

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL
UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Volume 19, Issue 4
October-December 2022

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы

№ 4 (63)

2022

Главный редактор – **Кулпешов Б.Ш.**

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

**Акжалова А.Ж., Асилбеков Б.К., Ахметжанов А.Ж., Баженов Н.А.,
Байжанов Б.С., Бейсенханов Н.Б., Бисембаев А.С., Буркитбаев М.М.,
Зазыбин А.Г., Ивахненко А.П., Исахов А.А., Исмаилов А.А.,
Kang Wanli, Кожобеков С.С., Колесников А.В., Коробкин В.В.,
Курбатов А.П., Молдабаева Г.Ж., Нусупов К.Х., Пак А.А., Сарсенбекулы Б.,
Судоплатов С.В., Тургазинов И.К., Умаров Ф.Ф., Шамои П.С.**

Издание зарегистрировано Министерством культуры и информации Республики Казахстан.
Свидетельство о постановке на учет СМИ № 9757 – Ж от 03.12.2008 г.

Журнал зарегистрирован в Международном центре по регистрации сериальных изданий ISSN
(ЮНЕСКО, г. Париж, Франция)

Подписной индекс – 74206

Издается с 2004 года. Выходит 4 раза в год.

УЧРЕДИТЕЛЬ

Казахстанско-Британский технический университет

ISSN 1998-6688

© Казахстанско-Британский
технический университет, 2022

МАЗМҰНЫ

ХИМИЯ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

Одинцов Д.С., Суворов А.С., Естемесов З.А., Барвинов А.В., Мрутунджай Паниграхи ГИПС-ЦЕМЕНТТІ ТҰТҚЫРЛЫҚҚА, АЛ ОДАН ГИПС-ЦЕМЕНТТІ- ПОЗЦОЛАНДЫ ТҰТҚЫРЛЫҚҚА АУЫСА ОТЫРЫП, ГИПСТІ ТҰТҚЫРЛЫҚ ҚАТАЮЫНЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІН ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ СЫНАҚТАР МЕН РЕНТГЕНОФАЗАЛЫҚ ТАЛДАУ АРҚЫЛЫ АЛЫНҒАН ДЕРЕКТЕР НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ.....	6
Сдикова Г.Ж., Шамилова А.Ж. КАДМИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ГАЛЬВАНИКАЛЫҚ ҚАПТАМАЛАРДЫ ЕНГІЗУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ.....	17

МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

Дәулетиярова А.Б. ТЫҒЫЗ АҒАШ ТЕОРИЯСЫН ТҰРАҚТЫ БАЙЫТУ ҮШІН ЕСЕПТЕЛЕТІН МОДЕЛЬДЕРДІ БӨЛУ ТУРАЛЫ. I.....	27
Синица А.В., Антонио Капсони ТОПЫРАҚТЫҢ ТЕРМОФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН АНЫҚТАУҒА КЕРІ МӘСЕЛЕЛЕР ТЕОРИЯСЫ ҚОЛДАНЫЛУЫНЫҢ САРАПТАМАЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ.....	34

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Одинцов Д.С., Суворов А.С., Естемесов З.А., Барвинов А.В., Мрутунджай Паниграхи ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО С ПЕРЕХОДОМ К ГИПСОЦЕМЕНТНОМУ ВЯЖУЩЕМУ, А ОТ НЕГО К ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОМУ ВЯЖУЩЕМУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ И РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА.....	6
Сдикова Г.Ж., Шамилова А.Ж. ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАДМИЯ.....	17

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Даулетиярова А. Б. О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНСТАНТНЫХ ОБОГАЩЕНИЙ ТЕОРИИ ПЛОТНОГО ДЕРЕВА ВСТРЕЧ. I.....	27
Синица А.В., Антонио Капсони АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА.....	34

CONTENTS

CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL SCIENCES

Odintsov D.S., Suvorov A.S., Estemesov Z.A., Barvinov A.V., Mrutyunjay Panigrahi PHYSICO-MECHANICAL AND PHYSICO-CHEMICAL HARDENING PROCESS CHANGING RESEARCH IN GYPSUM BINDER AND TRANSITION IN GYPSUM-CEMENT BINDER AND THEN TO GYPSUM-CEMENT-POZZOLANIC USING WITH MECHANICAL TESTS AND X-RAY SPECTROSCOPY.....	6
Sdikova G.Zh., Shamilova A.Zh. FEATURES OF THE IMPLEMENT OF CADMIUM-BASED ELECTROPLATING COATINGS.....	17

MATHEMATICAL SCIENCES

Dauletiyarova A.B. ON DISTRIBUTIONS OF COUNTABLE MODELS FOR CONSTANT EXPANSIONS OF THE DENSE MEET-TREE THEORY. I.....	27
Sinita A.V., Antonio Capsoni ANALYTICAL APPROACH FOR INVERSE PROBLEMS THEORY APPLICATIONS TOWARDS DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOIL.....	34

UDC 691.545

IRSTI 67.09.31

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-4-6-16>

Odintsov D.S.^{*1}, Suvorov A.S.¹, Estemesov Z.A.¹, Barvinov A.V.¹, Mrutyunjay Panigrahi²

¹TOO “CLTaCCM” – Central Laboratory of Tests and Certification Construction Materials,
050000, Almaty, Kazakhstan

²School of Mechanical Engineering, Vellore Institute of Technology, Chennai,
600127, Tamil Nadu, India

***E-mail:** danila.odintsov@inbox.ru

PHYSICO-MECHANICAL AND PHYSICO-CHEMICAL HARDENING PROCESS CHANGING RESEARCH IN GYPSUM BINDER AND TRANSITION IN GYPSUM-CEMENT BINDER AND THEN TO GYPSUM-CEMENT-POZZOLANIC USING WITH MECHANICAL TESTS AND X-RAY SPECTROSCOPY

Abstract

Gypsum-Cement-Pozzolan binder (GCPB) has been invented in 60-s of last century in USSR by group of scientists under Mr. A. Volzhenskiy leadership. In that time in USSR and actually in US construction technological processes of civil and industrial buildings increasing a lot. So demand of cement for heavy concretes as a main component high up day to day, year to year. But realisation of that idea in practical way wasn't easy thing because as we know from «Material science» course – cement is hydraulic binder which hardening in moisture condition or in must cases in water and if we sae about gypsum is an air binder. That means gypsum is hardening and gets its high compression strength in air condition and loosing that strength in moisture condition or under influence of water. After analysing knowledge that have been written above about GCPB we may stay some problems in front of us: 1) First problem connect with modern theoretical physical-mechanical and physical-chemical researches absence, when GCPB hardening process have been described by modern X-Ray spectroscopy and mineralogical analysis. All what we have found in internet resources is basic and theoretical issue with some mechanical tests. 2) Also the main problem when we start see on that researches and mechanical tests, there are some conflicting things as links for technical requirements of GCPB through ages, storage conditions before tests. So according by what we have said above we choose some targets of our research: a) How gypsum binder's physical-mechanical characteristics going to change as it would be main stuff for GCPB preparing. And also transition process gypsum binder(GB) in gypsum-cement binder (GCB) and then in gypsum-cement-pozzolan binder (GCPB); b) How gypsum binder's physical-chemical characteristics going to change during transition process in GCB and then into GCPB with X-Ray spectroscopy analysis.

Key words: gypsum binder, gypsum-cement binder, gypsum-cement-pozzolan binder, creep factor, softening factor (K_s).

Одинцов Д.С.^{*1}, Суворов А.С.¹, Естемесов З.А.¹, Барвинов А.В.¹, Мрутюнджай Паниграхи²

¹Құрылыс материалдарын сертификаттау сынау орталық зертханасы,
050000, Алматы қ., Қазақстан

²Веллоре технологиялық институтының машина жасау мектебі, Ченнай,
600127, Тамил Наду, Үндістан

*E-mail: danila.odintsov@inbox.ru

ГИПС-ЦЕМЕНТТІ ТҮТҚЫРЛЫҚҚА, АЛ ОДАН ГИПС-ЦЕМЕНТТІ-ПОЗЦОЛАНДЫ ТҮТҚЫРЛЫҚҚА АУЫСА ОТЫРЫП, ГИПСТІ ТҮТҚЫРЛЫҚ ҚАТАЮЫНЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІН ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ СЫНАҚТАР МЕН РЕНТГЕНОФАЗАЛЫҚ ТАЛДАУ АРҚЫЛЫ АЛЫНҒАН ДЕРЕКТЕР НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Гипсоцемент-поззолан байланыстырғышының (ГЦПБ) пайда болуы өткен ғасырдың 60-жылдарында КСРО-да А.В. Волженский басқарған ғалымдар тобының жұмысы нәтижесінде пайда болды. Куйбышева (қазіргі кезде МГСУ им. Куйбышева). Айта кету керек, сол жылдары КСРО – да қарқынды өнеркәсіптік және азаматтық құрылыс жүрді. Ол портландцементке өте қажет бетон өндірісінің байланыстырушы негізі, ол көбінесе жеткіліксіз болды. Алайда, бұл қызықты идеяны іс жүзінде жүзеге асыру портландцемент гидравликалық байланыстырғыш, яғни тұтқыр, ылғалды жағдайда және тіпті суда қатайып, гипс байланыстырғыш (құрылыс гипсі немесе алебастр деп аталады) әуе байланыстырғышымен шектелді. Яғни, тұтқыр, тек құрғақ ауа жағдайында максималды беріктікке ие бола алады және ылғалды пайдалану жағдайында осы беріктігін жоғалтады.

Жоғарыда келтірілген мәліметтерді талдай отырып, сіз осы байланыстырғышты зерттеумен байланысты қазіргі зерттеушілердің алдында туындайтын бірқатар мәселелерді анықтай аласыз: 1) Бірінші мәселе қазіргі заманғы рентгенофазалық және минералогиялық талдаулармен расталған ГЦПБ-да қатаю кезінде пайда болатын физика-химиялық және физика-механикалық процестерді қазіргі заманғы теориялық зерттеулердің жоқтығымен байланысты. Табуға болатын барлық нәрсе-бұл негізінен әртүрлі дәрежеде Сығылған жалпы ақпарат немесе белгілі бір жергілікті ГЦПБ-ның бірқатар физикалық-механикалық сипаттамалары туралы кейбір мәліметтер келтірілген қолданбалы сипаттағы жұмыстар. 2) Сонымен қатар, соңғы жағдайда да, яғни қолданбалы сипаттағы жұмыстарда авторлар бірқатар мәселелер бойынша өте қарама-қайшы мәліметтер келтіреді. Мысалы: әр түрлі жылдардағы ГЦПБ-ға қойылатын техникалық талаптарға сілтемелер, сынақ алдында үлгілерді сақтау шарттары мен мерзімдері және т. б. Жоғарыда айтылғандарға сәйкес, жоғарыда аталған олқылықтардың орнын толтыру мақсатында осы жұмыстың алдына келесі міндеттер қойылды: а) гипсцементтік тұтқырлыққа (ГЦБ) және гипсцементтік-поззоландық тұтқырлыққа (ГЦПБ) ауыса отырып, ГЦПБ негізі болып табылатын гипстік тұтқырлықтың (ГБ) келесі физикалық-механикалық сипаттамалары қалай өзгеретінін қадағалау; б) гипсцементтік тұтқырлыққа (ГЦБ), ал одан гипсцементтік-поззоландық тұтқырлыққа (ГЦПБ) ауыса отырып, қатаятын тасты рентгенофазалық, химиялық және минералогиялық талдау арқылы алынған деректер негізінде гипсцементтік-поззоландық тұтқырлыққа (ГЦПБ) қатаюдың физика-химиялық процестері қалай өзгеретінін қадағалау.

Тірек сөздер: гипс байланыстырғыш, гипс цемент байланыстырғыш, гипс цемент-поззолан байланыстырғыш, сығылу (creep factor), жұмсарту коэффициенті (Кж).

Одинцов Д.С.^{*1}, Суворов А.С.¹, Естемесов З.А.¹, Барвинов А.В.¹, Мрутюнджай Паниграхи²

¹ТОО «ЦелСИМ» – Центральная лаборатория сертификационных испытаний строительных материалов, 050000, г. Алматы, Казахстан

² Школа машиностроения, Технологический институт Веллора, Ченнай, 600127, Тамил Наду, Индия

*E-mail: danila.odintsov@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО С ПЕРЕХОДОМ К ГИПСОЦЕМЕНТНОМУ ВЯЖУЩЕМУ, А ОТ НЕГО К ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОМУ ВЯЖУЩЕМУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ И РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА

Аннотация

Появление гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ) произошло в 60-х годах прошлого столетия в СССР в результате работы группы ученых, возглавляемых А.В. Волженским в МИСИ им. Куйбышева (в настоящее время – МГСУ им. Куйбышева). Необходимо отметить, что в те годы в СССР шло интенсивное промышленное и гражданское строительство, которое остро нуждалось в портландцементе – вяжущей основе для производства бетонов, которого часто попросту не хватало. Однако реализация этой заманчивой идеи на практике ограничивалась тем, что портландцемент является гидравлическим вяжущим, то есть вяжущим, твердеющим во влажных условиях и даже в воде, а гипсовое вяжущее (так называемый строительный гипс, или алебастр, как его тогда называли) – воздушным вяжущим. Анализируя вышеприведенные сведения по ГЦПВ, можно наметить ряд проблем, связанных с исследованием этого вяжущего, возникающих перед современными исследователями: 1) Первая проблема связана с практически полным отсутствием современных теоретических исследований физико-химических и физико-механических процессов, протекающих в ГЦПВ во время его твердения, подтвержденных современными рентгенофазовым и минералогическим анализами. Все, что удалось найти, – это преимущественно общая сжатая в разной степени информация или работы прикладного характера с приведением некоторых данных по ряду физико-механических характеристик того или иного местного ГЦПВ. 2) При этом даже в последнем случае, то есть в работах прикладного характера, авторы приводят очень противоречивые данные по ряду вопросов, например, таких как ссылки на технические требования к ГЦПВ разных годов, условия и сроки хранения образцов перед испытаниями и др. В соответствии с вышесказанным с целью некоторого восполнения вышеуказанных пробелов в исследовании ГЦПВ перед данной работой ставились следующие задачи: а) проследить, как меняются следующие физико-механические характеристики гипсового вяжущего (ГВ), являющегося основой ГЦПВ с переходом в гипсоцементное вяжущее (ГЦВ) и гипсоцементно-пуццолановое вяжущее; б) проследить, как меняются физико-химические процессы твердения гипсового вяжущего с переходом к гипсоцементному вяжущему, а от него к гипсоцементно-пуццолановому вяжущему на основе данных, полученных посредством рентгенофазового, химического и минералогического анализов твердеющего камня.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, гипсоцементное вяжущее, гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, ползучесть (creep factor), коэффициент размягчения (K_c).

Introduction

Gypsum-Cement-Pozzolan binder (GCPB) has been invented in 60-s of last century in USSR by group of scientists under Mr. A. Volzhenskiy leadership. In that time in USSR and actually in US construction technological processes of civil and industrial buildings increasing a lot. So demand of cement for heavy concretes as a main component high up day to day, year to year. According to that there were lots of deficiency of many construction materials and cement has been stayed on 1-st place. Being truth many countries have tried find decision of reducing role of cement in construction industry, and USSR was one of them and as an idea for some low-floor buildings, which contain one or two floors, was replace to use cement binder for gypsum binder instead. All the more so that prime cost gypsum stuff is cheaper at least 5 times comparing with cement. But realisation of that idea in practical way wasn't easy

thing because as we know from «Material science» course – cement is hydraulic binder which hardening in moisture condition or in most cases in water and if we see about gypsum is an air binder. That means gypsum is hardening and gets its high compression strength in air condition and losing that strength in moisture condition or under influence of water. That negative side of gypsum binder may be explained in high level of creeping (creep factor) and low range of softening factor in gypsum binder comparing with cement binders and concretes. For our readers we may remind that creeping (creep factor) is an effect when hardened binder display high plastic deformations under influence of loading and moisture makes that process get more fast[1 P.2]. Creeping (creep factor) has private connection with softening as creep factor also may be explained as losing strength properties of hardened and dry binder after moisture influence. Level of softening may be described as softening factor(K_s), which may be calculate as strength of water-saturated binder samples dividing on strength of dry binder samples[1 P.2-3]. Using easy explanation – ratio of strength sample in high wet condition to strength sample in dry condition. According softening factor(K_s) we may estimate that factor as water resistance. Water resistance or softening factor(K_s) gypsum binder stay in range 0,3 – 0,45 and cement binder – 0,6 – 0,8 [2 P.6]. So to find some decision of that problems as creeping and softening factor(K_s) of gypsum binder Mr. A. Volzhenskiy's researches and his followers has been dedicated at last century. During 20 years since 60-s to end of 80-s some scientists have made some researches as Mr. A. Palagin, and Mr. M. Kurotsapov[3] has described influencing 3-10% of cement by gypsum mass. Also water resistance, softening factor(K_s) and compression strength has been determined. Increasing water resistance also have been noticed by Mr. P. Budnikov, and Mrs. L. Gulnova and S. Torchinskaya[4], when 10% of cement have been added in dihydrate gypsum. Positive side of influence on water resistance after adding cement in gypsum binder may be explained by low water resistance level in hardening gypsum and its high water-solubility level which stay in range 2g/l[5 P.3]. During hydration process in two-component binder – gypsum-cement binder(GCB) we have two hydration ways: gypsum hydration from hemihydrate gypsum to dihydrate gypsum; and hydration cement minerals. That two process comes hand in hand and during that low-soluble compounds start appear in solution as calcium hydrosilicate and on gypsum dehydrate surface low-soluble film appearing in same time which prevent gypsum molecules by high solubility. After some researches gypsum-cement binder's(GCB) stuff, real results have been taken which shows two things. The water resistance has been grown up but not so much. The second one – after some time samples of gypsum-cement binder(GCB) start being under internal deformation, which leads to strength losing on 1-3 months later after hardening[6 P.462]. In some cases there are crush of samples. And that negative side of GCB may be explained because a special mineral start appear inside the structure or if we may say like this inside solid body of GCB sample. According to chemistry is three-sulphate form of calcium hydro-sulphoaluminate but according to mineralogy that mine calls ettringite. That ettringite appear from calcium hydroaluminate with gypsum dehydrate reaction. By easy words it may be explained three calcium aluminate from cement plus calcium sulphate from gypsum equal ettringite in whole hardening system during 1-3 months after hardening[6 P.462]. Here we must remind that we have two types of ettringite: first and secondary. The first one appear fast in solution after water addition. The secondary start appear in system after hardening, inside of solid sample. Also the most important thing is concentrations of ions as Ca^{+2} and SO_4^{-2} . In two-component binder GCB there are high concentration and many of them comes by gypsum side reacting with three calcium aluminate from cement side and moisture, or extra moisture from atmosphere increase speed of that process, start from pores of solid sample where ettringite start its way. Appearing ettringite is a process of crystallization in pores, which comes with volume increasing, and that means increasing of tension. When that tension inside pores high up day to day cracks start appear in solid body and in the end of case sample has crushed by tension and cracks. Only that may be explained why we have compression strength losing during the time and It's negative side of ettringite appearing. So to demolish that negative ettringite side in two-component binder three-component – Gypsum-Cement-Pozzolanic binder(GCPB) have been invented by Mr. A. Volzhenskiy and his group of scientists. Under Mr. A. Volzhenskiy leadership some researchers have been made that shows, if we put some pozzolan additives in two-component binder we would achieve kind of stability of system with strength increasing in air and water conditions without

any plastic(crush) deformations[6 P.462]. According by Mr. A. Volzhenskiy's proposal in three-component binder(GCPB) hardening role of pozzo-lana explained as reducing $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentration in water conditions to that level when system hasn't got any circumstances of calcium hydroaluminate existence as $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ and $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; which qualify as highly-basic, and start redistribution process in low-basic consistence. During cement minerals hydration $\text{Ca}(\text{OH})_2$, or lime, start appearing and then react with pozzolana additive (SiO_2) and in the end of case calcium hydrosilicate forms in system as CSH(B). By other words low-basic calcium hydrosilicate start appear, which works as protective film for dehydrate gypsum, covering its, during his hydration from hemihydrate, and prevent his high solubility, increasing water resistance in whole three-component system. According by Mr. A. Volzhenskiy's opinion that kind of processes, which we have described above, demolish circumstances calcium three-sulphate hydroaluminate form, by easy words ettringite $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$, appearing in first and secondary time. Instead of that one-sulphate hydroaluminate form start appear - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, hydro grenades - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot (6-2n)\text{H}_2\text{O}$, gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, hydrosilicoaluminate $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ and their hard solutions. Transition three-sulphate hydroaluminate form in one-sulphate form comes with volume decreasing in 1,5 times of original stuff. That situation decrease critical tension by ettringite appearing. That process comes by reaction: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 15\text{H}_2\text{O}$. By other words when we demolish any circumstances of ettringite appearing(cement bacillus) in three-component binder (GCPB) we may achieve system stability in long-time hardening. Water resistance and hydro-hardening(hardening in water) may be explained as low-solubility compounds appearance in must cases, calcium hydrosilicate which protect dehydrate by water soluble action. According by Mr. A. Volzhenskiy's view that protection action start with 15-20% cement consistence in three-component binder[6 P.465].

By that author's work and their researches consistence of gypsum-cement-pozzolanic binder may consist by percentage of mass(%):

- Hemihydrate gypsum : 75 – 50
- Cement: 15-25
- Pozzolanic additives(with 200mg/g activity): 10-25

Main provisions

Target of research we may see in title and meaning of that is to catch connection physical-mechanical properties changing as water requirement, setting time, compression strength in 2 hours age, compression strength after whole natural drying system(7 days, 14 days – depend of ratio actually), compression strength after steaming chamber, water resistance(Softening factor K_s); during transition gypsum binder to gypsum-cement binder and then to gypsum-cement-pozzolanic binder. Not seeing at this extra target of research have been X-Ray spectroscopy results examining by gypsum-cement binder and gypsum-cement-pozzolanic binder for three-sulphate and one-sulphate calcium hydrosulfoaluminate form which have been described by Mr. A. Volzhenskiy.

Materials and methods

In that work some materials have been used for ratios preparing:

- Gypsum binder – construction gypsum by “Alinex” KZ company, G-5 according to GOST 125-2018[7].
- Cement binder – white portlandcement M500-A0 by “ChemTrade”
- Pozzolanic additive – microsilica mark “MKH - 95” by “Tau-Ken Temir” with 100 mgCaO/g activity.

Gypsum-cement binder(GCB) compound was consist: hemihydrate gypsum – 75%; white cement – 25% as we see here is proportion 3:1. In same proportion have been kept in gypsum-cement-pozzolanic binder(GCPB) but after pozzolana addition by whole mass percentage: hemihydrate – 62%; white cement – 20%; pozzolana – 18%. Increasing pozzolana percentage comparing with Mr. Volzhenskiy's compound may be explained by its activity 100 mgCaO/g which is half according by Mr. Volzhenskiy's compound(200 mg CaO/g). Physico-mechanical tests of gypsum binder, GCB, GCPB have been based on GOST 23789 – 2018 «Gypsum binder. Test methods» with changing with few cases. According by GOST

23789 – 2018 some characteristics have been determined as standard consistence, using with Suttard's cylinder, setting time, for strength checking beams 160x160x40 mm have been prepared. After 15 ± 5 minutes hardening samples have been leaving in air conditions $t = 22 \pm 2^\circ\text{C}$. Some pieces have been tested in 2 hours age, other pieces have been tested after steaming chamber keeping – 2 hours increasing to 75°C and then 6 hours steaming. Third group of beams have been leaving for 7 days strength tests. Half of piece have been tested in 7 days, second piece have been put in water for softening factor (softening coefficient K_s) determination, after 2 days keeping in water. Softening factor (K_s) have been calculated as proportion – compression strength 7 days drying plus 2 days lying in water divided by compression strength in 7 days age. That kind of methods have been used in every rations: gypsum binder (GB), gypsum-cement binder (GCB), and gypsum-cement-pozzolan binder (GCPB). One turning in GCB and GCPB, we use two methods of sample keeping – water conditions (moisture 100%) and hydro-both, during 7 days and then air conditions as in gypsum binder. That kind of methods described in TC 21-31-62-89 «Gypsum-cement-pozzolan binder. Technical conditions». After tests experiment few grams have been taken for X-Ray spectroscopy with using «Drone - III» machine, for sulphate forms checking.

Results and discussion

Results of research have been shown in table 1 by three rations GB, GCB, GCPB.

As we may see from table 1 results water requirement was the same at each ratio, 52% by mass of compound. Flow test by Suttard's cylinder also same for GB and GCB but have been decrease for GCPB, which may be explained microsilica presence – 18% by mass of ratio. Here we have dependence – if we increased water we would keep mixture flow and vice versa if we kept water proportion our flow would change. Comparing setting time of three rations we may see that there weren't any changings, that ability have been inherited by gypsum binder.

The second point is setting time in GCB and GCPB totally the same as beginning and ending. For explaining that effect we must remember that in hemihydrate – $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ we also have impurities, as dehydrate – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and anhydrite – CaSO_4 .

Table 1 – Mechanical tests

Type of binder	Water requirement	Setting time	Compression strength N/mm ²				K_s
	Flow	<u>begining</u> <u>ending</u>	2 hours age	After drying	After water inf.	Steaming chamber	
1	2	3	4	5	6	7	8
GB	52 %	12 min.	5,08	14,5	4,75	4,2	0,327
	188 – 190 mm.	22 min.					
GCB	52 %	9 min.	5,02	13,21	5,91	6,21	0,447
	185 mm.	14 min.		11,75			
GCPB	52 %	9 min.	4,00	16,04	12,84	7,87	0,8
	120 mm.	13 min.		12,59			

NOTE: According to column 5 for GCB and GCPB rations in numerator have shown results that's we take after hydro-both keeping during 7 days and then drying in air conditions. In denominator have shown results which have been taken after 7 days water keeping (moisture 100%) and then drying in air conditions.

According to this dehydrate phase in that involves for setting time, organise kind of dotes which work as central of crystallization hemihydrate to dehydrate transformation. So as much dehydrate impurities in hemihydrate as many crystallization centres would be and as fast setting time would be. In our case dehydrate quantity have been increased also by dehydrate from cement. As a result of that addition was central crystallization increasing and setting time of GCB and GCPB became faster than GB. The same beginning time may be explained as proportion keeping between cement and gypsum. According by compression strength in 2 hours age we may see gypsum binder influence in every rations. As an example

GB – 5,02 N/mm², GCB – 5,08 N/mm². Not so big difference, as from cement minerals in that time only three-calcium aluminate being in reaction with dehydrate. But if we see on GCPB we may notice 4,00 N/mm² strength in 2 hours age which had fallen down and may be explained that mineral additive – microsilica hasn't started to work yet. Compression strength which have been shown in 5-th column almost the same GB – 14,5 N/mm², GCB – 13,2 N/mm², and GCPB – 16,04 N/mm². And that kind of results may prove theory that properties of GCB and GCPB more close by gypsum which share was 75% and 62% respectively. According to above paragraphs we may conclude that during application GCB and GCPB where gypsum and cement stay in 3:1 proportion physico-mechanical properties would't change so much as compression strength increasing and others as water requirement, setting time, strength in 2 hours age also would be inheriting by gypsum binder. Now let's try to understand differences between GCB and GCPB according to table 1 results. At first one is storage conditions. As we may know by material science gypsum is an air binder – a binder which after water addition and hardening increase and keeps its strength in air conditions – moisture 55±5 % and loose strength in water. But in our research work when we have prepared GCB and GCPP samples we have combined storage conditions: 1) some samples have been kept in hydro-both; 2) others have been kept in water conditions – moisture 95±5%(for one sample at each condition). After 7 days keeping samples was took out and here we have change conditions still keep its in air condition drying until constant mass(7 days or 14 days – depend to ratio). At conclusion of this we may notice that GCB and GCPB are not air binders they are hydraulic binders as they may be leaving and increasing its strength in water. The second point, which may prove that theory, is experiments in steaming chamber – table 1, column 7-th. Gypsum binder in that case have been shown 4,2 N/mm² which proves creping factor of that material – after water influence it start loose strength. And here wasn't only water influence, it was boiling water – steam and temperature 85±5° C. With GCB and GCPB was vice versa, as we may see from table 1, 7-th column – GCB – 6,21 N/mm², comparing with 2 hours age – 5,02 N/mm². Gypsum-cement-pozzolan binder after steaming chamber – 7,87 N/mm² comparing with 2 hours age 4,00 N/mm². Here we have second evidence which describe them(GCB and GCPB) as hydraulic binders. The third point of differences between GB on one side and GCB, GCPB on the other side was softening factor(softening coefficient - K_s) – 8-th column. According to gypsum binder(air binder) $K_s = 0,327$; to gypsum-cement binder – $K_s = 0,447$ which may qualified as middle water resistance material ($K_s = 0,45-0,6$). Comparing results GCPB where $K_s = 0,8$ and may qualified as water resistance material and also we may notice here that K_s of cement stay in rang 0,6-0,8. Also we may add some observations when our beams have drying until constant mass, as an example for GB and GCB that process was coming 7 days(7 days in water + 7 days in air conditions for GCB) there weren't internal moisture at all. Beams from GCPB which have been half for pieces after 7 dry-days was in 2/3 of internal moisture and drying process have been finished in 1/3 area of sample only on edges. The others 2/3 have been dried extra 10 days. That mean for GCPB binder 7 days in water + 17 days in air conditions – $t = 20 \pm 2^\circ \text{C}$, moisture 55 – 60. That effect may be explained as – lime $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which appearing from cement hardening start react with pozzolana additive(SiO_2) and organizing calcium hydrosilicates – CSH(I). That element form kind of film which cover gypsum dehydrate molecules, increase water resistance, decrease diffusion and water molecules evaporation outside of sample. Also we need notice here some important moments. At first one is that samples GB, GCB and GCPB as in 2 hours age and as after steaming chamber was in moisture condition that's explain numbers of compression strength. During drying process until constant mass, which we still keep after steaming chamber(steaming chamber process + drying until constant mass) that results have changed: GB – 10,34 N/mm²; GCB – 13,41 N/mm²; GCPB – 13,83 N/mm². Comparing with 5-th column results, which also have been prepared and drying, but without steaming process, we may see one thing: GB – 14,5 N/mm²; GCB 13,21 N/mm²; GCPB – 16,04 N/mm², so according to this gypsum binder loose its strength – 28,7 %. Meanwhile GCB and GCPB after steaming chamber + drying was the same as normal hardening. According to this we may conclude that hardening process of GCB and GCPB may come with two ways: 1) normal hardening – moisture 95±5 %, $t = 20 \pm 2^\circ \text{C}$; 2) fast hardening – steaming chamber $t = 85 \pm 5^\circ \text{C}$ for 6 hours. The secondary are differences between GCB and GCPB in storage conditions. As an example 7 days in hydro-both and 7 days in water may explain our results difference in compression strength. Everything have shown in 5-th column from what we may conclude – the most effective circumstances of storage conditions wasn't in water it was in hydro-both as it has shown better

compression strength. That effect may be explained by one thing – when we keep our samples in water there is lime $\text{Ca}(\text{OH})_2$ leaching in water, as we may see that our water had became with white powder around. According to this calcium hydrosilicates in water samples were weaker than in hydro both. The most noticeable it was in GCPB hardening. By this we may conclude that extra calcium hydrosilicates, which appearing after $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and pozzolana (SiO_2) reaction, make a positive effect for GCPB strength.

X-Ray spectroscopy results in gypsum-cement binder and gypsum-cement-pozzolanic binder compounds. After hardening some samples have been taken for X-Ray analysis. GCB results have been shown on «GCB 7 + 7» X-Ray Graph (Figure 1) and GCPB results have been shown on «GCPB steaming» X-Ray Graph. Here we must say that GCPB on X-Ray analysis have been tests after steaming chamber + 7 days dry process. As we said later the main goal of X-Ray spectroscopy was – calcium hydroaluminate(ettringite) – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ availability. And that's for GCB but if we say about GCPB, we have searched for one-sulphate form - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, which have been described by Mr. A. Volzhenskiy in middle of 60-x.

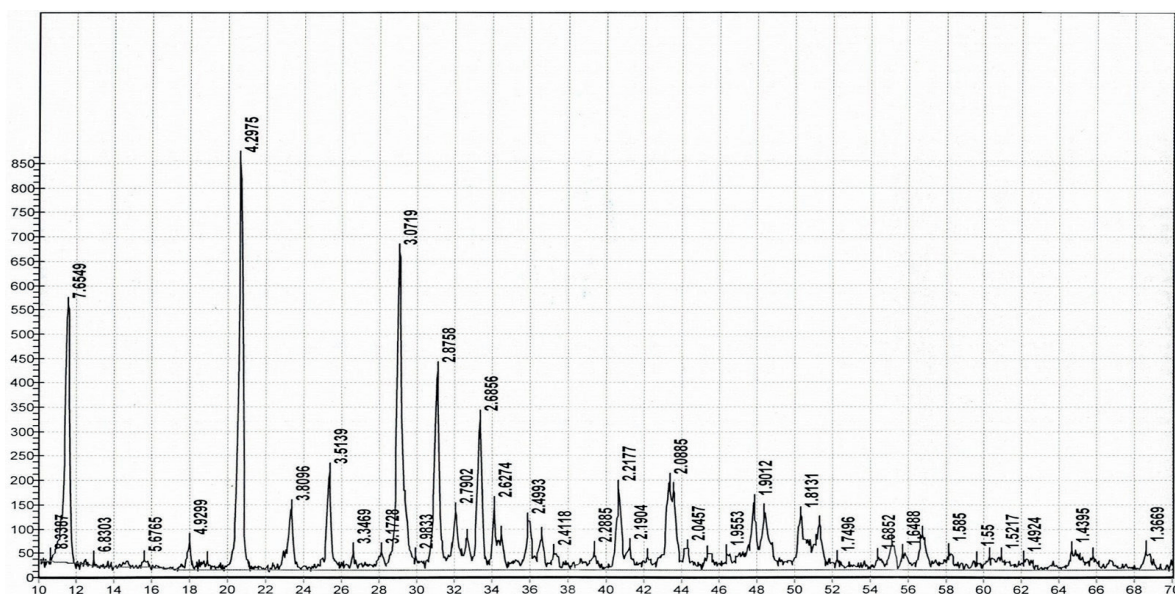


Figure 1 – “GCB 7 + 7” X-Ray Graph

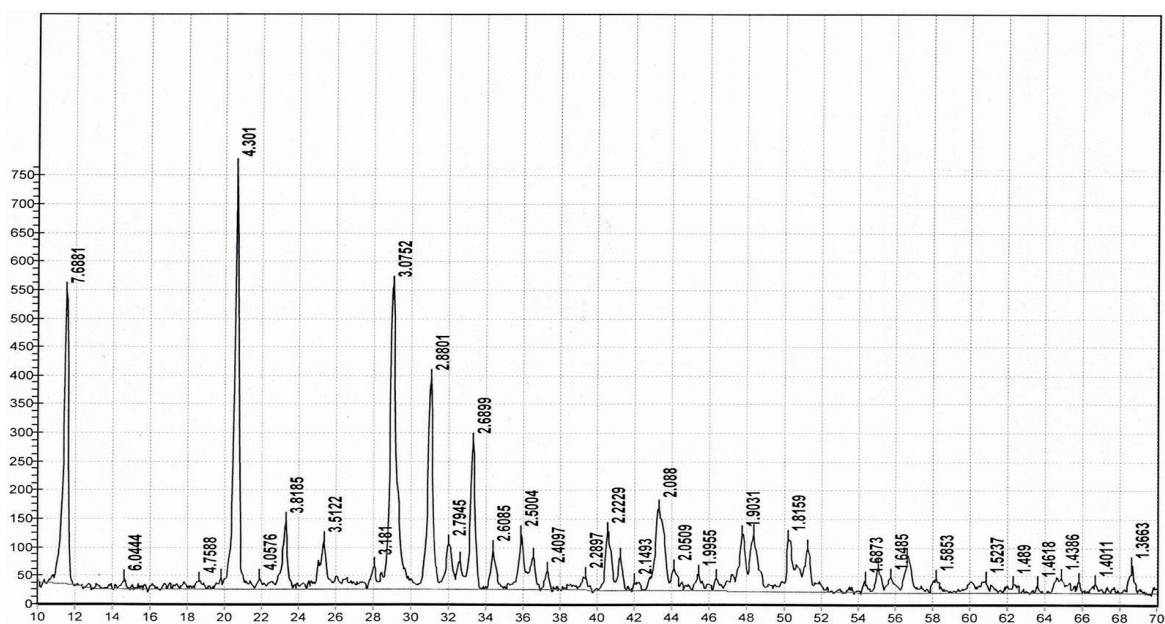


Figure 2 – “GCPB steaming” X-Ray Graph

Comparing the graphs we may see same high diffraction maximums with high intensity d , Å: 7,65(7,68); 4,29(4,30); 3,071(3,075) and more weaker as 3,80(3,81); 2,87(2,88); 2,68(2,68) which explains dehydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ availability (GCPB – number in brackets, GCB number outside of brackets). Our qualification that mine the same as in resource [10 P.196]. The others diffraction maximums have low intensity line and may be qualified as cement mines. That low intensity may be explain by concentration of cement in any compound – GCB(25%)? GCPB(20%). On GCB X-Ray graph (Figure 2) we may notice low-lines which may be qualify as ettringite (three-sulphate form $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) d , Å: 5,67(5,61); 4,93(4,98); 2,79(2,733); 2,627(2,616); 2,288 (2,230) (ettringite – number in brackets, GCB graph number outside of brackets) [10 P.285]. GCPB X-Ray graph have shown on picture 2, where we haven't see any low-lines intensity which may prove ettringite availability. But here we may see one-sulphate form ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) low-lines as d , Å: 2,88(2,87); 2,79(2,73); 2,409(2,41); 1,815(1,82); 1,648 (1,66) – one-sulphate form – number in brackets, GCPB graph number outside of brackets [10 P.284]. According by this Mr. A. Volzhenskiy's theory, one-sulphate form of calcium hydrosulphoaluminate appearing in GCPB instead of ettringite (three-sulphate form), have been proved in our research. And also we may highlight one difference between GCB and GCPB graphs. In GCB there are $\text{Ca}(\text{OH})_2$ low-lines availability d , Å: 4,93(4,93); 2,627(2,63); 1,95(1,93) and there aren't in GCPB X-Ray graph ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – number in brackets according to [10 P.292], GCB X-Ray graph with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lines – number outside of brackets) [10 P.292]. According to this we may conclude that we haven't got any “galos” by amorphous microsilica as mineral additive and that means there were reaction between $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and SiO_2 in GCPB, but in GCB $\text{Ca}(\text{OH})_2$ has still stay in three way.

Conclusion

In conclusion we may say in that work we have proved Mr. A. Volzhenskiy's two theories about gypsum-cement-pozzolanic binder.

1) Gypsum-cement-pozzolanic binder compound – hemihydrate – 62%; cement (white cement) – 20%; mineral additive with 10 mg CaO/g activity – 18%. Every properties have been inherited by gypsum binder but it's not air binder as they increase its strength in water, in steaming process and in air-moisture conditions – hydro both. That kind of hydro-binder, which hardening process comes in water and in steaming conditions, have higher softening factor (K_s) which same as cement.

2) In GCPB there isn't any circumstances for ettringite appearing, internal tensile and future system damage during water and sulphate influence as it comes for gypsum binder.

REFERENCES

- 1 Properties of construction and high-strength gypsum, Internet source, pp. 2–3 (https://ozlib.com/953360/himiya/svoystva_stroitelного_vysokoprochnogo_gipsa).
- 2 Composite binders. Methodological guidelines for the implementation of course work for students in the direction 270800.62 “Construction”, profile “production of building materials, products and structures”. Moscow State University of Civil Engineering, Department of Technology of Binders and Concretes. Internet source. Moscow, 2014. P. 6. (<https://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Instituti/ISA/metodobesp/tekhnologiya-vyazhushchikh-veshchestv-i-betonov/Metodicheskie%20materialy%20po%20kompozicionnym%20materialam.pdf?ysclid=l2fyxpufru>).
- 3 Popov L.N. Laboratory control of building materials and products: Handbook. Moscow, Stroyizdat, 1986.
- 4 Popov K.N., Kaddo M.B., Kulkov O.V. Assessment of the quality of building materials. Moscow, DIA, 1999.
- 5 Internet source: Properties of construction and high-strength gypsum. P. 3. (https://ozlib.com/953360/himiya/svoystva_stroitelного_vysokoprochnogo_gipsa).
- 6 Volzhenskiy A.V., Burov Yu.S., Kolokolnikov V.S. Mineral binders. Moscow: Stroyizdat, 1973, pp. 462–466.
- 7 GOST 125-2018 “Gypsum binders. Technical conditions”. Minsk, Eurasian Council for Standardization, Metrology and Certification, 2018.
- 8 GOST 23789-2018 “Gypsum binders. Test methods”. Minsk, Eurasian Council for Standardization, Metrology and Certification, 2018.
- 9 TC 21-31-62-89 “Gypsum-cement-pozzolan binder. Technical conditions” (1989). Moscow, Publishing House of Standards, 1989.
- 10 Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physico-chemical analysis of binders. Moscow, Higher School, 1981, pp. 196, 284, 285, 292.

Information about authors

Odintsov Daniil Sergeevich (corresponding author)

Laboratory-engineer, engineer of mechanical-test department of “Central Laboratory of Tests and Certification Construction Materials”, 95 Ryskulov St., 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-9458-5000

E-mail: danila.odintsov@inbox.ru

Suvorov Aleksandr Sergeevich

Laboratory-engineer, engineer of X-Ray spectroscopy department of “Central Laboratory of Tests and Certification Construction Materials”, 95 Ryskulov St., 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-7259-3835

E-mail: alekssuvorov00@mail.ru

Estemesov Zatkali Airanbaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Headmaster of “Central Laboratory of Tests and Certification Construction Materials”, 95 Ryskulov St., 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-8725-3735

E-mail: tselsim@mail.ru

Barvinov Andrei Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Headmaster in Certification Department of “Central Laboratory of Tests and Certification Construction Materials”, 95 Ryskulov St., 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-5290-4296

E-mail: tselsim@mail.ru

Mrutyunjay Panigrahi

PhD in Metallurgical and Materials Engineering

School of Mechanical Engineering, Vellore Institute of Technology, Chennai, 600127, Tamil Nadu, India

ORCID ID: 0000-0003-2738-502X

E-mail: mrutyunjayjapan@gmail.com

Авторлар туралы мәліметтер

Одинцов Даниил Сергеевич (корреспонденция авторы) «ЦелСИМ» ЖШС құрылыс материалдарын сертификаттық сынақтардың орталық зертханасының физика-механикалық сынау инженері, Рысқұлов 95, 050000, Алматы қ, Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-9458-5000

E-mail: danila.odintsov@inbox.ru

Суворов Александр Сергеевич

«ЦелСИМ» ЖШС құрылыс материалдарын сертификаттық сынау орталық зертханасы РФА-спектроскопия инженері, Рысқұлов көшесі, 95, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-7259-3835

E-mail: alekssuvorov00@mail.ru

Естемесов Заткали Айранбаевич

Техника ғылымдарының докторы, профессор, «ЦелСИМ» ЖШС құрылыс материалдарын сертификаттық сынау орталық зертханасының директоры, Рысқұлов 95, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-8725-3735

E-mail: tselsim@mail.ru

Барвинов Андрей Владимирович

Техника ғылымдарының кандидаты, «ЦелСИМ» ЖШС құрылыс материалдарын сертификаттық сынақтар Орталық зертханасының сертификаттау бөлімінің бастығы, Рысқұлов 95, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-5290-4296

cc tselsim@mail.ru

Мрутунжай Паниграхи

Металлургия және материалтану ғылымдарының кандидаты

Машина жасау мектебі, Веллоре технологиялық институты, Ченнай, 600127, Тамил Наду, Үндістан

ORCID ID: 0000-0003-2738-502X

E-mail: mrutyunjayjapan@gmail.com

Информация об авторах

Одинцов Даниил Сергеевич (автор для корреспонденции)

Инженер физико-механических испытаний, ТОО «ЦелСИМ» – Центральная лаборатория сертификационных испытаний строительных материалов, ул. Рыскулова, 95, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-9458-5000

E-mail: danila.odintsov@inbox.ru

Суворов Александр Сергеевич

Инженер РФА спектроскопии ТОО «ЦелСИМ» – Центральная лаборатория сертификационных испытаний строительных материалов, ул. Рыскулова, 95, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-7259-3835

E-mail: alekssuorov00@mail.ru,

Естемесов Заткали Айранбаевич

Доктор технических наук, профессор, директор ТОО «ЦелСИМ» – Центральная лаборатория сертификационных испытаний строительных материалов, ул. Рыскулова, 95, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-8725-3735

E-mail: tselsim@mail.ru

Барвинов Андрей Владимирович

Кандидат технических наук, начальник отдела сертификации ТОО «ЦелСИМ» – Центральная лаборатория сертификационных испытаний строительных материалов, ул. Рыскулова, 95, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-5290-4296

E-mail: tselsim@mail.ru

Мрутунджай Паниграхи

Кандидат технических наук в области металлургии и материаловедения

Школа машиностроения, Технологический институт Веллора, Ченнай, 600127, Тамил Наду, Индия

ORCID ID: 0000-0003-2738-502X

E-mail: mrutyunjayjapan@gmail.com

ӨОЖ 546.48

FTAXP 31.17.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-4-17-26>**Сдикова Г.Ж.*¹, Шамилова А.Ж.¹**¹М.Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университеті
090500, Орал қ., Қазақстан

*E-mail: sdikova.guliya@mail.ru

**КАДМИЙ НЕГІЗІНДЕГІ ГАЛЬВАНИКАЛЫҚ ҚАПТАМАЛАРДЫ ЕНГІЗУ
ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

Аңдатпа. Қазіргі заманғы технологиялық даму деңгейіне қол жеткізу үшін Қазақстан Республикасының экономикалық, ғылыми-техникалық қарқынды дамуы техника-экономикалық жағынан тиімді әдістерді қолданып, металл бұйымдары мен құрылғыларын кеңінен өндіруді қажет етеді. Сол мақсатта тотығуға төзімді, әрі тиімді металл бұйымдары мен бөлшектерін өндірудің негізгі жолдарының бірі – кадмийлеу болып табылады. Кадмий қаптамасы икемді, жаншып қаптауға, штамптауға, бүгілуге жеңіл ұшырап, жаңадан түзілген қаптамалары мырышқа қарағанда қышқылсыз флюстарда жақсы дәнекерленеді. 2Х18Н10Т маркалы болаттан жасалған тотықпайтын таспаны кадмийлеудің технологиясына зерттеу жүргізілді. Кадмий электролиттерінің түрлері мен құрамына салыстырмалы талдау жасалды. Алынатын қаптаманың сапасына әсер ететін факторлар зерттеліп, бұйымдардың электролизден кейінгі байқалатын негізгі көрсеткіштеріне есептеу жүргізілді. Қаптаманың сапасы электролиттің құрамына, оның температурасына және ток тығыздығына байланысты өзгеріске ұшырайтыны анықталды. Беттік-белсенді заттарды пайдалану барысында потенциал арту мүмкіндігіне ие болып, берік қаптама қабатын алуға септігін тигізді. Соның ішінде декстрин, желатин, столяр желімі сияқты беттік-белсенді заттармен жұмыс жасалды. Беттік-белсенді зат қолданылмаған жағдайда кадмиймен қапталған таспаның жылтырлығының болмайтыны көрінді. Ток шамадан тыс берілген кезде таспа майда түйіршіктермен қапталып, қарайып кететіндігі анықталды. Таспаны кадмийлеу барысында уақыттың мәні артқан сайын таспа бетіне шөгілген кадмий қабаты арта түскені байқалды.

Тірек сөздер: гальваникалық қаптамалар, кадмийлеу, металл бұйымдар, электролит, БАЗ.

Sdikova G.Zh.*¹, Shamilova A.Zh.¹¹West Kazakhstan University named after M.Utemisov
090500, Uralsk, Kazakhstan

*E-mail: sdikova.guliya@mail.ru

**FEATURES OF THE IMPLEMENT OF CADMIUM-BASED
ELECTROPLATING COATINGS**

Abstract. The rapid economic, scientific and technical development of the Republic of Kazakhstan in order to achieve the modern level of technological development requires a wide production of metal products and equipment using technically and economically effective methods. For this purpose, one of the main ways of producing corrosion-resistant and efficient metal products and parts is cadmium plating. Cadmium plating is flexible, easily amenable to rolling, stamping, bending, freshly prepared sheathing is better welded on acid-free fluxes than zinc. A study of the technology of cadmium tape made of stainless steel grade 2X18H10T. A comparative analysis of the types and composition of cadmium electrolytes was carried out. The factors affecting the quality of the resulting packaging are investigated, the calculation of the observed main indicators of products after electrolysis is carried out. It is established that the quality of the coating undergoes changes depending on the composition of the electrolyte, its temperature and current density. The surfactant contributed to the production of a durable packaging layer with the possibility of increasing potency during use. Including work with such surfactants as dextrin, gelatin, carpentry glue. It was seen that the cadmium-coated tape has no gloss unless a

surfactant is used. It was found that when the current is overvoltage, the tape is covered with fine-grained granules and darkens. When the tape was cadmated, the cadmium layer deposited on the surface of the tape increased with increasing time.

Key words: electroplating coatings, cadmium plating, metal structures, electrolyte, surfactants.

Сдикова Г.Ж.^{*1}, Шамилова А.Ж.¹

¹Западно-Казахстанский университет им. М.Утемисова

090500, г. Уральск, Казахстан

*E-mail: sdikova.guliya@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАДМИЯ

Аннотация. Для достижения современного технологического уровня, стремительного экономического и научно-технического развития Республики Казахстан требуется широкое производство металлических изделий и оборудования с применением эффективных с технико-экономической точки зрения методов. Для этого одним из основных способов получения коррозионностойких и эффективных металлических изделий и деталей является кадмирование. Кадмированное покрытие гибкое, легко поддается смятию, штамповке, изгибу, лучше паяется в неокислотных флюсах, чем покрытия на основе цинка. Проведены исследования по технологии кадмирования детали из нержавеющей стали 2Х18Н10Т. Проведен сравнительный анализ типов и состава кадмиевых электролитов. Изучены факторы, влияющие на качество получаемого покрытия, рассчитаны основные показатели, наблюдаемые после электролиза. Установлено, что качество покрытия меняется в зависимости от состава электролита, температуры и плотности тока. Во время использования ПАВ потенциал увеличился, что способствовало получению прочного слоя покрытия. В качестве поверхностно-активных веществ были использованы декстрин, желатин, столярный клей. Было обнаружено, что пластинка с кадмиевым покрытием не имеет блеска в отсутствие поверхностно-активного вещества. Было обнаружено, что при чрезмерном употреблении тока металлическая пластинка покрывается мелкими вкраплениями и чернеет. При нанесении гальванического покрытия на основе кадмия отмечено, что слой кадмия, осажденный на поверхности пластинки, увеличился по истечении времени.

Ключевые слова: гальванические покрытия, кадмирование, металлоизделия, электролит, ПАВ.

Кіріспе

Қазақстан Республикасы гальваникалық өндірісі дамыған елдің бірі болып табылады. Гальваникалық өндірістердің дамуы жоғары, өйткені металл бұйымдарын тотығудан қорғау мақсатында әр түрлі қаптамалар қолданылады. Болаттан жасалған бөлшектерді тотығудан қорғау үшін кадмий қаптамалары көп сұранысқа ие. Себебі кадмий атмосфералық және теңіздік жағдайда тотығуға тұрақты болып табылады. Кадмий қаптамалары тұрақты (әсіресе сілтілік ортада) және түрлі түсті, сонымен қатар қорғаныш қабатының иілгіштігі жоғары болып келеді. Гальваникалық қаптауға арналған бұйымдар әдетте механикалық өңдеу нәтижесінде майлау материалдарымен ластанып, термиялық өңдеуден кейін немесе атмосфералық әсер ету нәтижесінде оксидтермен жабылады.

Кадмиймен қаптау - бұйымдарды кадмий металының жұқа қорғаныс қабатымен қаптайтын материалды тұндыру процесі. Жабындар бірнеше тәсілдермен қапталады. Соның ішінде электр тогы өтетін кадмий тұзы ерітіндісінің құтыларына қабылдаушы заттарды батыру. Кадмиймен қаптау процестері кішірек заттарға арналған механикалық және вакуумдық әдістерді және жоғары біркелкі жабындарды беруді қамтиды. Кадмий танымал қаптау материалы болып табылады. Өйткені ол бұйымдарға тотығуға жоғары төзімділік, төмен үйкеліс коэффициенттері және жоғары дәрежелі электр өткізгіштік береді. Кадмийді қаптау материалы пайдалануы экологиялық мәселелерге байланысты қатаң бақылауға алынды [1, 2].

Негізгі қағидалар

Кадмийленген жабын - берік және әмбебап металлдық жабын. Кадмий – жұмсақ ақ металл. Ол

болатқа, шойынға, иілгіш темірге, мыс және ұнтақ металға жабылған кезде субстрат материалының алдында коррозияға ұшырайтын «құрбандық жабын» қызметін атқарады. Кадмий жабынының коррозияға қарсы қорғанысын арттыру үшін алтын түс беретін хроматты түрлендіру жабындары жалатылған металдың үстіне жағылуы мүмкін. Зәйтүн түсі сияқты басқа түстер де қол жетімді [3].

Кадмиймен қаптау композициялары мен процестерінің бірнеше түрлері белгілі. Бірақ олардың көпшілігі бар құнына немесе өндеудің күрделілігіне, өнімнің біркелкілігін сақтау қиындығына байланысты коммерциялық пайдалануға бейімделмеген. Гальваникалық қаптау әрқашан барлық процестің ажырамас бөлігі болып табылатын бетті дайындау. Яғни қапталған өнімдердің бетінен май мен оксидтерден тазартудан бастау алады [4, 5]. Бетті мұқият тазалау одан әрі гальваникалық операциялардың таптырмас шарты болып табылады.

Дайындық операциялары механикалық немесе химиялық жолмен жүзеге асырылады. Механикалық әдістерге абразивті ұнтақтармен өндеу, бұрау, тегістеу, жылтырату және щеткамен өндеу сияқты процестер, ал химиялық әдістерге майсыздандыру, ою, белсендіру (декапирлеу), жуу, сондай-ақ жабуға болмайтын беттік аймақтарды оқшаулау жатады. Абразивті ұнтақтармен өндеу және жұмырлау - өндірістік жағдайда қолданылатын әдістер. Абразивті ұнтақпен өндеу қондырғысы араластырғышпен немесе орталықтан тепкіш сорғымен жабдықталған және құрғақ ұнтақпен немесе абразивті ұнтақтың сумен суспензиясымен толтырылған болат резервуардан тұрады [6]. Қажетті қысым сығылған ауамен қамтамасыз етіледі.

Бөлшектерді тазалауға арналған ауа қысымы бөліктер қабырғасының қалыңдығына байланысты 50 және 500 кПа аралығында болуы керек. Абразивті суспензиямен өңделген бөлшектер ыстық немесе суық сумен ванналарда жуылады және кептіру шкафтарында 85-100 °C температурада кептіріледі немесе сығылған ауамен үрленеді.

Электр жабыны алдында заттарды тазалаудың арзан әрі оңай жолы - оларды құрамында гидроксидтер, карбонаттар, фосфаттар, полифосфаттар, метасиликаттар, беттік-белсенді заттар және жуғыш заттар бар сілтілі ванналарда жуу. Кадмиймен қаптаудың көп бөлігі еріту арқылы дайындалған сілтілі цианид ванналарында жүзеге асырылады (натрий цианидінің ерітіндісіндегі кадмий оксиді). Натрий гидроксиді және натрий карбонаты құрамындағы реакциялар нәтижесінде түзіледі және олардың құрамына кіреді [7]. Болат сым торларында ілінген кадмий шарлары қаптау анодтары ретінде қызмет етеді. Натрий гидроксиді жоғары жууға қабілеттіне ие, бірақ мыс, мырыш және алюминий қорытпаларына агрессивті келеді. Сонымен қатар, оны жуу қиын. Натрий карбонаты жан-жақты және аз агрессивті майсыздандыру ваннасының компоненті болып табылады, сондықтан түсті металдар үшін жарамды. Тринатрийфосфаты судың кермектігін төмендетеді және металл беттерінен оңай жуылады. Тазаланатын бөліктерде кремний диоксиді түзілу мүмкіндігіне байланысты оны анодты электролиттік майсыздандыруға арналған қоспа ретінде қолдануға болмайды [8]. Жуу ерітінділерін сілтілік дәрежесіне қарай үш топқа бөлуге болады:

- а) болат бұйымдарды алдын ала тазалау күшті сілтілі (pH = 12–14);
 - б) электролиттік майсыздандыру алдында болат бұйымдарды тазалауға арналған орташа сілтілі (pH = 10–12);
 - в) түсті металдарды майсыздандыру үшін аздап сілтілі (pH = 8–10).
- Химиялық майсыздандыруға арналған сілтілі ерітінділердің құрамы 1 кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Электрохимиялық майсыздандыруға арналған ерітінді

Компонент, г/л	Ерітінді түрі		
	№1	№2	№3
Натрий гидроксиді	200	-	35
Сұйық шыны	500	35	-
Натрий фосфаты	280	15	14
Сусыз көмір қышқылы	-	-	62
Ылғалдандырғыш	30	2	6

№1 ерітінді болаттан және шойыннан жасалған бұйымдарға қолданылады. Барлық компоненттерді 0,6 л суда ерітіп, 1 л көлемге су қосылады. Алынған концентрлі ерітіндіні тәжірибелік қолдануда 1:10-нан 1:30-ға дейінгі арақатынаста сұйылту керек. №2 ерітінді барлық компоненттерді 0,6 л суда ерітіп, 1 л көлемінде қосымша су құяды. №3 ерітінді мыс бөліктері мен оның қорытпалары үшін қолданылады. Барлық компоненттерді аз мөлшерде суда ерітіп, 1 л көлемінде су қосылады. Электрохимиялық майсыздандыру химиялық майсыздандыруға қарағанда бетті тазалаудың тиімдірек әдісі болып табылады. Өйткені бөлшектердің бетінде бөлінетін сутегі немесе оттегі көпіршіктері май бөлшектері мен басқа ластаушы заттардың бөлінуіне ықпал етеді. Электрохимиялық майсыздандыру катодтық және анодтық болуы мүмкін. Электрохимиялық майсыздандыруға арналған ванналар көбінесе катодтық және анодтық майсыздандыру үшін бір ваннаны пайдалануға мүмкіндік беретін полності ауыстырғышпен жабдықталған. Катодты майсыздандыру кезінде ваннадағы қоспалар түріндегі металдар бөлшектердің бетіне шөгеді. Ол күңгірт, қиын еритін жабын түрінде көрінеді. Кейде майсыздандырудан кейін бетті белсендіру үшін қолданылатын қышқыл ерітінділерде толық ерімейді. Анодтық майсыздандыру бетіндегі оттегіні босатып, беттік тотығуды тудырады. Бұл өте ұзақ процесс және тым жоғары температура мен жоғары ток тығыздығы бар мыс пен жездің қараюына әкелуі мүмкін. Бұл қараю тіпті өте сұйылтылған қышқылдарда да оңай жойылады.

Электролиттік майсыздандыруда жақсы нәтижелерге жету үшін келесі ережелерді сақтау қажет:

- 1) Ұсынылған майсыздандыру уақытын асырмау. Себебі бұл бөлшектердің сутегімен қанығуына, бетінің қараюына және серіппелі бөлшектердің сынғыштығына әкеледі;
- 2) Серіппелер мен жұқа қабырғалы болат бөлшектерді (1 мм-ге дейін) тек анодпен өңдеу керек;
- 3) Мыс пен оның қорытпаларынан жасалған бөлшектерді тек катодта майсыздандыру керек, өйткені анодтық процесс кезінде бұйымдар тотығып, күңгірттенеді;
- 4) Бұйым мырыш, қалайы, қорғасын және хром сияқты қабаттан тұрмауы керек, олар еруі нәтижесінде электролиттерді ластайды [9, 10].

Материалдар мен әдістер

Эксперименттік жұмыс барысында электролизердің өлшемдеріне сәйкес тотықпайтын болаттан жасалған таспа қолданылды (12X18H10T маркалы таспа). Жұмыс жасалудағы ең бірінші кадам - түйіршіктері әртүрлі өлшемді (ірі немесе майда) келетін егеуқұм қағазымен тазарту. Алдымен бұйымдарды ірі түйіршікті егеуқұм қағазымен өңдеу жұмысы жүргізілді. Бұйымның аудан бетіндегі ірі сызаттарды толықтай жою үшін бөлшектер дистилденген сумен әбден жуылып, натрий гидроксидімен майсыздандырылды. Кейін күкірт немесе тұз қышқылының әлсіз ерітіндісімен тазартылды. Өндеуден кейін таспа эксикаторда кептірілген соң, ақ таза қағазға оралды. Майсыздандыру процесі натрий гидроксиді қатысында, 0,36 А/дм² тогымен 10 мин уақыт ішінде жүзеге асырылды. Электрохимиялық тазарту күкірт қышқылымен (H₂SO₄) 0,36 А/дм² ток жіберіп, 20 мин қатысында жүргізілді.

Электрохимиялық кадмийлеу кезінде катод ретінде маркасы 12X18H10T тотықпайтын болаттан жасалған таспалар қолданылды (таспа жалпы ауданы – 8 см²). Ерімейтін анод ретінде графит алынды. Құрамында кадмий тұзы, аммоний тұзы және әртүрлі қоспалар, мысалы, НФ диспергаторы, ұста желімі, ундецилфосфин қышқылының диэтанолламин тұзы бар кадмий электролиті белгілі. Берілген электролиттің кемшілігі – сілтілі аккумуляторлардың электродтық пластиналарының қалыптасу сатысында тығыз тегіс жылтыр тұнбаға байланысты белсенді материалдар қабыршақтанады. Сонымен қатар белсендіргіш қоспаны (ундецилфосфин қышқылының диэтанолламин тұзы) өнеркәсіп дамымағандықтан және құны жоғары болғандықтан жаппай өндірісте қолдануға болмайды. №3 электролиттің кемшілігі электродтық пластиналарының қалыптасу сатысында тегіс жылтыр тұнбаға байланысты активті заттардың қабыршасы алынып қалады.

Нәтижелер мен талқылау

Қарапайым қышқыл электролиттерді дайындау үшін барлық компоненттерді жылы суда

бөлек ерітіп, гальваникалық ванналарды жартысына дейін сумен толтырады. Кейін оған алдымен күкірт қышқылын мұқият құйған соң, тұз ерітінділерін біртіндеп қосады. Ұсынылған электролитті пайдалану өнімнің бетіне нақты физикалық және химиялық қасиеттерді береді. Қысқа экспозиция уақытында тұнбаның және оның бос (кеуекті) құрылымының жақсы адгезиясын алу. Бұл никель-кадмий ламелсіз сілтілі аккумуляторларда кадмий электродтарын жасау технологиясында қолдану үшін дамыған беті бар гальваникалық ірі түйіршікті қаптамаларды алуға мүмкіндік береді [11, 12]. Айтылған электролиттермен жұмыс режимі 2 кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Кадмий электролиттерінің құрамы мен жұмыс режимі

Ерітінді құрамы, г/л	№1	№2	№3	№4
$\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	7,5
CdO	5	-	-	-
CdCl_2	-	-	6	-
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cd}$	-	5	-	-
H_2SO_4	-	-	-	7,5
H_3BO_3	8	8	-	-
NH_4Cl	-	-	34,5	-
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	10	10	-	-
этиленгликоль	-	-	4,5	-
тиомочевина	4	4	-	-
декстрин	1,5	-	-	-
Столяр желімі	-	2	-	-
желатин	-	-	1	-
t, °C	15 - 20	25 - 30	бөлме темп	15 - 20
i, A/дм ²	1			

Бұйым мен қандай да бір бөлшектердің беттік ауданын металмен қаптар алдында жұмыс режимін орнату барысында ток тығыздығын және қажетті ток күшін дұрыс таңдап алу үшін қапталатын бұйымның беттік ауданы есептелінді. Бөлшектердің ауданы алдымен бөлек есептеліп, кейін жиынтықталады. Бұйым немесе бөлшектерді қаптау техникалық шарттармен қарастырылған белгілі бір қалыңдықтағы металдың қорғау қабатын алу тапсырмасын орындайды. Сонымен қатар оған сол белгілі бір қалыңдықтағы тұнба алу үшін қажетті уақытты немесе электролиздің белгілі уақытында алынған тұнбаның қалыңдығын анықтау керек болады. Қапталатын бұйымның түгел бетін есептеу қажет. Геометриялық есептеу формулалары мен мәндері 3 кестеде келтірілген.

Кесте 3 – Бұйым бетінің геометриялық есептеу формулалары мен мәндері

№	формуласы			Мәндері
1	Тік төртбұрыш бетінің ауданы	$F = ab$	F - аудан, см ² a - таспаның ұзындығы, см; b - таспаның ені, см	8 см ²
2	Тік төртбұрыш беті	$S = 20P(a+b)/ab$	S - бұйымның беттік ауданы, см ² ; P - бұйымның салмағы, г; a - таспаның ұзындығы, мм; b - таспаның ені, мм	23,968 см ²

3	Қаптауға тиісті металдың салмағы	$G = 10Sa\gamma$	G - тұндырылған металдың салмағы, г; S - қапталуға тиісті бет, дм^2 ; a - тұндырылған металл қабығының қалыңдығы, мм; γ - тұндырылған металдың үлес салмағы, $\text{гр}/\text{см}^3$	6,183г
4	Катодта тұндырылған металдың салмағы	$P = CI\eta/100$	P - катодта тұнған металдың салмағы, г; I - жіберілген ток күші, А; t - электролиз уақыты, сағ; η - ток бойынша шығымы	0,64 г
5	Тұнған металл көлемі	$V = P/\gamma$	P - катодта тұнған металдың салмағы, г; γ - тұндырылған металдың үлес салмағы, $\text{гр}/\text{см}^3$	0,074 см^3
6	жабынның қалыңдығы	$h = V/S$	S - бұйымның беттік ауданы, см^2	31мк
7	Ток тығыздығы	$i = I/S$	i - ток тығыздығы, $\text{А}/\text{дм}^2$ I - жіберілген ток күші, А	0,36 А

Кадмий қаптамасына беттік-белсенді заттардың әсерін анықтау үшін электролиттердің электрөткізгіштігін арттыру үшін катодтық процеске қатыспайтын, бірақ электрөткізгіштігі жақсы қосымшалар қосады. Қышқыл электролиттерге қышқылдың аттас иондарының тұздары, ал сілтілі электролиттерге NaOH, KOH қосуға болады. Әлсіз қышқылды, нейтралды және әлсіз негізді электролиттерге сілтілік немесе сілтілік жер металдардың тұздарын қосады. Сонда электрөткізгіш қосымшалар электролиттің қышқылдығын өзгертпей тұру керек. Көптеген электролиттер белгілі рН интервалында жұмыс істегендіктен, бақылап отыру үшін буферлі қосымшалар енгізеді. Көбінесе бор қышқылы, натрий ацетаты, сірке қышқылы және т. б. қолданады [13, 14]. Кадмийлеу процесі кезінде электролитке беттік-белсенді заттарды қосу арқылы сапасы жоғары, тегіс бұйым алуға болады. Өндірістік жағдайда синтанол ДС-10, желатин, желім, ДЦУ бекіткіші, крахмал, ОП-10, диспергатор НФ-5, тиокарбамид сияқты беттік-белсенді заттар электролит ерітінділеріне қосылады. Бұл тәжірибе барысында желатин, декстрин және столяр желімі қолданылды.

Барлық электролиттерде кадмий екі валентті түрде болады. Ал оның электрохимиялық эквиваленті 2,2 г/А сағатқа тең. Кадмийдің шөгу жылдамдығы пайдаланылатын катодтың ток тығыздығына және токтың шығымына байланысты әр түрлі болады [15]. Бұдан әрі ток тығыздығы өзгерген кездегі кадмий тұнбалары құрылымының өзгеруі қадағаланады.

3 тамшы декстрин ерітіндісі қосылған электролит ерітіндісінде ток тығыздығының өзгеруі:

1А/дм²: таспа бетінде сұр түсті қабықша түзілді. Метал негізіне жақсы тұтасқан ірі түйіршікті қабықша түзілді.

1,5А/дм²: таспа бетінде ақшыл-сұр түсті қабықша түзілді. Таспаның беті біркелкі дерлік қапталған.

2А/дм²: таспа бетінде сұр түсті қабықша түзілді. Түзілген қабықша таспаның бетіне нашар біріккен және пластина беті қабыршақтанған. Қолданылатын токтың катодты тығыздығына және әр түрлі ток шығымы кезіндегі тәуелділігіне байланысты кадмийдің тұну жылдамдығы 4 кестеде көрсетілген.

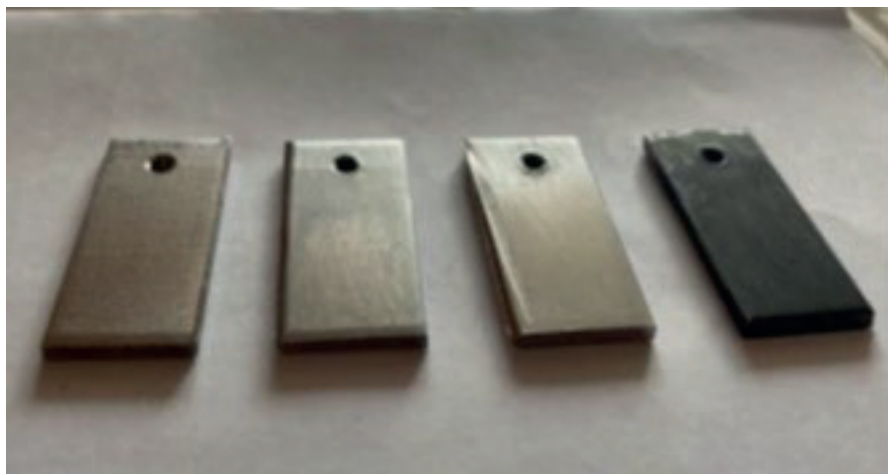
Кесте 4 – Токтың шығымына байланысты кадмийдің шөгу жылдамдығы (мкм/сағ)

Токтың тығыздығы, Дк, А/дм ²	Токтың шығымы, %					
	75	80	85	90	95	100
0,5	9,1	9,7	10,3	10,9	11,5	12,1
1,0	18,2	19,4	20,6	21,8	23,1	24,2
2,0	36,4	38,8	41,2	43,6	46,2	48,4
3,0	54,6	58,3	61,8	65,4	69,3	72,6

4,0	72,8	77,6	82,5	87,2	92,4	98,8
5,0	91,0	97,0	103	109	115	121
6,0	109,2	116,6	124,0	130,8	138,6	145,2
7,0	127,4	136,0	144,6	152,6	161,7	169,4
8,0	145,6	155,2	165,0	174,4	184,8	197,6
10,0	182,0	194,0	206,0	218,0	231,0	242,0

Электролиттің құрамына, температурасына, араластыру қарқындылығына байланысты ток тығыздығын 0,5–5 А/дм² интервал аралығында қолдануға болады. Орташа шамамен кадмий концентрациясы 20 г/л болған кезде ток тығыздығы – 1,5–2 А/дм², кадмий концентрациясы 40 г/л болған кезде ток тығыздығы – 3–4 А/дм² болады. Әдеттегі жай режимде электролиттің тұрақты құрамын қамтамасыз ететін анодты ток тығыздығы 2 А/дм² – тан аспауы тиіс. Жиі температураны 20–35 °С аралығында ұстайды, бірақ қажет болған жағдайда оны арттыруға болады. Ток бойынша шығымы 85-98% аралығында өзгеріп тұрады, ол жиі 90- 95%-ға сәйкес келеді. Электролиттегі кадмийдің концентрациясы, температурасын, араластыру қарқындылығын арттырған жағдайда ток бойынша шығымы артады. Температураның жоғарылауымен концентрлі электролитті қолданады. Себебі бастапқы компоненттердің ерігіштігі жоғарылайды. Сонымен қатар, электролиттің электр өткізгіштігі өседі және анодтың пассивациясы төмендейді. Осы факторлардың барлығы жоғары ток тығыздығын қолдануды қажет етеді. Бірақ, температураның жоғарылауынан диссоциация және диффузия процестері өсіп, тұнбаның катодтық потенциалының төмендеуіне әкеледі. Ток тығыздығының жоғарылауымен бірге температураның әсері майда кристалды қаптамалардың түзілуіне әкеледі. Сондықтан көптеген электролиттерде температураның жоғарылауы тұну процесін қарқынды жүргізуге мүмкіндік береді. Тығыз ауада цианидті және сілтілі электролиттерді араластыруға болмайды. Себебі ерітінді компоненттерімен көмірқышқылының әрекеттесуінен карбонаттар түзіледі. Кадмийдің тұну процесін одан әрі жақсарту үшін араластырып жатқанда бір уақыт аралығында температура мен ток тығыздығының әсерін ұлғайту керек. Бұл тәжірибеде жоғарыда көрсетілген 3 тамшы декстрин ерітіндісі қосылған электролит ерітіндісінде температура өзгерген кездегі тұнба құрылымының өзгерісі қадағаланады. 30 °С температурада таспа бетінде металдық жылтыры бар сұр түсті қабықша түзілді. Бұл қабықша металл негізімен жақсы бірікпеген және таспаның тек бір бөлігін ғана қаптап тұр. 45 °С температура таспа бетінде металдық жылтыры бар сұр түсті түзілді. Қабықша біркелкі қапталмаған. Металл негізімен жақсы біріккен. Тығыз, ұсақ кристалды тұнбаны жоғары температурамен ток тығыздығында және үздіксіз араластыру арқылы алуға болады. Араластыруды үздіксіз немесе периодты фильтрациямен қоса жүргізеді. Себебі ерімеген бөлшектер конвекционды ағынмен катодта тұнып, сапасыз қаптаманың түзілуіне әкеліп соғады.

Қаптаманың сапасын бақылау үшін ең бірінші баға беру сыртқы түріне қарай отырып, күндізгі немесе жасанды жарықтың көмегімен жүргізіледі. Жарықтандыру 300 лк төмен болмауы қажет. Сыртқы түрін бағалау нәтижелері бойынша жарамды, ақаулы, жарамсыз топтардың біреуіне жатқызуға болады. Егерде сапасыз қаптаманы алып тастап, қайталама отырғызуды қажет болса және де қаптаманы алмай-ақ толық өңдеуді қажет ететін бөлшектерде жоғарыда айтылғандар қатарына енсе бөлшек кеміс болып саналады. Кеміс бөлшектерге коррозия ошақтары, механикалық және басқа да ақаулар жатады. 1 суретте таспалардың сыртқы түрі бағаланады.



Сурет 1 – Кадмиймен қапталған таспалар

Металдың тотығуға тұрақтылығы оның тасымалдануына байланысты қоршаған ортаның әсерінен туындайтын химиялық немесе электрохимиялық бұзылуларға төтеп беру қабілетіне байланысты болады. Бөлшектердің тотығуға тұрақтылығы жөніндегі неғұрлым дұрысырақ пікірді табиғи эксплуатациялық жағдайда сынау арқылы алады. Бірақ мұндай сынаманы жүргізу ұзақ болғандықтан оны өндірістік жағдайда қолдануға келмейді. Себебі өндірістік жағдайда жылдам орындалатын сынақ түрлері қолданылады. Сынауы жылдамдату үшін еріткішті араластыру, сонымен қатар үлгіні ерітіндіге бір алып, бір салып тұру қажет. Үлгіні ерітіндіге қайталама алып-салу принципі кейбір қондырғыларда автоматты түрде орындалады. Электролиттердегі металдардың тотығуға төзімділігін анықтаудың ең қарапайым және қол жетімді әдісі – тотығу көрсеткіштерінің көпшілігін пайдалануға мүмкіндік беретін ашық ыдыста сынау. Үлгілер шыны ілмекке немесе нейлон жіпке ілінеді және ауа, оттегі, азот немесе басқа газ өтетін стационарлық немесе араластырылған тотыққан ерітіндіге толық, ішінара немесе ауыспалы батыру арқылы сыналады. Сынау кезінде сыналатын әрбір металдың үлгілері бөлек ыдысқа салынады. Үлгіні кейде шыны немесе пластик тұғырды пайдаланып орнатылады.

Алынған гальваникалық қаптаманың қалыңдығын тамшы әдісімен анықтайды. Ол үшін металмен қапталған бұйымға ерітінділерді біртіндеп тамшылатып, белгілі бір уақыт аралығында оны ұстау арқылы ерітеді. Операция тамшы тамған аймақтарды сүзгіш қағазымен негізгі металдың тұтас аумағы көрінгенге дейін сүрту арқылы жүргізіледі. Тамшы әдісінің кетіру әдісінен айырмашылығы тамшы әдісі арқылы бөлшектің белгілі бір аймағындағы қаптаманың қалыңдығын анықтауға болады. Бұл әдістің кемшілігі қалың қабатты қаптамалар үшін мұндай сынақ ұзақ уақыт аралығында жүргізіледі. Тамшы әдісі күрделі пішінді және ұсақ бөлшектердің бетіндегі қаптама қалыңдығын өлшеуге жарамсыз. Себебі ерітінді тамшы таматын уақыт аралығында ұсталып тұрмай, ағып кетеді. Бұл әдіс техникалық орындалуы жағынан қарапайым болғанымен, тек жұқа қаптаманың қалыңдығын анықтағанда қателіктер береді. Қабат қалыңдығы 2 мм қаптама үшін бұл әдістің нақтылығы $\pm 30\%$ аумағында ауытқымалы түрде болады.

Кадмий қабатымен қапталған таспаға 30 с сайын калий иодиді ерітіндісі тамызылды. Тамшылату әдісінің нәтижесі бойынша қаптаманың қалыңдығы 31 мкм болды.

МемСТ 9.303-84 сәйкес тәжірибе барысында кадмиймен қапталған бұйым қорғаныштық мақсатта қолданылуға рұқсат етіледі

Қорытынды

2X18H10T маркалы тотықпайтын болаттан жасалған таспаны кадмийлеудің технологиясына зерттеу жүргізілді. Кадмийлеу процесіне және кадмий қаптамасымен қапталған металл бұйымдарына сипаттама толықтай беріліп, оның технологиялық ерекшеліктері аталып көрсетілді. Кадмий электролиттерінің түрлері мен құрамына салыстырмалы талдау жүргізілді. Алынатын қаптаманың сапасына әсер ететін факторлар зерттеліп, бұйымдардың электролизден кейінгі байқалатын негізгі көрсеткіштеріне есептеу жүргізілді (бетінің ауданы, металдың салмағы, ток

тығыздығы, тұнған металл көлемі, жабынның қалыңдығы, катодта тұндырылған металдың салмағы, ток тығыздығы). Қаптаманың сапасы электролиттің құрамына, оның температурасына және ток тығыздығына байланысты өзгеріске ұшырайтыны анықталды. Беттік-белсенді зат (декстрин, желатин, столяр желімі) пайдалану барысында потенциал арту мүмкіндігіне ие болып, берік қаптама қабатын алуға септігін тигізді. Беттік-белсенді зат қолданылмаған жағдайда кадмиймен қапталған таспаның жылтырлығының болмайтыны көрінді. Ток шамадан тыс берілген кезде таспа майда түйіршіктермен қапталып, қарайып кететіндігі анықталды. Таспаны кадмийлеу барысында уақыттың мәні артқан сайын таспа бетіне шөгілген кадмий қабаты арта түсті.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 <https://www.corrosionpedia.com/>
- 2 Paul Scott. What is involved in cadmium plating // About mechanics. September 03, 2022. <https://www.aboutmechanics.com/>
- 3 Cadmium electroplating. <http://www.chemprocessing.com/page.asp?pageid=54&>.
- 4 M. Nathaniel Mead. Cadmium confusion: Do consumers need protection // Environ health perspect. – 2010 Dec. – 118(12). – pp. 528 – 534.
- 5 Camel Leroy. Method and composition for cadmium plating. Patented Jan. 10, 1939. 2,143,760.
- 6 Frank Altmayer. Is cadmium finished // Plating & Surface Finishing. Advice & counsel. – March 2007. – P. 22–26.
- 7 Cadmium plating by hugh morrow. – Volume 93. – Issue 1, Supplement 1, January, 1995. – P. 201–204. <https://www.sciencedirect.com/journal/metal-finishing>.
- 8 Чигринова Н.М., Чигринов В.Е., Радченко А.А. и др. Технологии создания декоративно-износостойких материалов / Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий : Материалы докладов республиканского научно-технического семинара. – Минск: БГТУ, 2011. – С. 130–138.
- 9 Хранилов Ю.П. Экология и гальванотехника: проблемы и решения. – Киров: ВятГУ, 2010. – 97 с.
- 10 Joseph Menke. The many sides of cadmium plating // Corrosion. – 2003, San Diego, California. – March 16-20. 2003.
- 11 Waldfried Plieth. Electrochemistry for Materials Science. – 2008. – P. 195–229. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527929500099>
- 12 Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. – М.: Физматлит, 2010. – 416 с.
- 13 Кудреева Л.К. Гальваникалық қаптамалар алу технологиясы. – Алматы: Қазақ университеті, 2013. – 187 б.
- 14 Высоцкая Н.А., Кабылбекова Б.Н., Айкозова Л.Д., Бекжигитова К.А. Качество кадмиевых покрытий, полученных из электролитов с серо- и фосфорсодержащими поверхностно-активными веществами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 1. – С. 58–62.
- 15 Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2013. – 240 с.

REFERENCES

- 1 <https://www.corrosionpedia.com/>
- 2 Paul Scott. What is involved in cadmium plating // About mechanics. September 03, 2022. <https://www.aboutmechanics.com/>
- 3 Cadmium electroplating. <http://www.chemprocessing.com/page.asp?pageid=54&>.
- 4 M. Nathaniel Mead (2010). Cadmium confusion: Do sonsumers need protection // Environ health perspect, 118(12), pp. 528–534.
- 5 Camel Leroy. Method and composition for cadmium plating. Patented Jan. 10, 1939. 2,143,760.
- 6 Frank Altmayer (2007). Is sadmium finished // Plating & Surface Finishing. Advice & counsel, March, pp. 22–26.
- 7 Cadmium plating by hugh morrow (1995), vol. 93, Issue 1, Supplement 1, January, pp. 201–204. <https://www.sciencedirect.com/journal/metal-finishing>
- 8 Chigrinova N.M., Chigrinov V.E., Radchenko A.A. i dr. (2011) Tehnologii sozdaniya dekorativno-iznosostojkih materialov. Sozdanie novyh i sovershenstvovanie dejstvujushhih tehnologij i oborudovaniya nanesenija gal'vanicheskikh i ih zameshhajushhih pokrytij: Materialy dokladov respublikanskogo nauchno-tehnicheskogo seminara. Minsk, BGUTU, pp. 130–138.
- 9 Hranilov Ju.P. (2010) Jekologija i gal'vanotehnika: problemy i reshenija. Kirov, VjatGU, 97 p.
- 10 Joseph Menke (2003). The many sides of cadmium plating. Corrosion 2003, San Diego, California, March, 16–20.

11 Waldfried Plieth (2008). Electrochemistry for Materials Science, pp. 195–229. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527929500099>

12 Semenova I.V., Florianovich G.M., Horoshilov A.V. (2010) Korrozija i zashhita ot korrozii. Moscow, Fizmatlit, 416 p.

13 Kudreeva L.K. (2013) Gälvanikalyq qaptamalar alu tehnologiasy. Almaty, Qazaq universiteti, 187 p.

14 Vysockaja N.A., Kabyzbekova B.N., Ajkozova L.D., Bekzhigitova K.A. (2020) Kachestvo kadmievuyh pokrytij, poluchennyh iz jelektrolitov s sero- i fosforsoderzhashhimi poverhnostno-aktivnymi veshhestvami. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy, no 1, pp. 58–62.

15 Shluger M.A. (2013) Gal'vanicheskie pokrytija v mashinostroenii. Moscow, Mashinostroenie, 240 p.

Авторлар туралы мәліметтер

Сдикова Гулия Жумгалиевна (корреспонденция авторы)

Химия ғылымдарының кандидаты, М.Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университетінің химия кафедрасының доценті. Назарбаев даңғылы 121, 090500, Орал қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-7949-1521

E-mail: sdikova.guliya@mail.ru

Шамилова Алмагуль Жоламановна

магистр, М.Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университетінің химия кафедрасының оқытушысы. Назарбаев даңғылы 121, 090500, Орал қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-9286-3131

E-mail: shamilova9494@mail.ru

Information about authors

Sdikova Guliya Zhumgatievna (corresponding author)

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry, West Kazakhstan University named after M. Utemisov. Nazarbayev str.121, 090500, Uralsk, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-7949-1521

E-mail: sdikova.guliya@mail.ru

Shamilova Almagul Zholamanovna

Master of Chemical Sciences, Department of Chemistry, West Kazakhstan University named after M. Utemisov. Nazarbayev str.121, 090500, Uralsk, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-9286-3131

E-mail: shamilova9494@mail.ru

Информация об авторах

Сдикова Гулия Жумгалиевна (автор для корреспонденции)

Кандидат химических наук, доцент кафедры химии Западно-Казахстанского университета им.М.Утемисова, проспект Назарбаева, 121, 090500, г. Уральск, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-7949-1521

E-mail: sdikova.guliya@mail.ru

Шамилова Алмагуль Жоламановна

Магистр, преподаватель кафедры химии Западно-Казахстанского университета им.М.Утемисова, проспект Назарбаева, 121, 090500, г. Уральск, Казахстан.

ORCID ID: 0000-0002-9286-3131

E-mail: shamilova9494@mail.ru

UDC 510.67

IRSTI 27.03.66

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-4-27-33>

Dauletiyarova A.B.¹

¹Suleyman Demirel University, 040900, Kaskelen, Kazakhstan

Email: d_aigera95@mail.ru

ON DISTRIBUTIONS OF COUNTABLE MODELS FOR CONSTANT EXPANSIONS OF THE DENSE MEET-TREE THEORY. I

Abstract. We study all possible constant expansions of the structure of the dense meet-tree $\langle M; <, \Pi \rangle$ [3]. Here, a dense meet-tree is a lower semilattice without the least and greatest elements. An example of this structure with the constant expansion is a theory that has exactly three pairwise non-isomorphic countable models [6], which is a good example in the context of Ehrenfeucht theories. We study all possible constant expansions of the structure of the dense meet-tree by using a general theory of classification of countable models of complete theories [7], as well as the description of the specificity for the theory of a dense-meet tree, namely, some distributions of countable models of these theories in terms of Rudin–Keisler preorders and distribution functions of numbers of limit models. In this paper, we give a new proof of the theorem that the dense meet-tree theory is countable categorical and complete, which was originally proved by Peretyat’kin. Also, this theory admits quantifier elimination since complete types are forced by a set of quantifier-free formulas, and this leads to the fact that it is decidable.

Key words: meet-tree, countable model, expansion, Ehrenfeucht theories.

Дәулетиярова А.Б.¹

¹Сулеймана Демирель атындағы Университет, 040900, Қаскелен, Қазақстан

Email: d_aigera95@mail.ru

ТЫҒЫЗ АҒАШ ТЕОРИЯСЫН ТҰРАҚТЫ БАЙЫТУ ҮШІН ЕСЕПТЕЛЕТІН МОДЕЛЬДЕРДІ БӨЛУ ТУРАЛЫ. I

Андатпа. $\langle M; <, \Pi \rangle$ Табиғатта тығыз ағаш та, бос ағаш та кездеседі. Тығыз ағашты өндірісте көбірек пайдаланады. Сондықтан да біз тығыз су ағашы құрылымын байытудың [3] барлық түрлерін зерттейміз. Мұнда тығыз ағаш деп ең үлкен және ең кішкентай элементтері жоқ төменгі жарты торды айтамыз. Осы тұрақты кеңейтілген құрылымның мысалы ретінде үш жұптық изоморфты емес саналымды моделі бар теорияны алуға болады [6] және ол Эренфойхт теорияларының мысалы ретінде қарастырылады. Тығыз ағаштың құрылымын барлық мүмкін болатын тұрақты кеңеюін зерттеу үшін біз толық теориялардың саналымды модельдерін жіктеудің жалпы теориясын [7], сонымен қатар, олардың ерекшеліктерін, атап айтқанда, Рудин-Кейслер реттері және шекті модельдер сандарының үлестіру функциялары тұрғысынан осы теориялардың саналымды модельдерінің кейбір үлестірімдерін зерттейміз. Бұл мақалада алғашында Перетяткин дәлелдеген тығыз ағаш теориясы саналымды дәрежелік және толық екендігі туралы теореманың жаңа дәлелін береміз. Сондай-ақ, бұл теория кванторларды жоюға мүмкіндік береді. Өйткені типтер жиынтығы кванторлық емес формулалар арқылы жүктеледі және сол себепті, шешілімді теория болуына әкеледі.

Тірек сөздер: кездесетін ағаш, саналымды модель, байыту, Эренфойхт теориялары.

Даулетиярова А. Б.¹

¹ Университет имени Сулеймана Демиреля, 040900, г. Каскелен, Казахстан
Email: d_aigera95@mail.ru

О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОНСТАНТНЫХ ОБОГАЩЕНИЙ ТЕОРИИ ПЛОТНОГО ДЕРЕВА ВСТРЕЧ. I

Аннотация. Мы изучаем всевозможные константные обогащения структуры плотного дерева встреч $\langle M; <, \Pi \rangle$ [3]. Здесь под плотным деревом встреч мы понимаем нижнюю полурешетку без наибольшего и наименьшего элемента. В качестве примера этой структуры с константным обогащением можно взять теорию, которая имеет в точности три попарно неизоморфные счетные модели [6], который является хорошим примером в контексте эренфойхтовых теорий. Мы изучаем всевозможные константные обогащения структуры плотного дерева встреч, используя общую теорию классификации счетных моделей полных теорий [7], а также описание специфики теории плотного дерева, а именно некоторые распределения счетных моделей этих теорий в терминах предпорядков Рудина–Кейслера и функций распределения чисел предельных моделей. В этой статье мы даем новое доказательство теоремы, что эта теория плотного дерева встреч является счетно-категоричной и полной, которое было изначально доказано Перетяткиным. Также эта теория допускает элиминацию кванторов, поскольку множество типов навязывается бескванторными формулами, и это приводит к тому, что она еще и является разрешимой.

Ключевые слова: дерево встреч, счетная модель, обогащение, теории Эренфойхта.

Introduction

It is well known that M. G. Peretyat'kin [6] has constructed the complete decidable theory T^0 having exactly 3 nonisomorphic countable models by expanding a dense meet-tree structure [3] with constants $c_n^{(0)}$, $n \in \omega$, such that $c_n^{(0)} < c_{n+1}^{(0)}$, $n \in \omega$. Consequently, the theory was used as a base to produce examples in the context of Ehrenfeucht theories. Also, in [2] it was shown that a theory T by expanding T_{dnt} with countably many distinct constants is either Ehrenfeucht or $I(T, \omega) = 2^\omega$.

In our work, we study all possibilities of constant expansions of a dense meet-tree structure $\langle M; <, \Pi \rangle$ by using a general theory of classification of countable models of complete theories [7]. Moreover, we describe some distributions of countable models of these theories in terms of Rudin–Keisler preorders and distribution functions of numbers of limit models. For instance, in the monograph [7] it is shown that the numbers of countable models for constant expansions of T_{dnt} with one sequence $(c_n^{(1)})_{n \in \omega}$ of constants, with two sequences $(c_n^{(0)})_{n \in \omega}$, $(c_n^{(1)})_{n \in \omega}$, of constants, and three sequences $(c_n^{(0)})_{n \in \omega}$, $(c_n^{(1)})_{n \in \omega}$, $(c_n^{(2)})_{n \in \omega}$ of constants are 3, 6 and 34, respectively.

Main Provisions

The number of pairwise non-isomorphic models of cardinality λ of a theory T is denoted by $I(T, \lambda)$.

Definition [4]. A theory T is called *Ehrenfeucht* if $1 < I(T, \omega) < \omega$.

Definition [1]. A type $p(\bar{x}) \in S(T)$ is said to be *powerful* in a theory T if every model \mathcal{M} of T realizing p also realizes every type $q \in S(T)$, i.e., $\mathcal{M} \models S(T)$.

The powerful types, that always are represented in Ehrenfeucht theories [1], play an important role for the finding the number of countable models. If a complete theory does not have a powerful type, then it has infinitely many countable models. Indeed, we take a type p_0 , since it is not powerful, there is a type p_1 and a model \mathcal{M}_0 that realizes the type p_0 and omits the type p_1 , since the types p_0, p_1 are not powerful, again there is a type p_2 and a model \mathcal{M}_1 that realizes the types p_0, p_1 and omits the type p_2 and etc. Thus, any Ehrenfeucht theory has a powerful type.

Interrelations of types in theories are defined, in many aspects, by the Rudin–Keisler preorders. The next definitions and notations are taken from [7]. Let \mathcal{M}_p denote the class of isomorphic models that are prime over a realization of the type p .

Definition. Let p and q be types in $S(T)$. We say that the type p is *dominated* by a type q , or p *does not exceed* q under the Rudin–Keisler preorder (written $p \leq_{\text{RK}} q$), if $\mathcal{M}_q \models p$, that is, \mathcal{M}_p is

an elementary submodel of \mathcal{M}_q (written $\mathcal{M}_p \leq \mathcal{M}_q$). Besides, we say that a model \mathcal{M}_p is *dominated by a model \mathcal{M}_q* , or \mathcal{M}_p *does not exceed \mathcal{M}_q under the Rudin-Keisler preorder*, and write $\mathcal{M}_p \leq_{RK} \mathcal{M}_q$.

Definition. Types p and q are said to be *domination-equivalent*, *realization-equivalent*, *Rudin-Keisler equivalent*, or *RK-equivalent* (written $p \sim_{RK} q$) if $p \leq_{RK} q$ and $q \leq_{RK} p$. Models \mathcal{M}_p and \mathcal{M}_q are said to be *domination-equivalent*, *Rudin-Keisler equivalent*, or *RK-equivalent* (written $\mathcal{M}_p \leq \mathcal{M}_q$).

If \mathcal{M}_p and \mathcal{M}_q are not domination-equivalent then they are non-isomorphic. Moreover, nonisomorphic models may be found among domination-equivalent ones.

Definition. Denote by $RK(T)$ the set PM of isomorphism types of models \mathcal{M}_p , $p \in S(T)$, on which the relation of domination is induced by \leq_{RK} , a relation deciding domination among \mathcal{M}_p , that is, $RK(T) = \langle PM; \leq_{RK} \rangle$. We say that isomorphism types $M_1, M_2 \in PM$ are domination-equivalent (written $M_1 \sim M_2$) if so are their representatives.

A model \mathcal{M} of a theory T is called *limit* if \mathcal{M} is not prime over tuples and $\mathcal{M} = \bigcup_{n \in \omega} \mathcal{M}_n$ for some elementary chain $(\mathcal{M}_n)_{n \in \omega}$ of prime models of T over tuples. In this case the model \mathcal{M} is said to be *limit over a sequence \mathbf{q} of types* or *\mathbf{q} -limit*, where $\mathbf{q} = (q_n)_{n \in \omega}$, $\mathcal{M}_n = \mathcal{M}_{q_n}$, $n \in \omega$. If the sequence \mathbf{q} consists of a unique type q then the \mathbf{q} -limit model is called *limit over the type q* .

Definition [5]. A theory T is said to be Δ -based, where Δ is some set of formulae without parameters, if any formula of T is equivalent in T to a Boolean combination of formulae in Δ .

For Δ -based theories T , it is also said that T has *quantifier elimination* or *quantifier reduction* up to Δ .

Definition [5, 7]. Let Δ be a set of formulae of a theory T , and $p(\bar{x})$ a type of T lying in $S(T)$. The type $p(\bar{x})$ is said to be Δ -based if $p(\bar{x})$ is isolated by a set of formulas $\varphi^\delta \in p$, where $\varphi \in \Delta$, $\delta \in \{0, 1\}$.

The following lemma, being a corollary of Compactness Theorem, noticed in [5].

Lemma 1. A theory T is Δ -based if and only if for any tuple \bar{a} of any (some) weakly saturated model of T , the type $tp(\bar{a})$ is Δ -based.

The following fact is well-known using Lemma 1.

Fact. The theory T_{dmt} are based by the set of quantifier-free formulae and formulae describing non/existence of least/greatest elements and in/comparability of elements.

Materials and Methods

Let $\mathcal{M} = \langle M; <, \Pi \rangle$ be a lower semilattice without least and greatest elements such that:

- (a) for each pair of incomparable elements, their join does not exist;
- (b) for each pair of distinct comparable elements, there is an element between them;
- (c) for each element α there exist infinitely many pairwise incomparable elements greater than α , whose infimum is equal to α .

Structure $\mathcal{M} = \langle M; <, \Pi \rangle$ will be called *dense meet-tree*.

Definition. Let $\mathcal{A} = \langle A; <, \Pi \rangle$ and $\mathcal{B} = \langle B; <, \Pi \rangle$ be two \mathcal{L} -structure of a dense meet-tree. A function $f_n: A_n \rightarrow B_n$ with $A_n = \{a_1, \dots, a_n\}$ a finite subset of A and $B_n = \{b_1, \dots, b_n\}$ a finite subset of B is called a *partial isomorphism* if

$$\mathcal{A} \models \varphi(a_1, \dots, a_n) \Leftrightarrow \mathcal{B} \models \varphi(f(a_1), \dots, f(a_n)),$$

holds for every atomic \mathcal{L} -formula $\varphi(x_1, \dots, x_n)$.

Notation. We write $x \parallel y$ to mean that $x \not\leq y$ and $y \not\leq x$, where $x \leq y$ means $x \sqcap y = x$.

Results and Discussions

Lemma 2. Let $f_n: A_n \rightarrow B_n$ be a partial isomorphism between two models \mathcal{A} and \mathcal{B} of DMT, where $A_n \subseteq A$ and $B_n \subseteq B$ be subsets with cardinality n . Then, for any $a_{n+1} \in A \setminus A_n$ there is $b_{n+1} \in B$, such that $f_{n+1} := f_n \cup \{(a_{n+1}, b_{n+1})\}$ is also a partial isomorphism with $f_{n+1} \upharpoonright A_n = f_n$.

Proof. We choose an element $a_{n+1} \in A \setminus A_n$ with the minimal index and we put that $\varphi(a_{n+1}, \bar{a}_n) = \text{diag}(a_{n+1}, \bar{a}_n)$, where $\bar{a}_n = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ is some ordering of the set A . Suppose that $a_i < a_{n+1}$ for $i \in I$, $a_{n+1} < a_j$ for $j \in J$ and $a_{n+1} \parallel a_k$ for $k \in K$ such that

$$\exists x \left(\bigwedge_{i \in I} (a_i < x) \wedge \bigwedge_{i \in I} (x < a_j) \wedge \bigwedge_{k \in K} (x \parallel a_k) \right),$$

where $a_i, a_j, a_k \in \bar{a}_n = (a_1, a_2, \dots, a_n)$. Then since $a_j \not\leq a_k$ and $a_k \not\leq a_j$ we have the following

$$\left(\bigwedge_{i \in I, j \in J} (a_i < a_j) \wedge \bigwedge_{j \in J, k \in K} (a_j \parallel a_k) \right).$$

It can be seen that a_i are comparable with each other and they are less than a_j , consequently, there is a maximal element among them, say a_{i_0} . By construction, we have $b_{i_0} = \max_{i \in I} b_i$ and

$$\left(\bigwedge_{j \in J} (b_{i_0} < b_j) \wedge \bigwedge_{j \in J, k \in K} (b_j \parallel b_k) \right)$$

Now to find b_{n+1} we reduce our proof to the consideration of eight cases.

Case (i): $I = \emptyset, J \neq \emptyset, K \neq \emptyset$. We want to show that there exists such b_{n+1} and

$$\left(\bigwedge_{j \in J} (b_{n+1} < b_j) \wedge \bigwedge_{k \in K} (b_{n+1} \parallel b_k) \right)$$

when $a_{n+1} = \prod_{j \in J} a_j$.

By the fact that there is no minimal element there exists $b'_{n+1} < b_j$, for every $j \in J$ such that $c_k = b'_{n+1} \sqcap b_k, k \in J$. Since $c_k < b'_{n+1}$, this implies that c_k are comparable to each other and among them there is a maximal element, say c_{k_0} . Let $b_{n+1} \in (c_{k_0}, b'_{n+1})$. Then $b_{n+1} < b_j$ for every $j \in J$ and $b_{n+1} \not\leq b_k$ for every $k \in J$.

Now we prove that $b_{n+1} \not\geq b_k$. For this, we assume that $b_{n+1} \geq b_k$, then since $b_j > b_{n+1} \geq b_k$ we have $b_j \geq b_k$ which contradicts $b_j \parallel b_k$, and therefore $b_{n+1} \parallel b_k$.

Case (ii): $I \neq \emptyset, J = \emptyset, K \neq \emptyset$. By the fact that a_{i_0} is maximal element among a_i we have

$$\exists x \left(\bigwedge_{i \in I} (a_i < x) \wedge \bigwedge_{k \in K} (x \parallel a_k) \right) \equiv \exists x \left(\bigwedge_{i \in I} (a_{i_0} < x) \wedge \bigwedge_{k \in K} (x \parallel a_k) \right).$$

Since $b_{i_0} = \max_{i \in I} b_i$, it is clear that $b_{n+1} > b_{i_0}$, and $b_{n+1} \parallel b_k$ for every $k \in K$ follows from axiom (c), as there exist infinitely many incomparable elements $b_{k_1}, b_{k_2}, \dots, b_{k_s}, \dots$, which greater than b_{i_0} , that is, $b_{k_s} > b_{i_0}$. Then one of b_k will be incomparable with b_{n+1} .

Case (iii): $I \neq \emptyset, J \neq \emptyset, K = \emptyset$. In this case, we will just take $b_{n+1} = b'_{n+1}$.

Case (iv): $I = \emptyset, J = \emptyset, K \neq \emptyset$. In this case, $a_{n+1} \parallel a_k, k \in K$.

Let $a_{i_0} = a_{n+1} \sqcap a_{k_0}, k_0 \in K$. Then we have $a_{i_0} < a_{n+1}$ and $a_{n+1} \parallel a_k$, where $k \in K$. As in the *Case (ii)*, we find b_{n+1} .

Case (v): $I = \emptyset, J \neq \emptyset, K = \emptyset$. Similar to *Cases (ii) and (iii)*

Case (vi): $I \neq \emptyset, J = \emptyset, K = \emptyset$. Similar to *Cases (ii) and (iii)*.

Case (vii): $I \neq \emptyset, J \neq \emptyset, K \neq \emptyset$. Note that, a_{i_0} is maximal element among $a_i, i \in I$

$$\left((a_{i_0} < a_{n+1}) \wedge \bigwedge_{j \in J} (a_{n+1} < a_j) \wedge \bigwedge_{k \in K} (a_{n+1} \parallel a_k) \right).$$

Here we take $K = K_1 \cup K_2$ with the condition that their intersection is empty. Also, taking $k \in K_1$ is equivalent to taking $k \in K$ and $a_{i_0} < a_k$. Then we rewrite our expression as follows

$$\left((a_{i_0} < a_{n+1}) \wedge \bigwedge_{j \in J} (a_{n+1} < a_j) \wedge \bigwedge_{k \in K_1} (a_{i_0} < a_k) \wedge (a_{n+1} \parallel a_k) \right. \\ \left. \wedge \bigwedge_{k \in K_2} (a_{i_0} \parallel a_k) \wedge (a_{n+1} \parallel a_k) \right).$$

Let's denote $d^a = \prod_{j \in J} a_j$. It easy can be seen that $d^a \geq a_{n+1}$. Now, we consider each case separately to find b_{n+1} :

1. if $a_{n+1} = d^a$ then $b_{n+1} = \prod_{j \in J} b_j$.
2. if $a_{n+1} < d^a$ then

$$\left((a_{i_0} < a_{n+1} < d^a) \wedge \bigwedge_{k \in K_1} (a_{i_0} < a_k) \wedge (a_{n+1} \parallel a_k) \wedge \bigwedge_{k \in K_2} (a_{i_0} \parallel a_k) \wedge (a_{n+1} \parallel a_k) \right).$$

By the axiom (b) there is $b'_{n+1} \in (b_{i_0}, d^b)$, where $d^b = \prod_{j \in J} b_j$. Besides, we will take d_k^b as the meet $d^b \sqcap b_k$, $k \in K$. Since $d_k^b < d^b$, then they are comparable to each other and among them there is a maximal element, say $d_{k_0}^b$. By using the fact that $d^b \parallel b_k$ and $d_{k_0}^b < d^b$, we take $b_{n+1} \in (d_{k_0}^b, d^b)$, more precisely, $b_{n+1} \in (d_{k_0}^b, d^b) \cap (b_{i_0}, d^b)$. Hence, $b_i \leq b_{i_0} < b_{n+1} < b_j$ for every $i \in I, j \in J$.

It remains to prove that $b_{n+1} \parallel b_k$ for every $k \in K$. Assume the contrary, that $b_{n+1} \leq b_k$. Since $b_{n+1} \leq d^b$ we obtain $b_{n+1} \leq b_k \sqcap d^b = d_k^b \leq d_{k_0}^b < b_{n+1}$. This contradiction shows that $b_{n+1} \not\leq b_k$.

In the next case, we also assume the contrary, that $b_{n+1} > b_k$. Using $b_{n+1} > b_{i_0}$, together with the given fact that $b_{n+1} > b_k$ we will obtain that b_{i_0} and b_k are comparable, that is, $b_{i_0} \geq b_k$ or $b_{i_0} < b_k$. This would contradict our assumption, because if we take $b_{i_0} \geq b_k$ then $a_{k_0} \geq a_k$ and $a_{n+1} > a_{i_0} \geq a_k$, but $a_{n+1} \parallel a_k$; if $b_{i_0} < b_k$, this implies that $d^a > a_k$ and $d^a \geq a_{n+1}$, consequently, a_k and a_{n+1} are comparable.

Case (viii): $I = \emptyset, J = \emptyset, K = \emptyset$. Since it is impossible, we do not consider this case.

Thus, in each case we have found b_{n+1} in the set B , and this completes our proof.

Theorem 1. *The theory DMT of dense meet-trees is ω -categorical.*

Proof. Let $\mathcal{A} = \langle A; <, \sqcap \rangle$ and $\mathcal{B} = \langle B; <, \sqcap \rangle$ be two \mathcal{L} -structure of the dense meet-tree theory. Since they are dense, A and B must both be infinite. Fix some enumerations $(a_i)_{i < \omega}$ of A and $(b_j)_{j < \omega}$ of B . We will build an isomorphism $f: A \rightarrow B$ inductively, by extending increasing sequence of partial isomorphisms f_n from some subset of A to B such that a_{n+1} belongs to the domain of f_{2i} and b_{n+1} belongs to the codomain of f_{2i+1} .

We start f_0 being the empty function, namely f_0 is an isomorphism between the empty substructure

of A and the empty substructure of B . So suppose we inductively have constructed f_n and we are going to construct f_{n+1} . If $n+1$ is even, then we apply Lemma 2 on a_{n+1} and f_n to construct a partial isomorphism f_{n+1} which extends f_n and whose domain includes a_{n+1} (this is the *forth* in back and forth).

In the *back* part, the odd stages of the construction, are handled in the same way, with the roles of A and B reversed, that is, if $n+1$ is odd, then we consider f_n^{-1} , which is a partial isomorphism from some finite subset of B to some finite subset of A . So by Lemma 2 there is a partial isomorphism f_{n+1} whose domain includes both b_{n+1} and the image of f_n . Then we put $f_{n+1} = f_n^{-1}$, which is a partial isomorphism.

Therefore, $f = \bigcup_{i < \omega} f_i$ will be desired isomorphism between A and B .

Theorem 1. immediately implies:

Corollary. *The theory DMT of dense meet-trees is complete.*

By Lemma 1 theories of dense meet-tree, admit the quantifier elimination since complete types are forced by collections of quantifier free formulas. Moreover the theory of a dense meet-tree is finitely axiomatizable. Using Corollary we obtain the following its generalization:

Theorem 2. *The theory of dense meet-tree is decidable.*

Conclusion

We investigated dense meet-tree, which is a lower semilattice without the least and greatest elements. It is proven that theories of dense meet-tree are countably categorical by using back-and-forth argument, and hence they are decidable.

REFERENCES

- 1 Benda M., Remarks on countable models. Fund. Math. 1974. Vol. 81, No. 2. P. 107–119.
- 2 Dauletiyarova A.B., Sudoplatov S.V. Some expansions of theories with dense orders and given numbers of countable models. Algebra and Model Theory 13. Collection of papers, NSTU, Novosibirsk, 2021. P. 63–68.
- 3 Mennuni R. Weakly binary expansions of dense meet-trees. Mathematical Logic Quarterly. 2022. Vol. 68, no. 1. P.32–47. <https://doi.org/10.1002/malq.202000045>
- 4 Millar T. S., Decidable Ehrenfeucht theories. Proc. Sympos. Pure Math. 1985. Vol. 42. P. 311–321.
- 5 Palyutin E.~A., Saffe J., Starchenko S.~S. Models of superstable Horn theories. Algebra and Logic. 1985. Vol. 24, no. 3. P. 171–210.
- 6 Peretyat'kin M. G. On complete theories with a finite number of denumerable models. Algebra and Logic. 1973. Vol. 12, no. 5. P. 310–326.
- 7 Sudoplatov S.V. (2018) *Classification of Countable Models of Complete Theories*, NSTU, Novosibirsk.

Information about author

Dauletiyarova Aigerim Baissultanovna

Master, PhD student of Suleyman Demirel University, 040900, Kaskelen, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-0051-870X

Email: d_aigera95@mail.ru

Автор туралы мәлімет

Дәулетиярова Айгерім Байсұлтанқызы

Магистр, Сулеймана Демирель атындағы Университетінің PhD докторанты, 040900,

Қаскелен, Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-0051-870X

Email: d_aigera95@mail.ru

Информация об авторе

Даулетиярова Айгерим Байсултановна

Магистр, PhD докторант Университета имени Сулеймана Демиреля, 040900, г. Каскелен,
Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-0051-870X

Email: d_aigera95@mail.ru

UDC 517.972.7

IRSTI 27.35.45

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-4-34-41>**Sinita A.V.*¹, Antonio Capsoni²**¹Kazakh-British Technical University, 050050, Almaty, Kazakhstan²Polytechnic University of Milan, 20133, Milan, Italy

*E-mail: a.sinita@kbtu.kz

**ANALYTICAL APPROACH FOR INVERSE PROBLEMS THEORY APPLICATIONS
TOWARDS DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOIL****Abstract**

Current paper presents analytical expressions received for investigation of determination of thermophysical characteristics of soil applying the theory of inverse problems. There was considered experimental design with exact measurements and constructed mathematical model for considered case. The analytical expression for transient one-dimensional temperature field was received by Laplace transform. Additional data, such as the heat flux at inlet domain received by conducting numerical simulation of the heat source via computational model. Presented analytical expression for heat transfer parameter allows to determine the soil thermal property without loss of precision, which is crucial in agricultural field. Paper discusses posed peculiarities considered for the inverse problem methodology along with derivation stages of analytical expression. The analytical expression for proposed model is presented both in the frequency and real time domain by applied direct and inverse Laplace transform. The measured outlet input data is interpolated further by the 8-th order polynomial and presented with approximation residuals.

Key words: Inverse problems, transient heat transfer, analytical solution, experimental measurements, numerical simulation, soil.

Синица А.В.*¹, Антонио Капсони²¹Қазақстан-Британ Техникалық Университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан²Милан политехникалық университеті, Милан, Италия**ТОПЫРАҚТЫҢ ТЕРМОФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН АНЫҚТАУҒА КЕРІ
МӘСЕЛЕЛЕР ТЕОРИЯСЫ ҚОЛДАНЫЛУЫНЫҢ САРАПТАМАЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ****Аңдатпа**

Бұл жұмыста кері есептер теориясының көмегімен топырақтың термофизикалық сипаттамаларын анықтауды зерттеу үшін алынған сараптамалық өрнектер берілген. Нақты өлшемдері бар эксперименттік схема зерттеліп, қарастырылып отырған жағдайға математикалық модель құрастырылды. Лаплас түрлендіруінің көмегімен стационарлы емес бір өлшемді температура өрісі үшін аналитикалық өрнек алынды. Қосымша деректер, мысалы, кіріс жылу ағыны, есептеу моделін пайдаланып жылу көзін сандық модельдеу арқылы алынады. Жылу беру параметрі үшін ұсынылған аналитикалық өрнек топырақтың жылулық қасиеттерін дәлдікті жоғалтпай анықтауға мүмкіндік береді. Бұл ауыл шаруашылығы саласында өте маңызды. Мақалада кері есептің әдістемесі үшін ескерілетін жиынтық белгілер, сондай-ақ аналитикалық өрнекті шығару кезеңдері қарастырылады. Ұсынылған модель үшін аналитикалық өрнек Лапласың тікелей және кері түрлендірулерінің көмегімен жиілік облысында да, нақты уақыт аймағында да ұсынылған. Шығудағы өлшенген кіріс деректері 8-ші ретті көпмүшемен қосымша интерполяцияланады және жуықтау қалдықтарымен ұсынылады. Сонымен қатар, модельдеудің дәлдігін арттыру үшін жан-жақты құрылымдары бар модельді көрсетуге қаншалықты ынталы болсақ, аналитикалық шешімді шығару кезеңдерінде соғұрлым қиындықтар туындайды. Осы себепті біз нақты әлемде қарастырылатын мәселенің жалпы тенденцияларын көрсететін эквивалентті модельді ұсына аламыз. Ұсынылған мақаланың жалпы мақсаты – біртекті орта үшін қолданылатын коэффициенттерді анықтау процедурасы үшін аналитикалық кері талдау әдістемесінің жалпы идеясын ұсыну.

Тірек сөздер: Кері есептер, өтпелі жылу алмасу, аналитикалық шешім, тәжірибелік өлшемдер, сандық модельдеу, топырақ.

Синица А.В.^{*1}, Антонио Капсони²

¹Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан

² Политехнический университет Милана, Милан, Италия

*E-mail: a.sinita@kbtu.kz

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА

Аннотация

В данной работе представлены аналитические выражения, полученные для исследования определения теплофизических характеристик грунта с применением теории обратных задач. Была рассмотрена экспериментальная схема с точными измерениями и построена математическая модель для рассматриваемого случая. Аналитическое выражение для нестационарного одномерного температурного поля получено с помощью преобразования Лапласа. Дополнительные данные, такие как тепловой поток на входе, получают путем проведения численного моделирования источника тепла с помощью вычислительной модели. Представленное аналитическое выражение для параметра теплопередачи позволяет без потери точности определить тепловые свойства почвы, что крайне важно в сельскохозяйственной сфере. В статье обсуждаются поставленные особенности, учитываемые для методологии обратной задачи, а также этапы вывода аналитического выражения. Аналитическое выражение для предложенной модели представлено как в частотной области, так и в области реального времени с применением прямого и обратного преобразования Лапласа. Измеренные входные данные на выходе дополнительно интерполируются полиномом 8-го порядка и представляются с остатками аппроксимации. Общая цель предлагаемой статьи состоит в том, чтобы изобразить общее представление о методологии аналитического обратного анализа для процедуры определения коэффициентов, используемых для однородной среды.

Ключевые слова: обратные задачи, нестационарный теплообмен, аналитическое решение, экспериментальные измерения, численное моделирование, грунт.

Introduction

In today's world there are a lot of well-known empirical methods for determination of thermal-physical characteristics of structural and non-structural materials in the laboratory conditions with prescribed accuracy [1–5]. However, it is still a matter of difficulty to identify key properties of material without terminating the exploitation process during experiments conducted on the field or receiving such data analytically without loss of accuracy and precision [6]. It is well-known fact that analytical expressions are more favorable in terms of reduction of computational cost expressed in time and memory, to receive exact value without losses due to introduced errors by numerical approximation [7]. Determination of thermal characteristics of soil plays key role in agricultural area and construction sector [8–9]. Investigating soil fertility or appropriate freezing depth of soil are the key issues in agricultural sector which are impossible without reliable data of thermal characteristics for considered soil category [10–12]. Another application of the usage of inverse problems is to determine the type of the soil by observing calculated values of key thermal parameters using statistical comparative analysis [13–16]. The essence of the inverse analysis methodology lies in the prescribed ill-posedness of the problem due to violation of one of the following factors: lack of solution, infinitely many solutions or the solution discontinuous dependency on the input data. These factors comprehend numerical exploitation of the posed inverse problem. In such case analytical investigation is more preferable, since we illuminate these factors, however such implementations require to overcome number difficulties due to derivation stages. For instance, there should exist the solution of the posed direct problem, its continuous transform in the frequency domain, and same solution of the inverse problem derived for the considered process. Moreover, the more we are keen to imply model with comprehensive structures in order to increase the accuracy of simulation, the more difficulties will arise during the derivation stages of the analytical solution. For that reason, we may pose an equivalent model that will reflect general tendencies of real-world considered problem.

The general goal of proposed paper is to depict general idea of the analytical inverse analysis methodology for coefficients determination procedure utilized for homogeneous medium terrain.

Main provisions

In current experiment we considered a box with specific soil type equipped with the measurement devices located at specific points of domain as illustrated below.

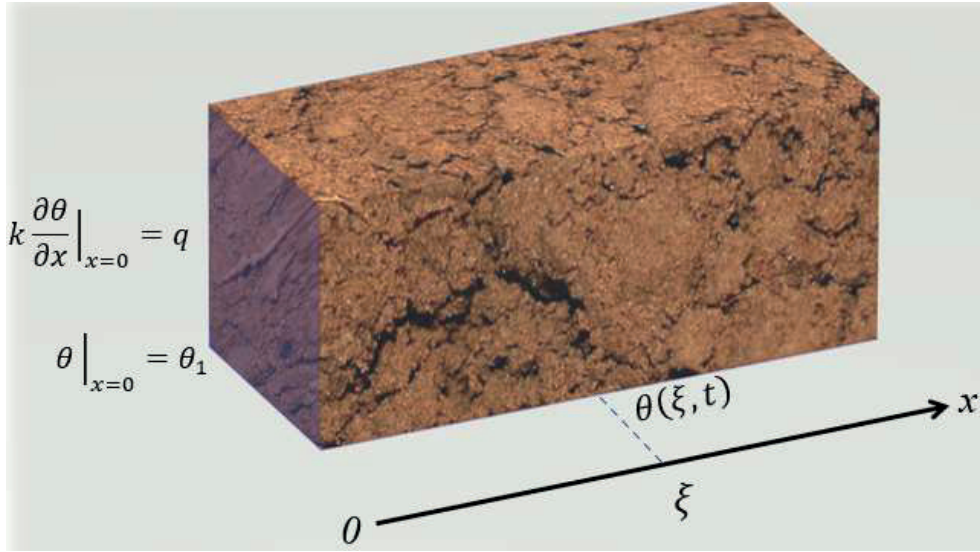


Figure 1 – Soil experimental design

The direct problem consists of determining the temperature field in domain $\Omega = x \in [0, \infty) \cup t \in [0, T]$. We set absence of bounds on the right side for spatial part of domain since for single-layered structure we do not have any reflections of the heat-wave flux from the right side, considering it as isolated side, thus for set experimental design the model describing transient heat flow is constructed as:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}. \quad (1)$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0(x). \quad (2)$$

$$\theta(0, t) = \theta_1(t). \quad (3)$$

$$\theta(\infty, t) = 0. \quad (4)$$

Here the initial condition (2) is received by interpolating measured data through time domain and the same is done for boundary condition (3), heat conductivity coefficient is expressed as $a = \sqrt{k/\rho c}$, where ρ and c are density and specific heat capacities of the soil, whereas k is the heat transfer coefficient.

The inverse problem is formulated as follows: to determine the heat conductivity coefficient by measuring additional data on the inlet of the domain. For that reason, we measure heat flux from radiation of the bulb lamp at point $x = 0$.

Materials and Methods

The measured radiation received from numerical simulation of the heating processes inside the bulb lamp [17]. The geometrical domain is considered as axis-symmetrical region, which is discretized by structural grid presented below:

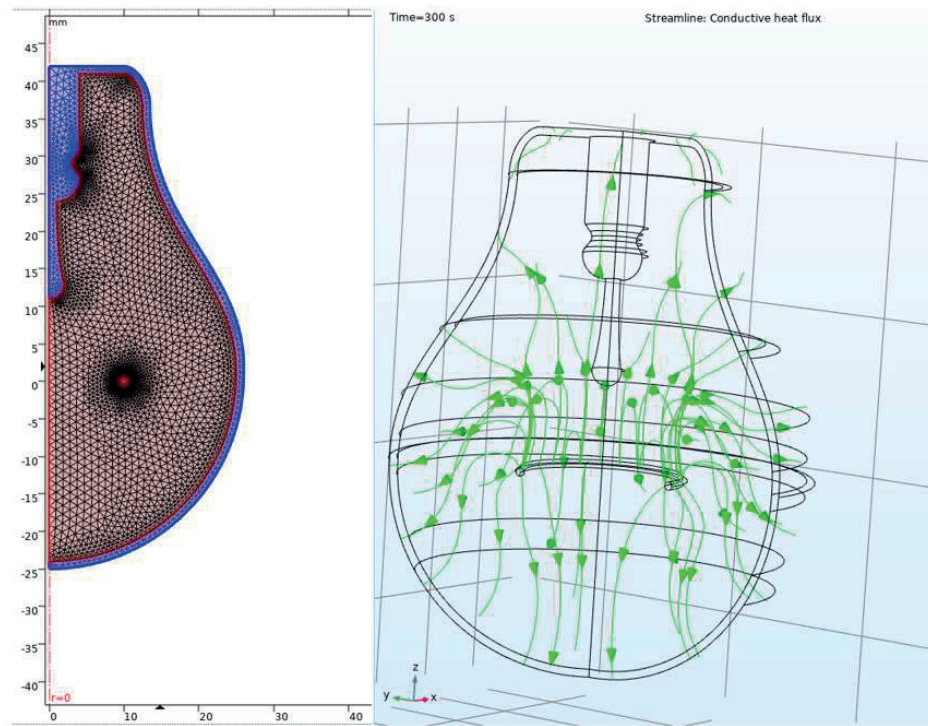


Figure 2 – Axis-symmetrical region and heat flux inside bulb lamp

Simulated processes include conduction through the tungsten spiral, which is further transferred by convection through argon to the lamp glass and then as the heat flux by radiation from glass to soil inlet.

The following profiles gives numerical values of received heat flux due to radiation from the bulb lamp:

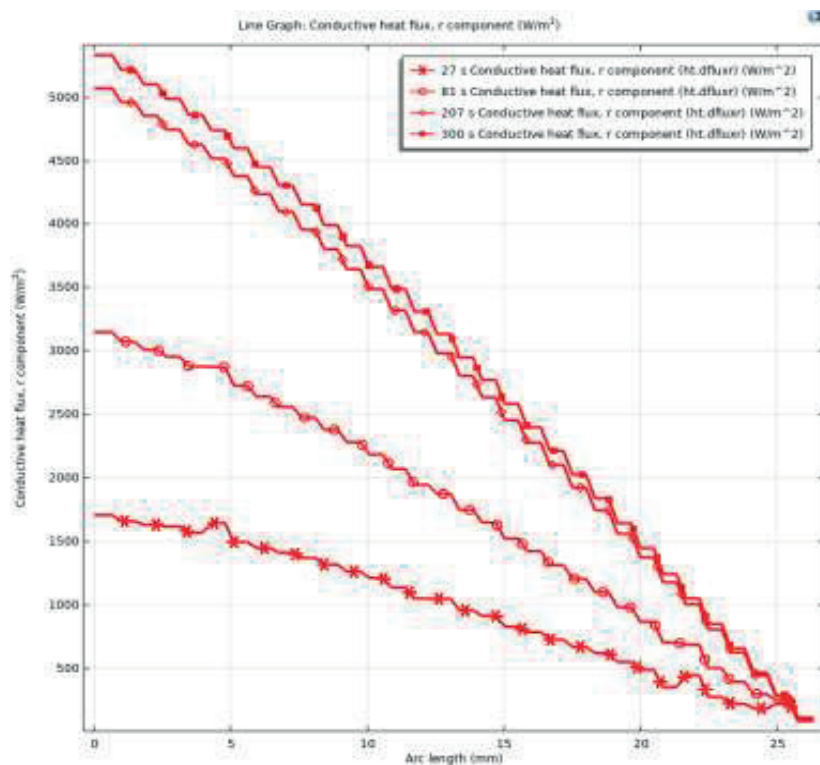


Figure 3 – Heat flux profiles

The introduced heat flux is depicted in model as expression:

$$k \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = q. \quad (5)$$

Considering (5) and (3), we can reformulate them as follows:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = h\theta \Big|_{x=0}, \quad h = \frac{q}{k\theta(0,t)}. \quad (6)$$

To find an analytical solution form, we apply Laplace Transform as usually done for seeking analytical expressions [18-20], so the problem (1)-(6) will take form in the frequency domain:

$$pU - a^2 \frac{d^2 U}{dx^2} = \theta_0. \quad (7)$$

$$\frac{dU}{dx} \Big|_{x=0} = hU \Big|_{x=0}. \quad (8)$$

The solution of (7) is found in the form:

$$U = \frac{\theta_0}{p} + C e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}. \quad (9)$$

The constant is found by boundary condition (8):

$$U = \frac{\theta_0}{p} \left(1 - \frac{h}{\frac{\sqrt{p}}{a} + h} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} \right) = \frac{\theta_0}{p} \left(1 - e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} \right) + \frac{\theta_0}{a} \frac{1}{\sqrt{p} \left(\frac{\sqrt{p}}{a} + h \right)} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x}. \quad (12)$$

The form (12) represents an analytical expression for proposed model in the frequency domain. Now, it is necessary to apply inverse transform and receive equivalent form in real-time domain. Considering that:

$$\mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{p} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} \right) = \text{Erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right). \quad (13)$$

From it, follows that:

$$\frac{\theta_0}{p} \left(1 - e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} \right) \rightarrow \theta_0 \text{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right). \quad (14)$$

For the right part of (12) shifting and similarities theorems of operational calculus are applied:

$$\mathcal{L}^{-1} [F(p)] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{\frac{p}{a} + h} e^{-p \frac{x}{a}} \right] = a e^{-h(at-x)} \mu(at-x). \quad (15)$$

Having Efros theorem together with (15), we know that:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{F(\sqrt{p})}{\sqrt{p}} \right] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \frac{1}{\frac{\sqrt{p}}{a} + h} e^{-\frac{\sqrt{p}}{a}x} \right] = \frac{a}{\sqrt{\pi t}} \int_{\frac{x}{a}}^{\infty} e^{-h(a\tau-x) - \frac{\tau^2}{4t}} d\tau. \quad (16)$$

Results and Discussion

Combining expressions (15) and (16) together the analytical expression in the real-time domain takes form:

$$\theta(x,t) = \theta_0 \left[\text{erf} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) + e^{hx+a^2h^2t} \text{erfc} \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} + ah\sqrt{t} \right) \right]. \quad (17)$$

Expressing (17) having (6), the form becomes as:

$$\theta(x, t) = \theta_0 \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2a\sqrt{t}}} e^{-t^2} dt + e^{\frac{q}{a\theta(0,t)}x + \left(\frac{q}{\theta(0,t)}\right)^2 t} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} + \frac{q}{\theta(0,t)}\sqrt{t}\right)}^{\infty} e^{-t^2} dt \right] \quad (18)$$

It should be noted that the error function can be expressed as the following converging series:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{10} - \frac{x^7}{42} + \frac{x^9}{216} - \dots \right). \quad (19)$$

Now, having the measurements of temperature received experimentally, we can find analytical expression for the heat diffusivity coefficient from (18). The data was measured during ten discrete time intervals that could be smoothly interpolated by the eighth order polynomial, depicted on the figure below, along with residual plot:

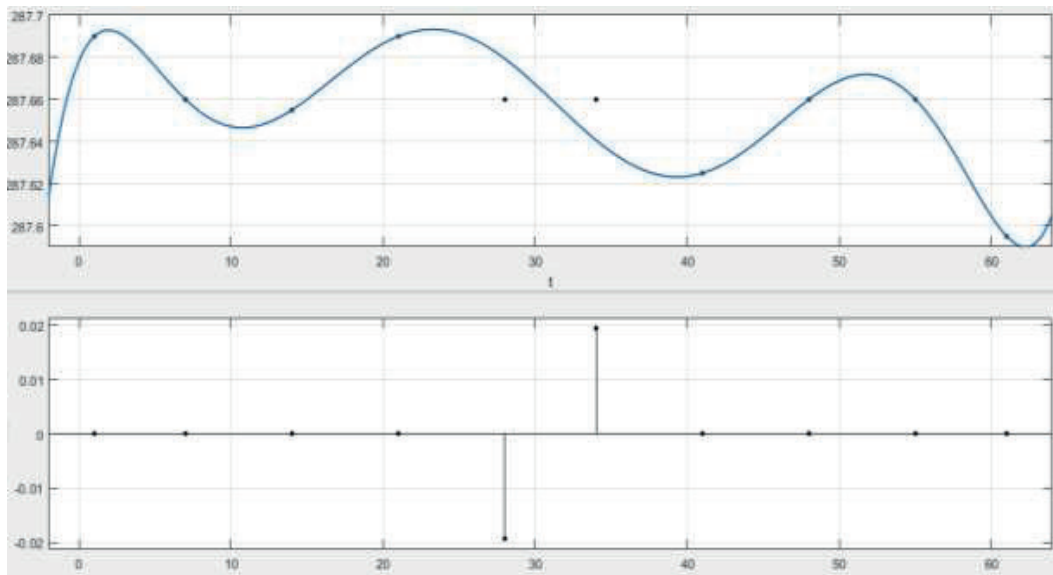


Figure 4 – Measured discrete data interpolated by 8th order polynomial (above) along with its residuals (below)

On the above figure, we observe the fitting model, that is the coincide of the interpolated data with the measurements, so that the vertical axis represents the measurements, and we have time interval in the horizontal axis. Meanwhile the below graph represents the points at which the residual indicates an outliers, stating that at these points the measurements were influenced by the noise introduced via the measurement device error.

Conclusion

We take the first three term of the series (19), however increasing the order will lead to better accuracy, simplifying the expression (18) we obtain the following form:

$$\left(h\xi + a^2 h^2 t \right) \left\{ 1 - \left[\frac{480a^2 t^2 \xi + 960a^4 h t^3 - 320a^6 h^3 t^4 + 96a^8 h^5 t^5 - 40t\xi^3 + 3\xi^5}{480\sqrt{\pi}a^3 t^{\frac{5}{2}}} \right] \right\} -$$

$$-\ln \left[\frac{u(\xi, t)}{u_0} - \frac{4a^4 \xi t^2 - 3a^2 \xi^9 t + 2.5 \xi^5}{4\sqrt{\pi} a^5 t^{\frac{5}{2}}} \right] = 0. \quad (20)$$

Expression (20) is an analytical form with heat transfer parameters of soil which is heated by the lamp on the inlet. Determination of the necessary coefficients could be done by numerical iterative approach or direct calculations. In (20) the term $\theta(\xi, t)$ is additionally measured temperature at point $x = \xi$, whereas all other terms are known constants. It could be clear that heat transfer parameters will depend on temperature and vary through time exponentially.

Received form is crucial in performing on site investigations or mathematical exploitations over correlational studies between thermal characteristics of soil and other terms. It is also useful for convergency rate studies for different approaches.

References

- 1 Nikonorov V.V., Nikonorova D.O., Pikus G.A. Thermophysical properties of the soil massif. Magazine of Civil Engineering. 2019. 92(8). P. 27–35. DOI: 10.18720/MCE.92.2.
- 2 Murgul V. Investigation of heat losses through ground supported floors of historical buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 365. P. 022066. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022066.
- 3 Bushmanova A.V., Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Struchkova A.Y., Manovitsky S.S. Thermal cracking resistance in massive foundation slabs in the building period. Magazine of Civil Engineering. 2017. 8. P. 193–200. DOI: 10.18720/MCE.76.17.
- 4 Bonivento Bruges J.C., Vieira G., Revelo Orellana D.P., Togo I. Parameter of thermal resistance of bamboo multilayer wall. Magazine of Civil Engineering. 2018. 83(7). P. 92–101. DOI: 10.18720/MCE.83.9.
- 5 Buhartsev V.N., Nguyen Tkhay Khoang. Estimation of the soil body stability. Magazine of Civil Engineering. 2012. 35(9). P. 41–48. DOI: 10.5862/MCE.35.6
- 6 Some approximate analytical steady-state solutions for cylindrical fin. Bruvere A. and Buikis A. 2006. Proceedings of 4th IASME/WSEAS International Conference on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT. P. 238–243.
- 7 Viļums R. Conservative averaging method in mathematical models of heat processes of electric systems. Riga : University of Latvia, 2010. ISBN 978-9934-8180-2-8.
- 8 Dzung Nguyen Phuong. The dependence of the strength properties of soil on its physical state. Magazine of Civil Engineering. 2012. 35(9). P. 23–28. DOI: 10.5862/MCE.35.3
- 9 Utkin V.S. The Calculation of foundation bed reliability by bearing capacity (shift) during operation. Magazine of Civil Engineering. 2014. 45(1). P. 90–100. (rus). DOI: 10.5862/MCE.45.
- 10 Yahya Kooch, Milad Azizi Mehr, Seyed Mohsen Hosseini, Soil biota and fertility along a gradient of forest degradation in a temperate ecosystem, CATENA, Volume 204, 2021, 105428, ISSN 0341-8162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105428>.
- 11 Georges Kogge Kome, Roger Kogge Enang, Bernard Palmer Kfuban Yerima, Knowledge and management of soil fertility by farmers in western Cameroon, Geoderma Regional. Vol. 13. 2018. P. 43–51, ISSN 2352-0094. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.02.001>.
- 12 Yan Gao, Shuyue Dong, Chuang Wang, Yanhong Chen, Wenju Hu, Effect of thermal intensity and initial moisture content on heat and moisture transfer in unsaturated soil, Sustainable Cities and Society. Vol. 55. 2020. 102069. ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102069>.
- 13 Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th ed. Hoboken (NJ) : Wiley, 2006. 1024 p.
- 14 Exact Analytical 3D Steady-State Solution for Cylindrical Fin. Piliksere A. and Buikis A. Puerto de la cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain : WSEAS Press, 2007. Proceeding of the 4th WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment. P. 238–243.
- 15 Ali Jahangiri, Samira Mohammadi, Mohammad Akbari, Modeling the one-dimensional inverse heat transfer problem using a Haar wavelet collocation approach, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 525. 2019. P. 13–26. ISSN 0378-4371. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.040>.
- 16 Alexander Yu. Chebotarev, René Pinnau, An inverse problem for a quasi-static approximate model of radiative heat transfer, Journal of Mathematical Analysis and Applications. Vol. 472. Issue 1. 2019. P. 314–327. ISSN 0022-247X. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2018.11.026>.
- 17 Free convection in a light bulb, application id: 303, created in Comsol Multiphysics 5.6 Comsol application license 5.6.
- 18 Jackson B.J., Davis J.M. An ergodic approach to Laplace transforms on time scales, Journal of Mathematical Analysis and Applications. Vol. 502. Issue 1. 2021. 125231, ISSN 0022-247X. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2021.125231>.

19 Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. (1973) Methods of the theory of functions of a complex variable, 4th ed., Rev. and add. M.: Science. Ch. ed. physical-mat. lit. P. 541–550.

20 Ali Jahangiri, Samira Mohammadi, Mohammad Akbari, Modeling the one-dimensional inverse heat transfer problem using a Haar wavelet collocation approach, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 525. 2019. P. 13–26/ ISSN 0378-4371. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.040>.

Information about authors

Sinita Artem Vitalievich (corresponding author)

PhD Candidate, Senior-lecturer, kazakh-British Technical University, School of applied mathematics, Tole-bi 59, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID 0000-0002-5828-7820.

E-mail: a.sinita@kbtu.kz.

Antonio Capsoni

PhD, Professor, Polytechnical University of Milan, Architecture and Civil Engineering of the Built Environment, Piazza Leonardo da Vinci, 32, Milan, Italy

ORCID ID 0000-0002-2056-495X.

E-mail: antonio.capsoni@polimi.it

Авторлар туралы мәліметтер

Синица Артём Витальевич (корреспонденция авторы)

PhD кандидаты, аға оқытушы, Қазақ-Британ техникалық университеті, Қолданбалы математика мектебі, Төле би, 59, 050000, Алматы, Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-5828-7820.

E-mail: a.sinita@kbtu.kz

Антонио Капсони

PhD, профессор, Политехника ди Милан, сәулет және дизайн, Пьяцца Леонардо да Винчи, 32, Милан, Италия

ORCID ID: 0000-0002-2056-495X.

E-mail: antonio.capsoni@polimi.it.

Информация об авторах

Синица Артём Витальевич (автор для корреспонденции)

Кандидат PhD, сениор-лектор, Казахстанско-Британский технический университет, Школа прикладной математики, ул. Төле би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID 0000-0002-5828-7820.

E-mail: a.sinita@kbtu.kz

Антонио Капсони

PhD, профессор, Политехнический университет Милана, архитектура и проектирование, площадь Леонардо да Винчи, 32, г. Милан, Италия

ORCID ID 0000-0002-2056-495X.

E-mail: antonio.capsoni@polimi.it.

ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ

HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY

ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ответственный за выпуск

Алагузов Рашид Жуманович

Редакторы

Скуратова Ирина Михайловна
Султангазиев Нурболат Абаевич

Компьютерный дизайн и верстка

Жадыранова Гульнур Даутбековна

Подписано в печать 15.12.2022 г.
Тираж 300 экз. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага тип. Уч.-изд.л. 2,5 Заказ №186

Редакция журнала «Вестник КБТУ» не несет ответственность за содержание публикуемых статей. Содержания статей целиком принадлежат авторам, и размещаются в журнале исключительно под их ответственность.