтижелерін талдау (STEM, SIMS, MAP-EDX) диффузия, CrN торында кремнийдің еруі және бөліну сияқты үрдістерге байланысты бірінші қабаттар құрылымында айтарлықтай өзгерістер болғанын көрсетеді. SixNy фазасы арқылы Cr(Si)N қатты ерітіндісінің және дәннің (нано) қоршалған ортасының жоғарғы қабаттарында, дәлірек айтқанда 2 мен 3-ші қабаттарының жоғарғы жағында стехиометрия  $(Cr_{20}Si_{10}Zr_{28})N$  болады, сол кезде олардың арасындағы аралықта ZrN

кабатында стехиометрия айтарлықтай ерекшеленеді, айта кетсек  $(Cr_{20}Si_6Zr_{25})N$  және қалыңдығы 10 нм құрайды. Жабынды кремний ионымен импланттауға дейінгі кезеңде CrN қабатының қалыңдығы  $16.5 \div 17.2$  нм, ал ZrN жуық шамамен 26 нм құрады, ал импланттау нәтижесінде ZrN қабаты  $35 \div 36$  нм-ге дейін кеңейген (4-сурет).



**4-сурет.** MAP-EDX имплантталған және тұндырылған үлгілердің элементтік құрамын салыстыру

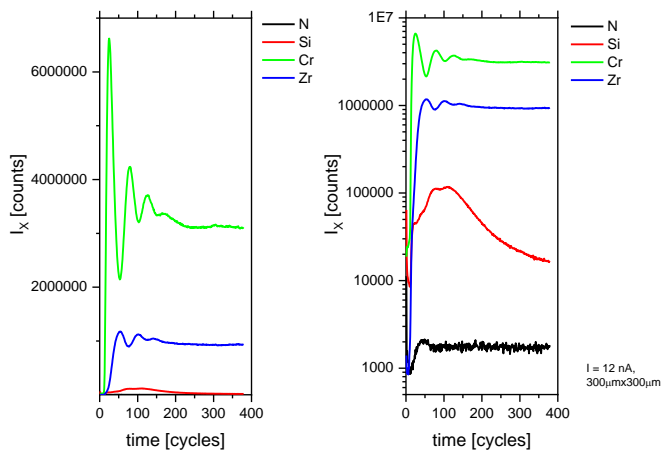
Иплантталған үлгіде азот жабын бетінен ішке қарай қайта бөлінеді және оның шоғыры бастапқыға қарағанда 2-2,5 есе жоғарылайды. Сонымен қатар Cr-Si күй диаграммасынан (5-сурет) бөлме температурасында Cr-да 10 ат. %-ке дейін кремнийдің жақсы еруін көруге болады.



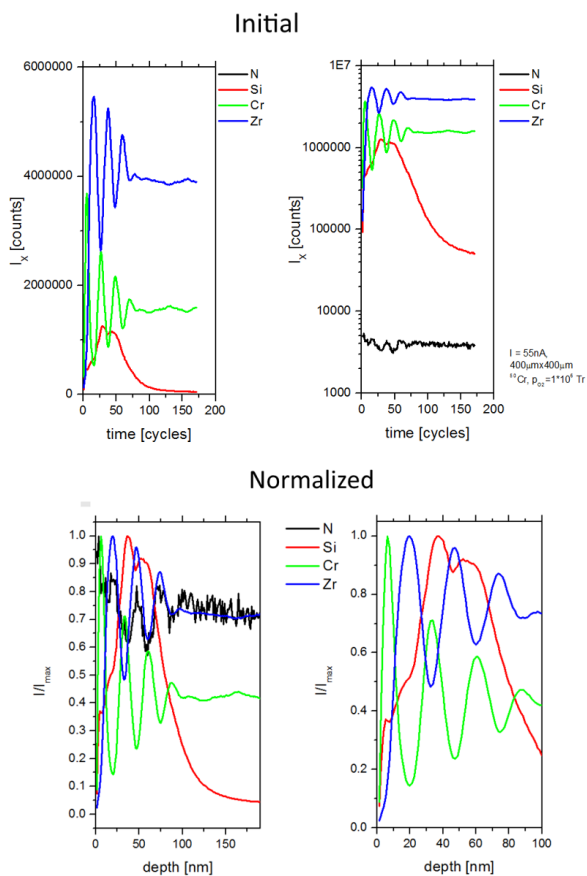
**5-сурет.** Cr-Si фазалық диаграммасы  
(екілік қорытпалардың FactSage ашық деректер базасынан қайта қаралған)

Жабындағы хром қабаттарында және бөліну шекараларында кремний бар екендігі туралы белгіні дәлелдеу үшін SIMS элементтік талдауы (жоғары дәлдікпен) жүргізіледі. Бұл (6, a, b-суретте) жабын бойымен элементтердің типтік таралуын көрсетеді. Барлық қабықша құрамының біркелкілігін тексеру үшін талдау  $300 \times 300$  мкм (5-сурет) (иондық ток 12 нА) және  $450 \times 450$  мкм (7-сурет) (иондық ток 55 нА) болатын, бірнеше жеке аудандарда жүргізіледі. Бұл  $Si^+$  тогының сигналы тереңдікте өзгеріп отырады және бұл

токтың жоғары мәндері цирконий нитридінің қабаттарына қарағанда хром нитридінің қабаттарында байқалды.



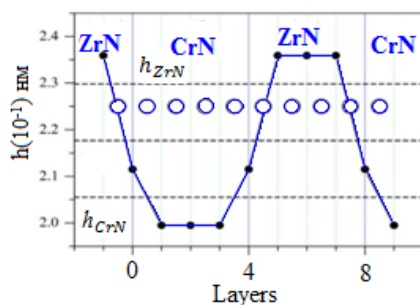
**6-сурет.** SIMS көмегімен тереңдік профилін талдау. Кратер 300 × 300 мкм. Бастапқы ионды сәуленің тогы 12 нА



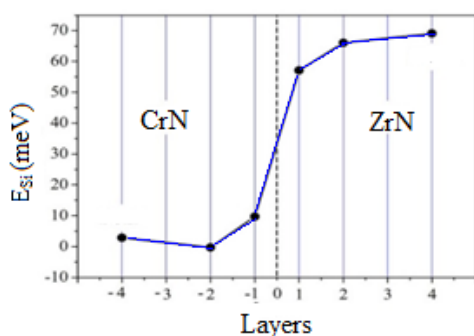
**7-сурет.** SIMS көмегімен тереңдік профилін талдау. Кратер 450 × 450 мкм. Бастапқы ион сәулесінің тогы 55 нА құрайды

SIMS әдісімен алынған профиль тереңдігі EDS сканерлеумен алынған нәтижеге карағанда үлкен, яғни 120 нм емес, 150 нм-ден жоғары екендігін көреміз. Бұл жерде негізгі себеп, кремнийдің кері көлемді таралуына байланысты ішінара эрозия болуы мүмкін, себебі терең SIMS әдісі көлеміндегі элементтер сигналдарының жергілікті тербелістеріне сезімтал. Сонымен қатар, кремнийдің екі есе бөлінуін жоғарғы қабаттар арасындағы бөліну шекараларындағы шыңдардың концентрациясымен анықтауға болады және де бұл күй диаграммасында көрсетілген. Cr-Si тепе-теңдік ығысуы туралы болжаммен жақсы үйлеседі.

Тұндырылған қабықшалардың интерфейстік қасиеттерін неғұрлым толық зерттеу үшін CrN және ZrN жаппай құрылымдарының алғашқы принциптердегі есептеулері (молекулалық динамика әдісі), сонымен қатар CrN/ZrN (001) негізіндегі суперторларға есептеулер жүргізілді. Жабын CrN/ZrN (001) ауысуында мәндері көлемді CrN және ZrN жабынындағы қабаттар арасындағы қашықтықтардың орташа мәнінен аз, бұл интерфейс айналасындағы күшті химиялық байланысты көрсетеді (8-сурет). Шынында да, CrN/ZrN (001) супертор үшін интерфейсін есептелген энергиясы  $0,269 \text{ Дж/м}^2$  болады. Бөліну шекараларының теріс энергиясы хром нитридін және цирконий нитридін кернеулік көлемімен салыстырғанда интерфейсін қалыптасуы энергетикалық тұрғыдан қолайлы екенін көрсетеді. Демек, формула бойынша есептелген қабат энергиясы  $0,745 \text{ Дж/м}^2$ , деформация энергиясының үлкен мәніне байланысты  $1,014 \text{ Дж/м}^2$  оң нәтижені береді. Демек, CrN/ZrN (001) суперторлары торлардың сәйкес келмеуі нәтижесінде деформация энергиясының көп жиналуына байланысты метақалыпты болады (9-сурет).



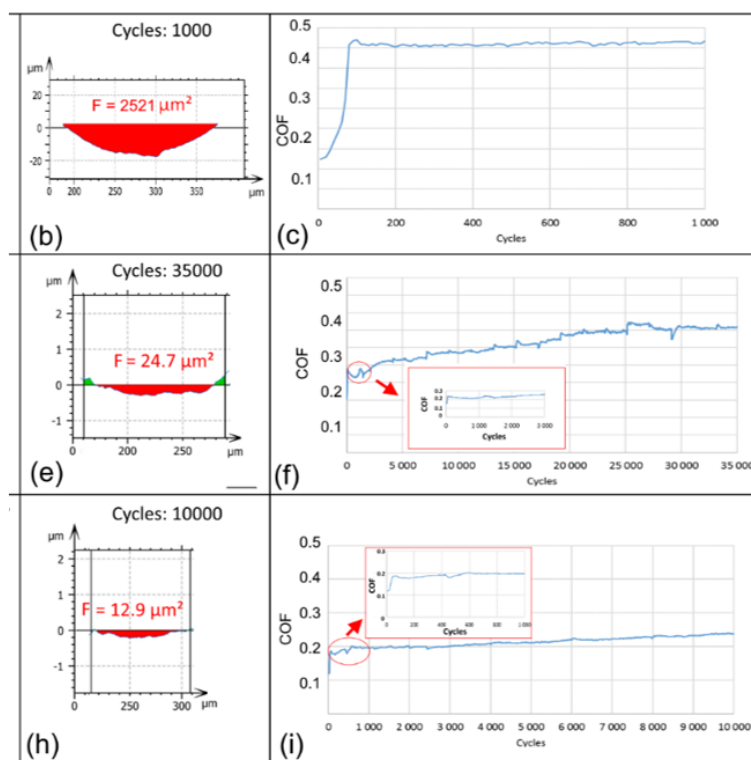
**8-сурет.** Қабаттар арасындағы қашықтық ( $h$ ) (001) бағытында. Үлкен ақ шеңберлер (001) бағыты бойынша атомдар тізбегін білдіреді. Нүктеленген көлденең сызықтар CrN ( $h_{CrN}$ ), ZrN ( $h_{ZrN}$ ) және  $h_{AV} = 1/2 (h_{CrN} + h_{ZrN})$  көлемдегі аралық қабаттарын білдіреді



**9-сурет.** 128 атомдық CrN/ZrN (001) гетероқұрылымдарында (001) бағытына перпендикуляр әртүрлі қабаттардағы металл атомын кремний атомына алмастыру энергиясы



Зерттеу барысында тозған бұйымдарға, сонымен бірге зерттелетін жабындылардың бетіндегі тозу ойықтарының құрылымын зерттеу мен шариктегі тозу дақтарының өзгерісін анықтау арқылы талдау жүргізілді. Кремний бөлшектерінің CrN/ZrN жабындысының тозуға қарсы тұру қабілетіне әсерін тексеру үшін жасалды. 10-суретте трибологиялық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Имплантталмаған жабынға қарағанда кремний иондарымен имплантталған жабынның тозуға төзімділік қабілеті шамамен үш сатыға жоғары болды.



**10-сурет.** Трибологиялық тестілеудің нәтижесі:

b, e, h – тозуы бар іздер; c, f, i – үйкеліс ауытқуларының орташа коэффициенттері

Үйкелістің орташа коэффициенті 0,25-0,37-ден 0,19-0,22 аралығында болады. Тозудың екі жолындағы тозу аймағындағы жылжымалы бағытта ешқандай ақаудың болмағанын көрсетеді.

*Қорытынды.* Бұл жұмыста қалың нитридті қабаттары бар және жұқа металл қабаттары бар көпқабатты нанокұрылымды (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) жабындары зерттелді. Беткі және көлденең қимасын зерттеу Cr, Zr, CrN және ZrN қабықшаларының тегіс қабаттармен және олардың арасындағы жақсы анықталған бөліну шекаралары сапалы жабынның алынғанын көрсетті.

Бұл зерттеу кремний ионымен импланттаудың CrN/ZrN наноқабаттарының микроқұрылымына, құрамына және тозуға төзімділігіне әсері туралы алғашқы нәтижелерді ұсынды. SRIM есептеулері, STEM-EDS және SIMS көмегімен құрамын өлшегенде алынған нәтижелер көрсеткендей, 2 және 3 қосқабаттар арасындағы шекарада иондардың тиімді диапазоны 10 ат. % Si концентрациясы бар 60 нм өлшемінен асатынын көрсетеді.



Алынған жабынды кремний ионымен импланттауға дейін CrN қабатының қалыңдығы 16.5÷17.2 нм, ал ZrN жуық шамамен 26 нм құрады, ал импланттау нәтижесінде ZrN қабаты 35÷36 нм-ге дейін кеңейген. Имплантталған үлгіде азот жабын бетінен ішке қарай қайта бөлінеді және оның шоғыры бастапқыға қарағанда 2-2,5 есе жоғарылайды. Сонымен қатар Cr-Si күй диаграммасынан бөлме температурасында Cr-да 10 at. %-ке дейін кремнийдің жақсы еруін көруге болады.

Үйкелістің орташа коэффициенті 0,25-0,37-ден 0,19-0,22 аралығында болады. Тозудың екі жолындағы тозу аймағындағы жылжымалы бағытта ешқандай ақаудың болмағанын көрсетеді. Қорытындылай келе, кремний ионымен импланттау әдісі құралдың ұзақ уақыт бойы жұмыс істеу сапасын арттырып, тозуға беріктігін жоғарылатады.

CrN/ZrN (001) гетероқұрылымының түзілу энергиясы алғашқы принциптерден есептеу көрсеткендей, хром мен цирконийдің тетрагональды деформацияланған көлемді нитридтерімен салыстырғанда интерфейстердің пайда болуы энергетикалық тұрғыдан тиімді. Дегенмен, түзілу энергиясы оң болды, бұл CrN/ZrN (001) суперторлардың сәйкес келмеуі нәтижесінде деформация энергиясының көп жиналуына байланысты метақалыпты болуы керек екенін көрсетеді.

Бұл жұмыс Украинаның мемлекеттік бюджеттік бағдарламасымен қолдау тапты [№0119U100787 және 0120U100475 гранттар]. Авторлар Сумы мемлекеттік университетінің докторы Александр Бондарға кейбір эксперименттер жүргізуге және нәтижелерді талқылауға көмектескені үшін алғыс айтады. Авторлар Microscopy Australia компаниясы қолдайтын жабдықты Сиднейдегі Марк Уэйнрайт (MWAC) аналитикалық орталығының электронды микроскоп (EMU) бөлімінде жүргізілгенін растайды.

Бұл жұмыс 2018 жылғы 16-наурызда №197 келісімшарты «Машина жасау өнімі үшін тозуға төзімді материалдар өндірісінің инновациялық технологияларын зерттеу және әзірлеу (Исследования и разработка инновационных технологий получения износостойких материалов для изделий машиностроения)» Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің ПЦФ қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды.

#### Әдебиеттер тізімі

1. Surface modification of stainless steel for biomedical applications: revisiting a century-old material. A.Bekmurzayeva, W.J. Duncanson, H.S. Azevedo, D. Kanayeva // Mater. Sci. Eng. C 93 (2018) 1073-1089
2. Hardness and tribology measurements on ZrN coatings deposited by reactive sputtering technique. M.A. Auger, J.J. Araiza, C. Falcony, O. Sánchez, J.M. Albella // Vacuum.81.2007; 1462-1465.
3. Enhancing mechanical and tribological performance of multilayered CrN/ZrN coatings. J.J. Zhang, M.X. Wang, J. Yang, Q.X. Liu, D.J. Li// Surf. Coatings Technol. 201. 2007; 5186–5189.
4. Microstructural evolution of nanochannel CrN films under ion irradiation at elevated temperature and post-irradiation annealing. J. Tang, M. Hong, Y. Wang, W. Qin, F. Ren, L. Dong, H. Wang, L. Hu, G. Cai, C. Jiang J. Nucl.// Mater. 500 (2018) 242–251.
5. A study on the corrosion resistance of ZrN/CrN multilayer nanostructured coating applied on AISI 304 stainless steel using Arc-PVD method in 3.5 wt% NaCl solution. P. Mohamadian Samim, A. Fattah-alhosseini, H. Elmkhah, O. Imantalab // Mater. Res. Express. 6 (2019) 126426. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5ab6>.
6. The study of multilayer coatings based on MoN(MoZr)ZrN and (TiMo)N/(TiMo), (CrZr)N/(CrZr) obtained by the method of vacuum-arc deposition. R.E.Sakenova, N.K. Erdybaeva, A.D. Pogrebnyak, M.K. Kylyshkanov // Bulletin o the Karaganda university PHYSICS Series. – 2019. – № 2(94). – P. 14-21.
7. Сакенова Р.Е., Погребняк А.Д., Қылышқанов М.Қ. (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) негізіндегі көп қабатты жабынның микроқұрылымы мен элементтік құрамы. // Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТУ Хабаршысы. – Алматы, 2020. – № 3(139). – С. 615-622.
8. Ion Mixing. S. Matteson, M.A. Nicolet // Annu. Rev. Mater. Sci. 13. 1983;339-362.

9. Antibacterial Effect of Au Implantation in Ductile Nanocomposite Multilayer (TiAlSiY)N/CrN Coatings. A. D. Pogrebnyak, C.H. Kong, R. F. Webster, R. D. Tilley, Y. Takeda, K. Oyoshi, O. V. Bondar, V. V. Buranich, S. V. Konstantinov, L. S. Baimoldanova, M. Opielak, P. Zukowski, P. Konarski // ACS Appl. Mater. & Interfaces. 11. 2019;48540-48550.
10. High-Current Heavy-Ion Accelerator System and Its Application to Material Modification. Kishimoto, N.; Takeda, Y.; Lee, C.-G.; Umeda, N.; Okubo, N.; Iwamoto, E. // Jpn. J. Appl. Phys. 2001, 40 (Part 1, No. 2B), 1087–1090.
11. Nanoscale Architecture of (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) Nanocomposite Coatings: Microstructure, Composition, Mechanical Properties and First-Principles Calculations. Maksakova, O. V.; Webster, R. F.; Tilley, R. D.; Ivashchenko, V. I.; Postolnyi, B. O.; Bondar, O. V.; Takeda, Y.; Rogoz, V. M.; Sakenova, R. E.; Zukowski, P. V.; Opielak, M.; Beresnev, V. M.; Pogrebnyak, A. D. // J. Alloys Compd. 2020, 831, 154808.
12. Сакенова Р.Е., Ердыбаева Н.К., Погребняк А.Д., Қылышқанов М.Қ. Вакуумды-доғалық әдіспен алынған көп қабатты жабындардың құрылымы мен қасиеттері. // Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университетінің хабаршысы. – Өскемен, 2019. – № 4(86). – С.144-151.
13. Nanoscale Architecture of (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) Nanocomposite Coatings: Microstructure, Composition, mechanical properties and first-principles calculations. O.V. Maksakova, R. F. Webster, R. D. Tilley, V. I. Ivashchenko, B. O. Postolnyi, O. V. Bondar, Y. Takeda, V. M. Rogoz, R.E.Sakenova,P.V. Zukowski, M. Opielak, V. M. Beresnev, A.D. Pogrebnyak // Journal of Alloys and Compounds. – Volume 831. – 154808.2020.– P. 1-15. ISSN: 0925-8388, IF=4,175
14. Сакенова Р.Е., Ердыбаева Н.К., Погребняк А.Д. ZrN/CrN/ZrCr/ZrN/CrN көп қабатты композиттік жабынды зерттеу әдістері // Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университетінің хабаршысы. – Өскемен, 2020. – № 2(88). – С.175-180.

---

АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК. АҚПАРАТТЫ ҚОРҒАУ  
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ  
INFORMATION SECURITY. INFORMATION PROTECTION

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_82  
MPHTI 81.93.29

**А.Т. Тохметов, А.С. Амирова, А.С. Жанасбаева**  
Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева  
E-mail: whitesilk@mail.ru

**ӨНДІРІСТІК ЗАТТАР ИНТЕРНЕТІНІҢ НЕГІЗГІ ҚАУІПСІЗДІК МӘСЕЛЕЛЕРІНЕ ШОЛУ**  
**ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОМ**  
**ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ**  
**OVERVIEW OF THE MAIN SECURITY ISSUES IN THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS**

**Аңдатпа.** Заттардың өндірістік Интернетінің (IIoT) қарқынды дамуымен жылдам өрекет ету, интрузияларды анықтау және алдын-алу қажеттілігі туындады. IIoT желілері арнайы функцияларға ие және кибершабуылдан қорғауда өрекше қиындықтарға тап болады. Бұл проблемалар, әсіресе IIoT пайдаланушыларының болжамды өсуімен байланысты. Бұл мақалада біз 2018 жылдан 2020 жылға дейін, өнеркәсіптік Интернет заттарында машиналық оқыту алгоритмдері мен блокчейн әдістерін қолдана отырып, қауіпсіздік мәселелерін шешуге бағытталған зерттеулерді қорытындылаймыз. Біріншіден, біз индустриалды IoT саласында соңғы бірнеше жылда айтылған әр түрлі таксономияларды талқылаймыз. Сонымен қатар біз IIoT-да қауіпсіздіктің негізгі аспектілерін зерттейміз. Содан кейін біз IIoT доменіндегі машиналық оқыту алгоритмдері мен блокчейн әдістеріне негізделген қауіпсіздік шешімдері туралы әдебиеттерді талдаймыз. Соңында, заттардың өнеркәсіптік интернетіндегі қауіпсіздік мәселелерін шешу үшін машиналық оқыту алгоритмдерін және ВС техникасын қолдана отырып, бірнеше қиындықтар мен болашақ зерттеу бағыттарын анықтаймыз.

**Түйін сөздер:** процестерді басқарудың автоматтандырылған жүйесі (APCS), блокчейн (BC), заттардың өндірістік интернеті (IIoT), машиналық оқыту (ML), қауіпсіздік, қауіп-қатер.

**Аннотация.** В связи с развитием промышленного Интернета вещей (IIoT) возникла необходимость быстро реагировать, обнаруживать и предотвращать вторжения. Сети IIoT имеют особые функции и сталкиваются с уникальными проблемами в защите от кибератак. Эти проблемы особенно актуальны с учетом прогнозируемого роста пользователей IIoT.

В этом документе мы резюмируем исследования, проведенные с 2018 по 2020 год, для решения проблем безопасности с использованием алгоритмов машинного обучения и технологий блокчейна в промышленном Интернете вещей. Во-первых, мы обсуждаем различные таксономии, о которых сообщалось за последние несколько лет в области промышленного Интернета вещей. Также мы изучаем ключевые аспекты обеспечения безопасности в IIoT. Затем мы анализируем литературу о решениях безопасности, основанных на алгоритмах машинного обучения и методах блокчейна в области IIoT. Наконец, мы выявляем и выделяем несколько проблем и будущих направлений исследований с использованием алгоритмов машинного обучения и методов BC для решения проблем безопасности в промышленном Интернете вещей.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления процессами (APCS), блокчейн (BC), промышленный Интернет вещей (IIoT), машинное обучение (ML), безопасность, угрозы.

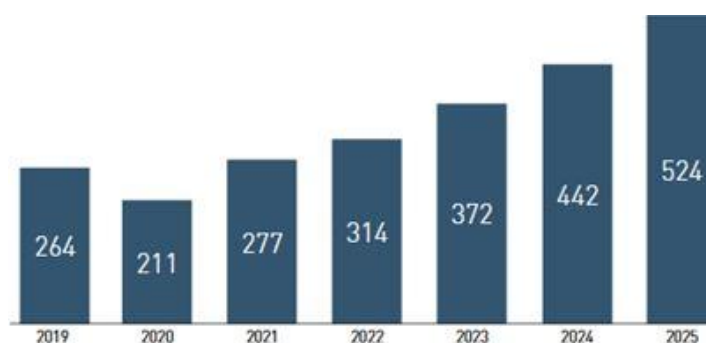
**Abstract.** With the rapid development of the industrial Internet of Things (IIoT) the need to respond quickly, detect and prevent intrusions has arisen. IIoT networks have special functions and face unique challenges in defending against cyber attacks. These problems are especially relevant as the predicted growth of IIoT users.

In this document, we summarize the research undertaken over the past few years, from 2018 to 2020, to address security challenges using machine learning algorithms and blockchain techniques in the Industrial Internet of Things. First, we discuss various taxonomies that have been reported over the past few years in the Industrial IoT field. Also we study key aspects of securing in IIoT. Then we analyze the literature on security solutions based on machine learning algorithms and blockchain techniques in the IIoT domain. Finally, we identify and highlight several challenges and future research directions using machine learning algorithms and BC techniques to address security challenges in the Industrial Internet of Things.

**Keywords:** Automated Process Control System (APCS), blockchain (BC), Industrial Internet of things (IIoT), machine learning (ML), security; threats.

**Введение.** Промышленный Интернет вещей – это система взаимосвязанных компьютерных сетей и подключенных к ним промышленных объектов со встроенными датчиками и программным обеспечением для сбора и обмена данными, с возможностью удаленного контроля и управления в автоматическом режиме без вмешательства человека. IIoT позволяет создавать отрасли более экономичные, гибкие и эффективные, чем существующие. Для развития IIoT проблема обеспечения адекватного уровня кибербезопасности остается, пожалуй, единственным существенным препятствием.

Согласно Market Data Forecast, мировой рынок промышленного Интернета вещей (включая оборудование, датчики, датчики, роботизированные системы, платформы, программное обеспечение и услуги) в 2019 году достиг 264,22 миллиарда долларов. С 2021 по 2025 годы он будет расти в среднем на 18,7 процентов (рис. 1). К 2025 году его объем составит 622 миллиарда долларов. В связи с пандемией коронавируса рост рынка в 2020 году скорректирован и составил 0 процентов с 2019 года [1]. По словам Honeywell, основной тенденцией, связанной с развитием промышленных экосистем Интернета вещей, является привлечение лицензиаров и производителей промышленного оборудования к разработке приложений на основе существующей инфраструктуры IIoT, которые впоследствии могут быть размещены в магазине/торговых площадках приложений. Эти приложения повысят мобильность и продуктивность сотрудников на предприятии, а также помогут решить узкоспециализированные задачи повышения эффективности [2].



**Рисунок 1.** Динамика мирового рынка промышленного Интернета вещей (млрд долларов США) [1]

Согласно опросу компании Accenture, проведенному среди 1400 руководителей высшего звена во всем мире, вклад промышленного Интернета вещей (IIoT) в мировую экономику к 2030 году составит порядка 14 триллионов долларов США. Внедрение технологий IIoT за тот же период может добавить до 6 триллионов долларов в ВВП США и не менее 70 миллиардов долларов в экономику Германии. Исследование Accenture показывает, что перспективы и влияние промышленного Интернета вещей еще не ясны для крупного бизнеса. Отсутствие планов использования таких технологий во многом связано с их сложностью с потенциальной доходностью [3].

Эти прогнозы дополнительно подчеркивают сложности, связанные с обеспечением безопасности IIoT. Несмотря на то, что большое количество промышленных устройств было переведено на использование более безопасных методов связи, большинство этих устаревших систем по-прежнему полагаются на устаревшие протоколы. Эта ситуация сохраняется, несмотря на то, что общественность знает об присущих им уязвимостях из-за отсутствия каких-либо требований к идентификации или аутентификации.

Однако система IIoT имеет ряд серьезных проблем. Сложность системы является наиболее серьезной проблемой, поскольку операции IIoT различаются, а гибкая интеграция между устройствами отсутствует. Существуют разные устройства с разным дизайном, развертыванием и услугами, поэтому любые недостатки программного или аппаратного обеспечения могут вызвать серьезные проблемы. В сети IIoT есть проблемы с аутентификацией и контролем доступа, поскольку смарт-объекты представляют собой разнородные устройства, основанные на разных платформах (аппаратных средствах и сетях). Более того, все устройства должны связываться с другими устройствами по разным сетям. Таким образом, IIoT требует механизма безопасности более высокого уровня, который учитывает требования к срокам, количеству устройств в сети, механизм восстановления в случае атаки и тому подобные факторы.

В первой половине 2020 года атакам подверглись многие промышленные системы по всему миру. Например, 23 апреля Национальное управление кибербезопасности Израиля (INCD) опубликовало уведомление о попытках атак на системы SCADA на очистных сооружениях, водонасосных станциях и канализационных сетях. В качестве меры по предотвращению вторжений водохозяйственным и энергетическим организациям было рекомендовано срочно изменить пароли для всех систем, подключенных к Интернету. 7 мая 2020 года швейцарский производитель поездов Stadler объявил о кибератаке на свои промышленные объекты. Некоторые компьютеры в корпоративной сети были заражены вредоносным ПО, и данные с этих устройств были похищены. Злоумышленники связа-

лись с представителями компании и потребовали выкуп, угрожая опубликовать украденную информацию в случае неуплаты. 14 мая крупная британская электроэнергетическая компания Elexon объявила о заражении своих ИТ-систем вредоносным ПО. В результате атаки пострадали только внутренние системы ИТ-сети компании, включая почтовую систему, и ноутбуки. Ключевые информационные службы и системы электроснабжения не пострадали от кибератаки [4].

*Вклад статьи:* В этой статье представлен подробный обзор алгоритмов машинного обучения и методов ВС, используемых для защиты приложений ПоТ от атак. Насколько нам известно, это первая статья, в которой представлен обзор уязвимостей безопасности в среде ПоТ и меры борьбы с ними, основанные на алгоритмах машинного обучения и методах ВС.

- Мы предоставляем таксономию угроз для Интернета вещей, о которых сообщается в недавней литературе, на основе угроз безопасности.

- Мы изучаем ключевые аспекты безопасности в ПоТ.

- Мы классифицируем обзоры литературы по алгоритмам машинного обучения и методам ВС для безопасности ПоТ и выделяем пробелы в исследованиях в существующих обзорах литературы.

- Мы выделяем и обсуждаем существующие проблемы для алгоритмов машинного обучения и методов ВС в безопасности ПоТ с попыткой предложить некоторые направления на будущее.

Остальная часть статьи организована следующим образом. В разделе 2 представлена таксономия известных угроз ПоТ, а также обсуждаются некоторые ключевые аспекты защиты в ПоТ. В разделе 3 мы классифицируем обзоры литературы по безопасности ПоТ с использованием алгоритмов машинного обучения и методов ВС. Наконец, в разделе 4 мы завершаем представление пробелов с некоторыми направлениями на будущее.

*Материалы и методы исследования.* Таксономия атак помогает понять и классифицировать инциденты безопасности [5]. Симмонс разработал таксономию кибератак AVOIDIT [6], которая имеет пять измерений: а именно вектор атаки, оперативное воздействие, защиту, информационное воздействие и цель. Эта таксономия могла легко классифицировать кибератаки, но не смогла классифицировать атаки в Industrial IoT, поскольку в нем отсутствовали векторы физических атак, которые открыты в промышленных атаках. Таксономия междоменных атак на киберпроизводственные системы была разработана Мингтао Бу [5] и имеет четыре аспекта, а именно атаку. Авторы в [7] предложили таксономию, которая может быть полезна при классификации атак на ПоТ. Отличие от [5] заключается во включении вредоносного ПО вектора атаки, которое содержит различные типы вредоносного кода. Эта таксономия состоит из четырех измерений, которые раскрывают информацию о том, как была проведена атака, какие компоненты были затронуты и чего удалось достичь злоумышленнику.

В нашей статье мы будем рассматривать только первое измерение – вектор атаки. Это измерение - путь или средство, с помощью которого злоумышленник может получить доступ к компьютеру или сети. Векторы атак подразделяются на кибератаки и физические атаки. Векторы кибератак содержат точки входа в ИТ-сети, к которым не требуется физический доступ, тогда как векторы физических атак требуют, чтобы злоумышленник взаимодействовал с устройством или людьми в отрасли. Мы считаем, что в таксономии следует выделить еще один вектор – атаки с использованием ложных данных (FDI). Среди различных возникающих проблем безопасности FDI-атака является одной из наиболее существенных, которая может значительно увеличить стоимость процесса распределения энергии (рис. 2).



Рисунок 2. По Т атаки

Выход из строя АСУ ТП может замедлить производство на несколько часов, нанести миллионы материальных убытков и даже больше. Например, перезапуск открытой печи или котла емкостью 10 000 галлонов, который обрабатывает коррозионные химикаты, может иметь разрушительные физические последствия [9].

Автоматизированная производственная среда с постоянной доступностью и надежной работой должна быть безопасной для обслуживающего персонала и остальной окружающей среды. Устройства, приложения и операционные системы, подключенные к промышленным сетям, редко обновляются, потому что для их исправления или обновления может потребоваться выключение целых систем.

Попытки снизить риски информационной безопасности промышленных сетей путем развертывания межсетевых экранов, систем IPS и т.д. Приводят к неприемлемым и даже разрушительным результатам. Такие инструменты информационной безопасности должны быть специально разработаны с учетом используемых протоколов, коммуникаций и сервисов, чтобы обеспечить их безопасность и доступность.

При проектировании доступность и безопасность промышленной сети должны быть обеспечены на высшем уровне, чтобы система безопасности не встраивалась в готовую инфраструктуру. Если в проекте не применяется интегрированная стратегия информационной безопасности, а делается попытка защитить каждый компонент инфраструктуры отдельно, система безопасности может оказаться неэффективной и даже уязвимой. Например, в системах автоматизации зданий комплексный, сегментированный и многоуровневый подход не только обеспечивает безопасность системы кондиционирования на уровне ее блокировки, но и путем предоставления аналитики и контроля в реальном времени комплексную защиту других систем, таких как система пожаротушения.

Путь к обеспечению безопасности современной промышленной среды начинается с непрерывного мониторинга – видимости любых процессов, происходящих в контролируемых системах. Решения для управления доступом к промышленной сети могут помочь в ин-

вентаризации и мониторинге устройств IoT, включая отслеживание каждого подключенного устройства, даже когда оно перемещается из одного места в другое. Чтобы установить контроль в промышленной среде, необходимо прежде всего определить и записать, каким будет нормальный профиль трафика для данной системы и какие функции будут обеспечивать в реальном времени реакцию на любое поведение, выходящее за пределы нормального диапазона. К счастью, поведение устройств в промышленной среде по своей природе довольно статично и предсказуемо, поэтому ненормальные ситуации, вероятно, будут обнаружены быстро.

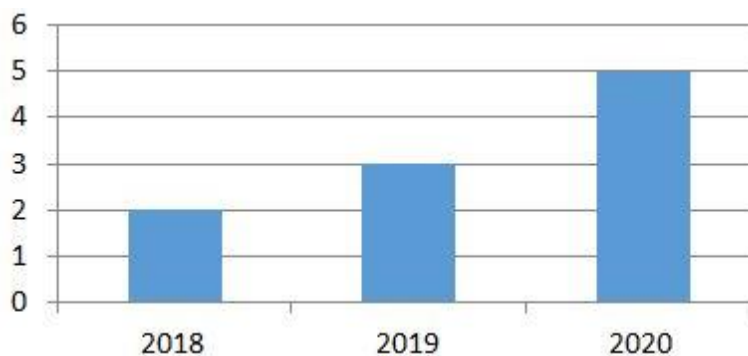
Мониторинг сетевых устройств IoT – это первый шаг к защите промышленных сетей. Это помогает идентифицировать и документировать каждое новое устройство, подключенное к сети, и отслеживать изменения в их профилях [10].

Однако опрос устройств в промышленной сети намного сложнее, чем в ИТ-сетях, потому что активное сканирование здесь неприменимо из-за возможности нарушения нормального функционирования подключенных устройств IoT. Поэтому сбор данных в промышленных сетях должен осуществляться максимально пассивно. Один из способов решения проблемы - предназначен для сбора информации с сетевых устройств, а не с самих устройств ICS. Даже после обнаружения зараженного устройства ситуация остается сложной. Вы не можете, например, автоматически поместить его в карантин, поскольку последствия отключения от производственных процессов непредсказуемы. Это означает, что группа информационной безопасности должна работать в тесном контакте со специалистами, обслуживающими промышленную сеть, чтобы определить варианты возможного вмешательства.

Сегментация - еще одна важная стратегия защиты промышленной среды. Как и в случае с ИТ-сетями, это подразумевает разделение север / юг и восток / запад. ISO 99 описывает подходы к сегментации для промышленных сред [11].

Сегментация Север / Юг. Даже если промышленные и ИТ-сети сближаются, они должны оставаться максимально изолированными друг от друга. Это помогает решить две основные проблемы в промышленной сети – инсайдерскую активность и распространение червей. Если эти сети соединены между собой по одному периметру, промышленные системы могут непреднамеренно столкнуться с проблемами, возникающими в результате обычной ИТ-деятельности, например, активного сканирования ИТ-трафика для определения его источника и назначения. Как уже было сказано, это совершенно неприемлемо для многих устройств IoT. Для защиты от злонамеренного или непреднамеренного взлома важно, чтобы трафик промышленной сети был полностью отделен от трафика ИТ. Даже при обновлении или исправлении промышленных систем следует избегать прямого подключения к Интернету или ИТ-сети.

*Решения безопасности на основе блокчейн и машинного обучения в IIOT.* В этом разделе представлен обзор существующей литературы и классифицируются усилия, принятые на основе алгоритмов машинного обучения и методов ВС, для обеспечения безопасности IoT. Этот раздел разделен на два подраздела: алгоритмы машинного обучения и методы ВС. Сборник статей. Первоначально поиск проводился по ключевым словам. Такие ключевые слова, как IoT, промышленный Интернет вещей, безопасность, угрозы, машинное обучение и блокчейн, использовались для загрузки последних статей из ведущих журналов и конференций. Статья должна была удовлетворять следующим условиям: опубликована в период с 2018 по 2020 год (включительно); анализирует угрозы безопасности, связанные с IoT, и охватывает ML или ВС как вычислительную парадигму. Статистика отбора статей по годам (рис.3) показывает, что большая часть работы началась совсем недавно.



**Рисунок 3.** Годовая статистика выбранных исследовательских работ с 2018 по 2020 год включительно

Существующие обзорные статьи с использованием алгоритмов машинного обучения в качестве решения:

– Yao и др. предложили новую гибридную архитектуру IDS для периферийного IoT, в которой новый алгоритм машинного обучения и алгоритм глубокого обучения используются в сети нижнего уровня и сети верхнего уровня соответственно [12]. Они использовали новый алгоритм машинного обучения LightGBM 1 для обнаружения вторжений в исходные данные и повысили точность обнаружения на основе отсутствия увеличения затрат времени, что можно рассматривать как быстрое, распределенное и высокопроизводительное решение древовидная структура подъема градиента.

– Aboelwafa и др. представили подход на основе машинного обучения применяется для обнаружения атак с использованием ложных данных (FDI). Этот метод основан на использовании автоэнкодеров, представляющих собой тип нейронных сетей, которые оказались очень эффективными при обнаружении аномалий. Данный метод предлагает лучшую производительность обнаружения по сравнению с методами на основе SVM [13].

– Авторы в [14] предложили новую структуру под названием PriMod-Chain, которую можно использовать для надежного машинного обучения и совместного использования в среде IoT. PriModChain объединяет концепции смарт-контрактов, блокчейна, федеративного обучения (FedML), дифференциальной конфиденциальности и IPFS для обеспечения конфиденциальности и надежности машинного обучения в IoT. Федеративное обучение использовалось в качестве глобального подхода к объединению и совместному использованию моделей машинного обучения, в то время как DP обеспечивает конфиденциальность моделей машинного обучения. Интеграция смарт-контрактов и EthBC обеспечивает отслеживаемость, прозрачность и неизменность структуры. IPFS обеспечивает неизменность, малую задержку и быстрое децентрализованное архивирование с безопасной доставкой контента P2P.

– Zolanvari et al. в своей работе изучали случаи, когда современные алгоритмы машинного обучения не обеспечивают требуемый уровень безопасности, в частности проблема несбалансированного набора данных в IoT [15].

– Qiao et al. проанализировали подходы на основе машинного обучения к обнаружению аномалий в сетях промышленной автоматизации. Они представили подход, который отслеживает активность фабричного сетевого трафика на основе двух алгоритмов линейного выделения признаков, то есть линейного дискриминантного анализа (LDA) и анализа главных компонент (PCA) [16]. Результаты экспериментов показали осуществимость предложенного метода по точности, частоте обнаружения и частоте ложных тревог.



Существующие обзорные документы, использующие блокчейн в качестве решения:

– Rigi et al. сосредоточены на Индустрии 4.0 или ПоТ и на том, как к ней можно применить архитектуру блокчейн [17]. Также они отметили, что безопасность имеет решающее значение для ПоТ, и есть несколько приложений, требующих более высокого уровня безопасности.

– Авторы в [18] использовали инновационную архитектуру ПоТ на основе блокчейнов, чтобы помочь построить более безопасную и надежную систему ПоТ. Они модернизировали существующую платформу автоматического производства, чтобы обсудить улучшения по сравнению с традиционной архитектурой ПоТ. Предлагаемая архитектура может достичь большего расширения в будущем, например, за счет интеграции смарт-контрактов, достигая автоматической конфигурации ресурсов; через распределенную систему может быть реализовано дистанционное онлайн-обновление всего оборудования.

– Блокчейн Fabric предлагается использовать для безопасной передачи данных в [19]. Сертификаты транзакций используются для защиты передачи данных, а вновь добавленные блоки аутентифицируются для обеспечения безопасности. Без сертификатов транзакции остаются недействительными. Данные остаются неизменными, если один узел будет взломан из-за использования алгоритма хеширования. Безопасность транзакций данных обеспечивается за счет использования пары открытого / закрытого ключей.

– В [20] Yeasmin et al. использовал разрешенный блокчейн, позволяющий использовать ПоТ для устранения уязвимостей безопасности ПоТ с точки зрения защищенной связи устройств, сервера, совместного использования данных и механизма контроля доступа. Использование компонента СА, смарт-контракта и узлов консенсуса, а также выполнение ограниченных транзакций в разрешенной цепочке блоков обеспечивает конфиденциальность и безопасность во всей сети. Он также изучает важность ПоТ с разрешенной блокчейном по сравнению с общедоступным, который обеспечивает и гарантирует безопасность сети.

– Sani предложили Xugeum - новый высокопроизводительный и масштабируемый блокчейн для повышения безопасности и конфиденциальности ПоТ. Xugeum использует основанное на времени доказательство знаний с нулевым разглашением (Т-ZКРК) с аутентифицированным шифрованием для выполнения взаимной многофакторной аутентификации (ММФА). Свойства Т-ZКРК также используются для поддержки установления ключа (КЕ) для защиты транзакций [21].

*Заключение.* В этой статье мы рассмотрели последние угрозы для ПоТ и проанализировали различные атаки ПоТ. Кратко описаны их эффекты, типы, слой воздействия. Затем мы всесторонне представили последний существующий обзор литературы по безопасности ПоТ с использованием алгоритмов машинного обучения, а также методов блокчейна. В этом документе представлены текущие решения для безопасности ПоТ с использованием алгоритмов машинного обучения и технологий ВС. Генерация, хранение, анализ и передача данных имеют фундаментальное значение для экосистемы ПоТ. Требуется целостный подход, при котором необходимо создать систему, свободную от уязвимостей, с помощью таких мер, как соблюдение передовых практик и постоянное тестирование. Система должна быть способна учиться и адаптироваться к последним тенденциям в области угроз (атаки нулевого дня), поскольку вредоносные действия являются динамическими. В этом отношении ML / DL может быть чрезвычайно полезным при анализе трафика. В тоже время ВС может служить основой для ведения реестра журналов и обмена данными в среде IoT. Эта работа выявляет множество исследовательских возможностей в области безопасности ПоТ и показывает, что машинное обучение и блокчейн могут стать мощными инструментами в обеспечении безопасности различных связанных про-

мышленных сред, если будут преодолены его ограничения и проблемы. В настоящее время интеграция алгоритмов машинного обучения с методами ВС для обеспечения безопасности ИИТ является относительно новой областью, требующей дальнейшего изучения.

#### Список литературы

1. Industrial IoT Market Research Report. Market Data Forecast, 2020.
2. Промышленный Интернет вещей. Департамент инвестиционной и промышленной политики города Москвы, 2020.
3. The Growth Game-Changer: How the Industrial Internet of Things can drive progress and prosperity. M.Purdy, L.Davarzani // Accenture. 2015. – P. 21-26.
4. Ландшафт угроз для систем промышленной автоматизации. Kaspersky ICS CERT, 2020.
5. Taxonomy of Cross-Domain Attacks on Cyber Manufacturing System. M.Wu, Y. B. Moon // Complex Adaptive Systems Conference with Theme: Engineering Cyber Physical Systems. 2015. – С. 367-374.
6. Security Attacks on Cloud Computing With Possible Solution. P. Chouhan, R. Singh // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2016. – С. 92-96.
7. Security Issues in IIoT: A Comprehensive Survey of Attacks on IIoT and Its Countermeasures. C.Abhijeet, M. Vijay, Khadse, N.Parikshit // IEEE Global Conference on Wireless Computing Networking. – 2018. – С. 124-130.
8. A cyber attack taxonomy. C.Simmons, S.Ellis, D.Shiva // Annu. Symp. Inf. Assur. – 2014. – С.12-22.
9. A Taxonomy of Cyber Attacks on SCADA Systems. A.Zhu, S. Sastry // International Conference on Internet of Things. – 2011. – С. 380-388.
10. Taxonomy for description of cross-domain attacks on CPS. M. Yampolskiy, P. Horvath, X. Koutsoukos, Y. Xue, J. Sztipanovits // ACM International Conference on High Confidence Networked Systems. – 2013. – С. 135-142.
11. An effective method for preventing SQL injection attack and session hijacking. K. D'silva, J. Vana-jakshi, K. N. Manjunath, S. Prabhu // IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information Communication Technology. – 2017. – С. 697-701.
12. Hybrid Intrusion Detection System for Edge-Based IIoT Relying on Machine-Learning-Aided Detection. H. Yao, P. Gao, P. Zhang, J. Wang, C. Jiang, L. Lu // IEEE Network. 2019. – № 5. – С. 75-81.
13. A Machine-Learning-Based Technique for False Data Injection Attacks Detection in Industrial IoT. M.N. Aboelwafa, K. G. Seddik, M. H. Eldefrawy, Y. Gadallah, M. Gidlund // IEEE Internet of Things Journal. 2020. – № 9. – С. 8462-8471.
14. A Trustworthy Privacy Preserving Framework for Machine Learning in Industrial IoT Systemsю C. M. Arachchige, P. Bertok, I. Khalil, D. Liu, S. Camtepe, M. Atiquzzaman // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – № 9. – С. 6092-6102.
15. Effect of Imbalanced Datasets on Security of Industrial IoT Using Machine Learningю M. Zolanvari, M.A. Teixeira, R. Jain // IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics. – 2018. – С. 112-117.
16. A Machine learning based intrusion detection approach for industrial networks. H. Qiao, J.O. Blech, H. Chen // IEEE International Conference on Industrial Technology. – 2020. – С. 265-270.
17. Blockchain meets IIoT: An architecture for privacy preservation and security in IIoT. I. Puri, R. Pri-yadarshini, L. Kumar, C. Kim // International Conference on Computer Science, Engineering and Applications. – 2020. – С. 1-7.
18. A Blockchain-Based Solution for Enhancing Security and Privacy. J. Wan, J. Li, M. Imran, D. Li // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – № 6. – С. 3652-3660.
19. A Secure FaBric Blockchain-Based Data Transmission Technique for Industrial Internet-of-Things. W. Liang, M. Tang, J. Long, X. Peng, J. Xu, K. Li // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – № 6. – С. 3582-3592.
20. Permissioned Blockchain-based Security for IIoT. S. Yeasmin, A. Baig // IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference. – 2020. – С. 1-7.
21. Xyreum: A High-Performance and Scalable Blockchain for IIoT Security and Privacy. S. Sani // IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems. – 2019. – С. 1920-1930.

АСПАП ЖАСАУ  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
INSTRUMENT MANUFACTURE

DOI 10.51885/1561-4212\_2021\_1\_91  
MPHTI 59.45.31

**Е.Б. Утепов<sup>1,2</sup>, А.С. Тулебекова<sup>1,2</sup>, Ш.Ж. Жарасов<sup>2</sup>, С.А. Абдулина<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ТОО «CSI Research & Lab», Нур-Султан, Қазақстан

<sup>2</sup>НАО Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Қазақстан

<sup>3</sup>Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Қазақстан

E-mail: [utepov-elbek@mail.ru](mailto:utepov-elbek@mail.ru)

## ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

### БЕТОННЫҢ БЕРІКТІГІН ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҚОЛДАНУДЫҢ ЕҢ ҮЗДІК ТӘЖІРИБЕЛЕРІ

#### BEST PRACTICE IN CONCRETE STRENGTH MEASUREMENT SYSTEMS

**Аннотация.** Строительство монолитных зданий и сооружений в настоящее время является скоростным, всесезонным и круглосуточным технологическим процессом, проводимым в любых климатических условиях. Знание и понимание внешних и внутренних характеристик твердения бетона, таких как относительная влажность и температура, позволяет определить полную картину о наборе прочности бетона. Сегодня методы прогнозирования прочности бетона основаны на современных технологиях, таких как встроенные датчики и сенсоры, машинное обучение и искусственный интеллект. В статье представлен обзор измерительных систем для температурно-прочностного контроля бетона. Обсуждение применения данных систем, технологических особенностей, преимуществ и недостатков является важным для понимания различных моментов. В работе приводятся лучшие практики мира и результаты их применения, на основании чего представлены преимущества «умных технологий».

**Ключевые слова:** датчик, бетон, температурно-прочностной контроль, анализ, опыт

**Аңдатпа.** Монолитті вимараттар мен құрылыстарды салу қазіргі уақытта кез келген климаттық жағдайда жүргізілетін жоғары жылдамдықты, барлық маусымдық және тәулік бойы жұмыс істейтін технологиялық процесс болып табылады. Салыстырмалы ылғалдылық пен температура сияқты бетонның қатаюының сыртқы және ішкі сипаттамаларын білу және түсіну бетонның беріктігінің толық көрінісін анықтауға мүмкіндік береді. Бүгінгі таңда бетонның беріктігін болжау әдістері кіріктірілген датчиктер мен сенсорлар, машиналық оқыту және жасанды интеллект сияқты заманауи технологияларға негізделген. Мақалада бетонның температурасын және беріктігін бақылауға арналған өлшеу жүйелеріне шолу жасалады. Әртүрлі мәселелерді түсіну үшін осы жүйелерді, технологиялық ерекшеліктерді, артықшылықтар мен кемшіліктерді қолдануды талқылау маңызды болып табылады. Жұмыста әлемнің үздік тәжірибелері және оларды қолдану нәтижелері келтірілген, соның негізінде «ақылды технологиялардың» артықшылықтары ұсынылған.

**Түйін сөздер:** датчик, бетон, температура мен беріктігін бақылау, анализ, тәжірибесі.

**Abstract.** Construction of monolithic buildings and structures nowadays is a high-speed, all-season and round-the-clock technological process carried out in any climatic conditions. Knowing and understanding the external and internal curing characteristics of concrete, such as relative humidity and temperature, allows you to determine a complete picture of concrete strength gain. Today, methods of predicting concrete strength are based on modern technology such as embedded sensors and sensors, machine learning and artificial intelligence. This article presents an overview of measuring systems for temperature and strength control of concrete. Discusses the applications of these systems, technological features, ad-

*vantages and disadvantages that are important to understand the various points. The paper cites the best practices of the world and the results of their application, based on which the advantages of «smart technology» are presented.*

**Keywords:** *sensor, concrete, temperature and strength control, analysis, experience.*

*Введение.* Для оценки состояния конструкций зданий и сооружений необходим всесторонний анализ факторов, влияющих на их эксплуатационные характеристики – прочность бетона, защитный слой и диаметр арматуры, теплопроводность и влажность бетона, адгезия защитных и облицовочных покрытий, морозостойкость и водонепроницаемость бетона. Однако при всем многообразии контролируемых параметров контроль прочности бетона занимает особое место, поскольку при оценке состояния конструкции определяющим фактором является соответствие фактической прочности бетона проектным требованиям [1]. В связи с этим большинство работ на стройплощадке могут быть начаты только в том случае, если бетон достиг достаточной прочности (обычно 75 % от указанной прочности на сжатие бетона) [2]. Если бетон после заливки не затвердевает должным образом в благоприятном температурном диапазоне, то дальнейшие работы не могут быть начаты. График твердения бетона зависит от разных факторов. Температура затвердевания также важна. При опускании температурных показателей процесс замедляется, а нулевая отметка термометра приостанавливает его, поскольку жидкость в составе начинает замерзать, а качество материала ухудшается [3].

В связи с этим на ранней стадии выдерживания наиболее адаптированным является способ температурно-прочностного контроля, базирующийся на взаимосвязи температуры бетона и времени его выдерживания [4, 5].

И сегодня во всем мире наблюдается интерес к применению новых технологий зондирования и мониторинга различных конструкций. Преимущество беспроводных систем мониторинга, включая температурно-прочностной контроль бетона, находит отражение во многих исследованиях. Исследователи отмечают, что применение датчиков – это захватывающая технология, которая позволяет получить данные о конструкции [6-9].

*Лучшие практики мира.* При выборе датчиков и оборудования для измерения температуры или «зрелости» бетона руководствуются несколькими главными характеристиками, такими как: точность, простота использования, соответствие стоимости и бюджету.

Имеющиеся измерительные системы подразделяются на следующие категории [10]: термомпары; проводные регистраторы температуры и зрелости; проводные датчики с внешним беспроводным передатчиком; полностью встраиваемые беспроводные бетонные датчики.

Каждая из этих систем имеет свои преимущества и недостатки. «Бетонная термопара» состоит из двух проводов из различных металлов, соединенных друг с другом, скрученных на одном конце для образования электрического соединения [10]. Термопара вырабатывает зависящее от температуры напряжение благодаря своим термоэлектрическим свойствам. Это напряжение измеряется внешним оборудованием и затем используется для оценки температуры бетона. Базовый металл термопары является наиболее часто используемым типом термопар в бетонной промышленности, так как они являются относительно недорогими с широким диапазоном измерения температуры [11].

Хотя термопары относительно недороги у них есть несколько недостатков. Наиболее важным является низкая точность измерения термопар. Термопары типов J и K имеют стандартный предел погрешности не более 2,2 °C для типичных температурных диапазонов бетона. Эта погрешность более чем в два раза превышает минимальную точность измерений, требуемую в большинстве спецификаций по измерению температуры бетона (например, ASTM C1064 требует точность 0,5 °C для измерения температуры свежего бетона) [12]. Кроме того, очень трудоемко перерезать провода, крепить их к вилке и

устанавливать установку на месте. Тонкие термопарные провода также очень склонны к порезам, повреждениям и, следовательно, к ошибкам измерения, так как они обычно не рассчитаны на жесткие условия эксплуатации. Кроме того, провода, выходящие из бетона, и внешний блок должны быть защищены в течение всего периода измерения температуры [10].

Для устранения некоторых недостатков в системах на основе термопар были разработаны проводные регистраторы температуры и зрелости. Эти регистраторы и счетчики имеют электронную плату, которая содержит батарею размером с монету и встроенный термистор для измерения температуры. Измерения через заданные промежутки времени записываются и хранятся на этой печатной плате. Вся печатная плата полностью герметизирована соединительным проводом, выходящим для загрузки измерений с помощью внешнего устройства по мере необходимости, в отличие от датчиков на основе термопар, которые должны быть всегда подключены к внешнему оборудованию для записи данных [13-14]. Для установки этих систем в бетонные элементы регистратор (или герметичная печатная плата) размещается в том месте, где необходимо произвести измерения температуры и зрелости. Затем провода разъемов вытаскиваются из конструктивного элемента. После заливки бетона пользователи могут подключить к концу проводов ручной прибор, чтобы загрузить зарегистрированные значения температуры.

Однако данные типы регистраторов температуры и зрелости не имеют электрического переключателя и всегда включены. Поэтому их срок годности ограничен. Кроме того, соединительный кабель промышленного класса делает эти датчики громоздкими и сложными в установке, особенно при использовании длинных проводов для больших конструктивных элементов [15-16]. Как и термопары, конец проводов должен быть маркирован для идентификации после заливки и защищен от возможных порезов или других повреждений на рабочей площадке. Поиск кабельного провода в течение первых нескольких дней после заливки может быть затруднен, так как многие строительные инструменты, материалы и компоненты перемещаются на рабочей площадке, потенциально покрывая кабельный провод [10].

Использование термопар или проводных регистраторов для мониторинга температуры бетона, сложность подключения внешнего устройства и необходимость посещения рабочей площадки для сбора данных, а затем их загрузки на компьютер помешали широкому внедрению этих типов датчиков в промышленности.

Для решения вышеуказанных проблем с помощью электронных усовершенствований были разработаны беспроводные передатчики данных. Эти внешние устройства подключаются к концу проводов, выходящих из бетона для хранения и передачи измерений температуры по беспроводной сети: к компьютеру, подключенному к интернету; локальному беспроводному узлу или шлюзу, который затем передает данные в облако или непосредственно в облако через такие сети, как LTE или Sigfox.

Основным преимуществом полностью встроенных беспроводных бетонных датчиков является то, что в отличие от проводных систем они не подвержены потенциальным повреждениям на строительной площадке после заливки. Данные надежно удерживаются на датчике внутри бетона и могут быть загружены с уверенностью в любое время.

Различные типы датчиков представлены компаниями-производителями в основном из США, Канады и Великобритании, являющимися лидерами в этой области. Применение различных датчиков, регистраторов температурно-прочностного контроля бетона нашло отражение на многих строительных объектах мира, одним из которых является One York Street, расположенный в самом центре Йорк-стрит в динамичном деловом районе Торонто. Проект включает в себя 4-этажное подиумное здание с тремя башнями, построенными

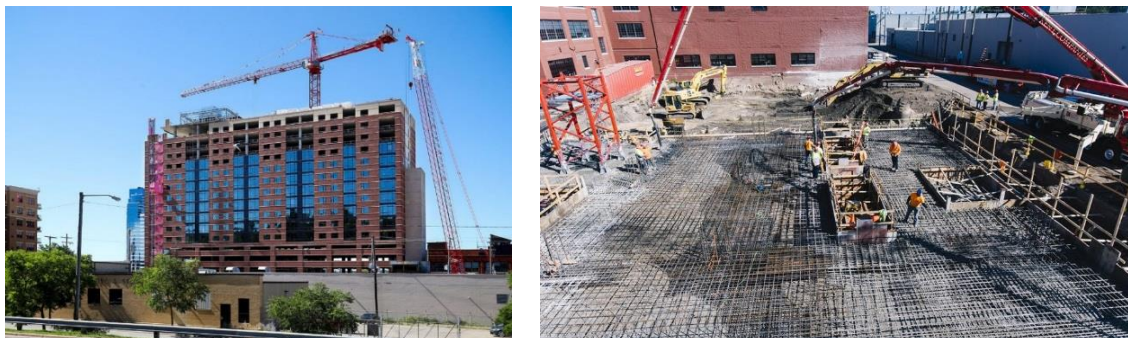
на вершине: две 60-этажные жилые башни с северной стороны и 35-этажная коммерческая башня One York площадью 800 000 квадратных футов с южной стороны. Регистраторы данных термодатчиков Нобо [13] были использованы при мониторинге прочности бетона.

Регистраторы данных размещаются рядом с опалубкой. Применение Нобо позволило получать данные в режиме реального времени (рис. 1) [14].



**Рисунок 1.** One York Street, Канада (справа – регистраторы данных термодатчиков Нобо, слева – этап строительства) [14]

На объекте 16-этажного высотного здания в Гранд-Рапидс, штат Мичиган (США), большая часть бетона укладывалась зимой. Команде требовался надежный способ, чтобы бетон не промерзал и обеспечивал безопасность конструкции. В связи с этим, Компания Kent постоянно следила за температурой бетона, используя датчики Command Centre (рис. 2). Регулирование температуры бетона в холодную погоду необходимо для правильного развития прочности. Американский институт бетона (ACI) рекомендует минимальную температуру во время укладки, минимальную температуру при смешивании и максимально допустимое постепенное снижение температуры в течение 24 часов после окончания защиты от холода. Эти рекомендации часто отражаются в качестве требований в спецификациях работ. Для того чтобы внутренняя температура бетона соответствовала заданным требованиям датчики Command Centre встроены в бетон для постоянного контроля и регистрации температуры бетона через регулярные промежутки времени [15]. Маленькие датчики с автономным питанием автоматически регистрируют и сохраняют данные о температуре внутри бетона. Для доступа к данным пользователи подключают датчики к модулю считывания датчиков многократного использования (SRM), который передает конкретные данные в режиме реального времени через Bluetooth на устройство iOS. С помощью бесплатного приложения Command Center команды могут легко просматривать, анализировать и делиться конкретными данными на своем телефоне. Пользователи также могут создавать и отправлять по электронной почте отчеты об истории температур и данных о перепадах температур в приложении. Компания Kent использовала датчики Command Centre для всех бетонных плит перекрытий: по шесть датчиков на каждый этаж, при этом большинство датчиков контролировало температуру вблизи краев плит, которые труднее всего обогреть в зимний период. Для передачи данных со всех датчиков команда использовала один SRM. Мониторинг обошелся всего за 99 USD за многократные SRM, датчики – 37 USD за каждый. SRM и приложение сделали мониторинг простым и очень удобным.

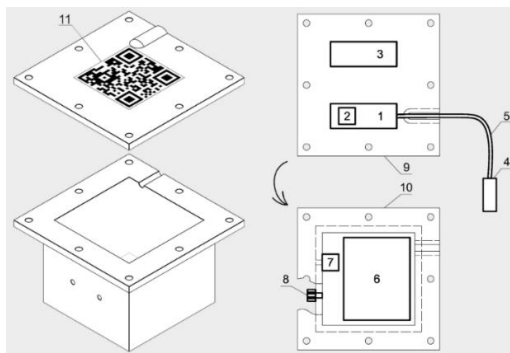
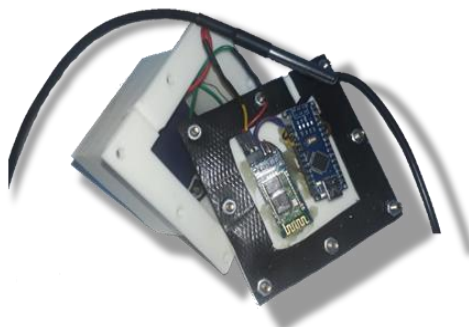


**Рисунок 2.** 16-этажное высотное здание, США (справа – этап строительства, слева – вид здания) [16]

Методы температурно-прочностного контроля бетона регулируются стандартами нескольких стран: США [12], Канады [17], Нидерландов [18], Германии [19], Южной Америки [20], России [21].

В Казахстане аналогов датчиков не имеется.

*Исследования.* Авторами был разработан прототип датчика для мониторинга железобетонных конструкций (рис. 3). Данный прототип представляет собой недорогую альтернативу имеющимся датчикам для определения прочности бетона.



- 1 – микроконтроллер; 2 – память; 3 – модуль беспроводной связи; 4 – температурный сенсор;  
 5 – кабель; 6 – источник питания; 7 – сенсор относительной влажности;  
 8 – переключатель; 9 – нижний элемент корпуса; 10 – верхний элемент корпуса;  
 11 – идентификационный QR код

**Рисунок 3.** Прототип беспроводного датчика для мониторинга железобетонных конструкций (справа – прототип, слева – IT-архитектура прототипа) [22]



IT-архитектура прототипа основана на концепции Интернета Вещей (IoT). Корпус прототипа был распечатан на 3D-принтере. Прототип встраивается в тело бетона и в течение 28 суток собирает данные о внутренней температуре и влажности бетона. При этом, пользователь в любой момент времени может выгрузить собираемые данные через Bluetooth в мобильное приложение, а затем на персональный компьютер. Далее по методу зрелости бетона [12] рассчитывается текущая прочность бетона. На данную разработку авторами был получен патент на полезную модель № 3575 «Беспроводной датчик мониторинга железобетонных конструкций» [23].

*Заключение.* Согласно лучшим практикам, применение датчиков позволяет: обеспечивать безопасность конструкции, экономить средства за счет сокращения времени строительства или избегать дорогостоящего ремонта в результате использования низкопрочного бетона, сдавать проект в срок без простоев. Каждый датчик имеет свои особенности и технические характеристики, позволяющие ему быть «лучшим» в определенных параметрах. Преимущества применения «умных технологий»:

– информация, собранная с помощью встроенных датчиков, записывает температуру и прочность бетона в режиме реального времени. Данные записываются без перерывов, поэтому результаты, как правило, более последовательны;

– метод зрелости прогнозирует фактическую прочность бетона на месте;

– данные собираются мгновенно в режиме реального времени;

– значительная экономия затрат на определение прочности бетона, выполняемое одним инженером на месте.

*Финансирование.* Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08052033).

#### Список литературы

1. Kibar H., Ozturk T. Determination of concrete quality with destructive and non-destructive methods // Comput. Concr. Techno-Press, 2015. – Vol. 15, № 3. – P. 473-484.
2. Зубков В.А. Определение прочности бетона: учебное пособие // Москва: Изд-во АСВ, 1998.
3. Thandavamoorthy T.S. Determination of concrete compressive strength: A novel approach // Pelagia Res. Libr. Adv. Appl. Sci. Res. 2015. – Vol. 6, № 10. – P. 88-96.
4. Несветаев Г.В., Коллеганов А.В., Коллеганов Н.А. Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций // Вестник евразийской науки. – Общество с ограниченной ответственностью «Издательский центр «Науковедение», 2017. – Vol. 9, № 2 (39).
5. Головнев С., Пикус Г., Мозгалёв К. Температурно-прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период: СТ-НП СРО ССК-04-2013 // НП СРО "ССК УрСиб", 2013.
6. Uteпов Y. et al. Prototyping an embedded wireless sensor for monitoring reinforced concrete structures // Comput. Concr. Techno-Press, 2019. – Vol. 24, № 2. – P. 95-102.
7. Erdal H. et al. Prediction of concrete compressive strength using non-destructive test results // Comput. Concr. Techno-Press, 2018. – Vol. 21, № 4. – P. 407-417.
8. Hannan M.A., Hassan K., Jern K.P. A review on sensors and systems in structural health monitoring: Current issues and challenges // Smart Struct. Syst. Techno Press, 2018. – Vol. 22, № 5. – P. 509-525.
9. Giatec. The leading wireless concrete sensor for measuring temperature and strength [Electronic resource] // The leading wireless concrete sensor for measuring temperature and strength. 2019. – URL: <https://www.giatecscientific.com/products/concrete>.
10. Giatec. The best concrete sensor in 2020 [Electronic resource]. – 2020. – URL: <https://www.giatecscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/> (accessed: 07.10.2020).
11. Carino N.J., Lew H.S. Evaluation of concrete strength by monitoring concrete temperature using sensor // Int. Res. J. Eng. Technol. 2019. – Vol. 6, № 3. – P. 3058-3061.



12. ASTM C1074. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. – West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 1998.
  13. Onset. HOBO UX100 Data Loggers [Electronic resource]. – 2020. – URL: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/UX100-data-loggers> (accessed: 07.10.2020).
  14. Onset. Monitoring Concrete Curing Temperatures with Data Loggers [Electronic resource]. – URL: [https://youtu.be/Y\\_bjWKcstys](https://youtu.be/Y_bjWKcstys).
  15. Center C. Kent Companies Uses COMMAND Center Wireless to Monitor Internal Concrete Temperatures in Cold Weather Placement [Electronic resource]. – URL: <https://www.commandcenterconcrete.com/kent-companies-uses-command-center-wireless-to-monitor-internal-concrete-temperatures-in-cold-weather-placement/>.
  16. Command Center. Kent Companies Uses COMMAND Center Wireless to Monitor Internal Concrete Temperatures in Cold Weather Placement [Electronic resource]. – 2020. – URL: <https://www.commandcenterconcrete.com/kent-companies-uses-command-center-wireless-to-monitor-internal-concrete-temperatures-in-cold-weather-placement/>.
  17. CSA A23.1/A23.2. Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Test Methods and Standard Practice for Concrete, 2014. – P. 22.
  18. NEN 5970. Determination of strength of fresh concrete with the method of weighted maturity, 2001. – P. 21.
  19. DIN 1045-3. Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 3: Execution of structures - application rules for DIN EN 13670. – Germany, 2013.
  20. NCH 170. Hormigon – Requisitos generales (Concrete – General requirements), 2016. – P. 32.
  21. СТ–НП СРО ССК–04–2013. Температурно–прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период, 2013. – С. 25.
  22. Uteпов Y. et al. Prototyping an embedded wireless sensor for monitoring reinforced concrete structures // Comput. Concr., 2019. – Vol. 24, № 2.
  23. Uteпов Y. et al. Wireless sensor monitoring of concrete components: pat. 3575. Kazakhstan, 2019.
- 
-

## АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Abdulina S.A.** – PhD, Associate Professor D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: Abdulina.saule@mail.ru. (Author for correspondence)

**Alimbetov S.E.** – Master's student Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

**Alimkulov M.M.** – associate Professor of the Sub-department «Transport construction» Kazakh Academy of Transport and Communications named after M.Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan.

**Amirova A. S.** – Doctoral student of the Department of Information Systems of the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, E-mail: whitesilk@mail.ru (Author for correspondence)

**Aubakirov A. A.** – PhD doctoral student, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Nursultan, Kazakhstan, E-mail: arman-a86@mail.ru. (Author for correspondence)

**Apshikur B.** – associate Professor of the School of Architecture, Construction and Design D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Arynova Sh. Zh.** – Doctor PhD, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan. E-mail: shinar\_uzh@mail.ru. (Author for correspondence)

**Agabek A.** – 1st year Master, Department of Physics South Kazakhstan State Pedagogical University, Shymkent, Kazakhstan.

**Jakishev A.** – 2st year Master, Department of Physics East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Dyomin V. F.** – professor at the mining faculty of Karaganda technical university, Karaganda, Kazakhstan.

**Duisehan M.** – 1st year Master, Department of Physics South Kazakhstan State Pedagogical University, Shymkent, Kazakhstan.

**Yedige M.M.** – master student of the RAIOT Department, Karaganda Technical University (KTU), E-mail: muratovich98@bk.ru. (Author for correspondence)

**Yerdybayeva N.K.** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university, Ust'-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Yeskermesov D. K.** – PhD., Department of physics East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Zharassov Sh. Zh.** – PhD Student D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Zhanasbaeva A. S.** – doctoral student of the Department of Information Systems of the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

**Zholmagambetov N.R.** – Associate Professor of the RAIOT Department, Candidate of Technical Sciences, Karaganda Technical University (KTU).

**Zakarina A. Zh.** – PhD, senior lecturer, L. N. Gumilyov Eurasian National University Nursultan, Kazakhstan.

**Imanov M. O.** – dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering of the Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan.

**Ipalakov T.T.** – Doctor of Technical Science, Professor of the School of Architecture, Construction and Design, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust- Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail Tlpalakov@ektu.kz.

**Kozhanov N. G.** – Ph.D. student in the Faculty of architecture and construction, Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: spark.2011@mail.ru. (Author for correspondence)

**Korogod N. P.** – candidate of biological sciences, Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan.

**Kudryavtseva I.** – PhD, senior researcher, University of Tartu, Institute of Physics, Tartu, Estonia.

**Kapasov A. K.** – Master of Science, lecturer of the School of Architecture, Construction and Design, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: azamat040594@mail.ru. (Author for correspondence)

**Kassymov D. K.** – Master of Science, lecturer of the School of Architecture, Construction and Design D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Kantay N.** – Junior Researcher at the National Scientific Laboratory for Collective Use, Non-profit limited company «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: nurgan85@mail.ru. (Author for correspondence)

**Kylyshkanov M.K.** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Ulba Metallurgical Plant JSC, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Lushchik A.** – Ph.D., Professor, University of Tartu, Institute of Physics, Tartu, Estonia.

**Makashev B.K.** – Associate Professor of the RAIOT Department, Candidate of Technical Sciences, Karaganda Technical University (KTU), Karaganda, Kazakhstan.

**Makhabbatova A.T.** – master student of the RAIOT Department, Karaganda Technical University (KTU), Karaganda, Kazakhstan.

**Nabioldina A.** – 3rd year student of the Specialty Materials Science and technology of new materials, Non-profit limited company «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Orynbek A.E.** – master student of the RAIOT Department, Karaganda Technical University (KTU), Karaganda, Kazakhstan.

**Pazyzbek S.** – PhD, acting associate professor Department of Physics South Kazakhstan State Pedagogical University, Shymkent, Kazakhstan. E-mail: pazyzbek.sapargali@yandex.kz. (Author for correspondence)

**Pogrebnyak A.D.** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Sumy State University, Ukraine, Summa city, Chief specialist Center for Priority Development “VERITAS”, D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university, Ust’-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: alexp@i.ua

**Rakhadilov B.K.** – Senior researcher at the Scientific Research Center «Surface Engineering and Tribology», Non-profit limited company «Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

**Sakenova R.E.** – doctoral PhD student of the 2<sup>nd</sup> course, D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university, Ust’-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: Sakenova\_rimma@mail.ru. (Author for correspondence)

**Tokhmetov A.T.** – Associate Professor of the Department of Information Systems of the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

**Tulebekova A.S.** – PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the R&D Department, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan, E-mail: krasavka5@mail.ru.

**Uruzalinova M.B.** – Master of Engineering and Technology, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

**Uteпов Y.B.** – PhD, Associate Professor, Head of R&D Department, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan. E-mail: utepov-elbek@mail.ru. (Author for correspondence)

**Chidunchi I.Yu.** – Doctor PhD, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

**Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің ХАБАРШЫСЫ**

Ғылыми журнал  
1999 жылдан шыға бастады.  
Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінде тіркеліп,  
2021 ж. 19 ақпанында № KZ48VPY00032630 куәлігі берілген.

**ВЕСТНИК Восточно-Казхастанского технического университета имени Д. Серикбаева**

Научный журнал  
Издается с 1999 г.  
Зарегистрирован Министерством информации и общественного развития  
Республики Казахстан. Свидетельство № KZ48VPY00032630 от 19 февраля 2021 г.

**BULLETIN of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university**

Scientific journal  
Published since 1999  
Registered by the Ministry of Information and Social Development  
Republic of Kazakhstan. Certificate No. KZ48VPY00032630 dated February 19, 2021.

Редакторлар – Редакторы  
О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова  
Корректорлар – Корректоры  
О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова  
Руководитель издательства О.Н. Николаенко  
Editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova  
Copy editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova  
Publishing director O. Nikolaenko

Материалдарды компьютерде терген және беттеген С.С. Мамыраздыкова  
Набор, верстка, изготовление оригинал-макета С.С. Мамыраздыкова  
Text Layout, lead out production of the original layout S. Mamyrazdykova

Басуға 31 наурыз 2021 ж. қол қойылды.  
Форматы 84×108/16. Офсет қағазы.  
Көлемі: шартты баспа табағы 10,5, есептік баспа табағы 10,37.  
Баспа нұсқасы. Таралымы 50 дана. № 724-2021 тапсырыс.  
Бағасы келісім бойынша.

Подписано в печать 31 марта 2021 г.  
Формат 84×108/16. Бумага офсетная.  
Объем: усл. печ. л. 10,5, уч.-изд. л. 10,37.  
Печатная версия. Тираж 50 экз. Заказ № 724-2021.  
Цена договорная.

Signed to print on March 31, 2021  
Format 84'108 / 16. Offset paper.  
Volume: conventional printing plate 10.5, estimated printing plate 10.37.  
Printed version. Circulation 50 copies. Order No. 724-2021.  
The price is negotiable.

Шығыс Қазақстан техникалық университеті. 070004, Өскемен қаласы, Протозанов көшесі, 69.  
Восточно-Казхастанский технический университет. 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.  
D. Serikbayev East Kazakhstan technical university. 070004, Ust-Kamenogorsk, 69 Protozanov Street.