

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

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

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Volume 19, Issue 2
April-June 2022

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

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

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы

№ 2 (61)

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., 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

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

Алтаева А.Б.

Кіші есептік спектрі бар әлсіз о-минималды анықтау облысы бойынша мәлімет базасы сұраулар туралы.....6

Бржанов Р.Т., Садуева Г.Х., Құрбанмагомедов А.Қ., Шайхиева К.М.

Қыста бетондаудағы энергияны үнемдеу факторлары.....13

Ізбасаров А.А., Кулпешов Б.Ш., Емельянов Д.Ю.

Дерлік омега-категориялық әлсіз о-минималды теорияларында (p, q) -секаторлар туралы.....20

Нүсіпов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Сұлтанов А.Т., Тыщенко И.Е., Құсайынова А.Ж., Бұғыбай З.К., Ысқақ К.М.

RSA химиялық өңдеуден кейін жылдам термиялық күйдіру арқылы өсірілген SiO_2 қабыршақтардың пассивациялық қасиеттерін жақсарту.....29

МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ

Базарбаева М.Б., Исмаилова Д.А., Абдукаримов А.К., Деликешева Д.Н., Момбеков Б.И., Зерпа Л.

Парафин түсуін болжау үшін X және Y кендерінің көмірсутегі қоспасының тұрақтылық анализін қолдану.....39

Садыкова Н.Ж., Утелбаев Б.Т., Шарипов Р.Х., Балгимбаева У.А., Сулейменов Э.Н.

Металл мұнай құбырларының тоттану себептерін зерттеу.....49

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Алтаева А.Б.

О запросах баз данных над слабо о-минимальной областью с малым счетным спектром.....6

Бржанов Р.Т., Садуева Г.Х., Құрбанмагомедов А.Қ., Шайхиева К.М.

Факторы энергосбережения при зимнем бетонировании.....13

Избасаров А.А., Кулпешов Б.Ш., Емельянов Д.Ю.

О (p, q) -секторах в почти омега-категоричных слабо о-минимальных теориях.....20

Нусупов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Султанов А.Т., Тыщенко И.Е., Кусайнова А.Ж., Бугыбай З.К., Ыскак К.М.

Улучшение пассивирующих свойств пленок SiO_2 , выращенных методом быстрого термического отжига, после химической RCA обработки.....29

НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

Базарбаева М.Б., Исмаилова Д.А., Абдукаримов А.К., Деликешева Д.Н., Момбеков Б.И., Зерпа Л.

Применение анализа стабильности смеси углеводородов месторождения X и Y для прогнозирования выпадения парафина.....39

Садыкова Н.Ж., Утелбаев Б.Т., Шарипов Р.Х., Балгимбаева У.А., Сулейменов Э.Н.

Изучение причины коррозии металлических нефтепроводов.....49

CONTENTS

PHYSICAL, MATHEMATICAL AND TECHNICAL SCIENCES

Altayeva A.B.

On database queries over a weakly o-minimal domain with a small countable spectrum.....6

Brzhanov R.T., Sadueva G.H., Kurbanmagomedov A.K., Shaikhiyeva K.M.

Energy saving factors in winter concreting.....13

Izbasarov A.A., Kulpeshov B.Sh., Emelyanov D.Yu.

On (p, q)-splitting formulas in almost omega-categorical weakly o-minimal theories.....20

**Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Sultanov A.T., Tyschenko I.E., Kusainova A.Zh.,
Bugybai Z.K., Yskak K.M.**

Improvement of the passivation properties of SiO₂ films, grown by the method of rapid thermal annealing, after chemical RCA treatment.....29

OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY

**Bazarbayeva M.B., Ismailova D.A., Abdukarimov A.K., Delikesheva D.N., Mombekov B.I.,
Zerpa L.**

An application of stability analysis of hydrocarbon mixtures from X and Y fields to predict wax precipitation.....39

Sadykova N.Zh., Utelbayev B.T., Sharipov R.H., Balgimbayeva U.A., Suleimenov E.N.

Study of the reasons for corrosion of metallic oil.....49

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 519.72

МРНТИ 27.03.66, 27.47.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-2-6-12>

О ЗАПРОСАХ БАЗ ДАННЫХ НАД СЛАБО О-МИНИМАЛЬНОЙ ОБЛАСТЬЮ С МАЛЫМ СЧЕТНЫМ СПЕКТРОМ

АЛТАЕВА А.Б.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, г.Алматы, Казахстан

Аннотация. В реляционной модели баз данных, введенной Э.Ф. Коддом, состояние базы данных понимается как конечная совокупность отношений между элементами. Имена отношений и их арности (местности) фиксируются и называются схемой базы данных. Отдельная информация, хранимая в отношениях данной схемы, называется состоянием базы данных. Хотя реляционные базы данных были придуманы для конечных совокупностей данных, часто удобно предполагать, что существует бесконечная область определения. Мы исследуем реляционные базы данных над упорядоченной областью определения с некоторыми дополнительными отношениями – типичным примером является множество рациональных чисел с отношением линейного порядка и бинарной операцией сложения. Если в качестве языка запросов используется язык логики предикатов первого порядка, то запросы могут использовать как отношения базы данных, так и отношения области определения, при этом переменные изменяются на всей области определения. В фокусе наших исследований запросы первого порядка (FO), инвариантные относительно перестановок, сохраняющих порядок, такие запросы называются порядково-генерическими. Установлено, что для некоторых областей порядково-генерические запросы первого порядка сводятся к запросам чистого порядка. Здесь мы доказываем теорему сводимости над слабо о-минимальной областью определения, имеющей ранг выпуклости 1 и малый счетный спектр.

Ключевые слова: слабая о-минимальность, запрос баз данных, счетный спектр, почти омега-категоричность, ранг выпуклости.

КІШІ ЕСЕПТІК СПЕКТРІ БАР ӘЛСІЗ О-МИНИМАЛДЫ АНЫҚТАУ ОБЛЫСЫ БОЙЫНША МӘЛІМЕТ БАЗАСЫ СҰРАУЛАР ТУРАЛЫ

АЛТАЕВА А.Б.

ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті
050040, Алматы қ, Қазақстан

Аңдатпа. Реляциялық деректер қоры моделінде Э. Ф. Кодд, дерекқор күйі элементтер арасындағы қарым-қатынастардың соңғы жиынтығы ретінде түсініледі. Қатынастардың

атаулары және олардың аритеттері (орындары) бекітілген және деректер қоры схемасы деп аталады. Бұл схеманың қатынастарында сақталатын жеке ақпарат мәліметтер қорының күйі деп аталады. Реляциялық дерекқорлар деректердің ақырғы жиындарына арналған болса да, көбінесе шексіз анықтау облысы бар деп болжауға ыңғайлы. Біз реляциялық мәліметтер базасын қосымша қатынастармен реттелген анықтау облысы бойынша зерттейміз – типикалық мысалы қосу бинарлық операциямен рационалдық сандар реттелген жиыны болады. Бірінші ретті (FO) предикат логикалық тіл сұрау тілі ретінде пайдаланылса, сұраулар барлық доменде өзгертін айнымалы мәндермен дерекқор қатынастарын да, домен қатынастарын да пайдалана алады. Біздің зерттеуіміз бірінші ретті сұраныстарға бағытталған, олар ретті сақтайтын ауыстыруға қатысты инвариантты болады, мұндай сұраныстар рет-генерикалық деп аталады. Кейбір облыстар үшін бірінші ретті рет-генерикалық сұраныстар таза реттік сұраныстарға дейін азайтылатыны анықталды. Мұнда біз кіші есептік спектрі бар және дөңестік рангісі 1 болған әлсіз о-минималды анықтау облысы бойынша редукция теоремасын дәлелдейміз.

Түйін сөздер: әлсіз о-минималдық, мәлімет базасының сұранысы, есептік спектрі, омега-категориялық дерлік, дөңестік рангісі.

ON DATABASE QUERIES OVER A WEAKLY O-MINIMAL DOMAIN WITH A SMALL COUNTABLE SPECTRUM

ALTAYEVA A.B.

*Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Almaty, Kazakhstan*

Abstract. In the relational database model introduced by E.F. Codd, the database state is understood as a finite set of relationships between elements. The names of the relationships and their arnts (locations) are fixed and called the database schema. The individual information stored in the relationships of this schema is called the state of the database. Although relational databases were devised for finite sets of data, it is often convenient to assume that there is an infinite domain. We consider relational databases organized over an ordered domain with some additional relations – a typical example is the set of rational numbers together with the relation of linear order and binary operation of addition. If the first-order predicate logic language is used as the query language, then queries can use both database relationships and domain relationships, with variables changing throughout the domain. In the focus of our study are the first-order (FO) queries that are invariant under order-preserving permutations – such queries are called order-generic. It was discovered that for some domains order-generic FO queries fail to express more than pure order queries. Here we prove the collapse result theorem over a weakly o-minimal domain having convexity rank 1 and a small countable spectrum.

Keywords: weak o-minimality, database query, countable spectrum, almost omega-categoricity, convexity rank.

Введение

В реляционной модели баз данных, введенной Э.Ф. Коддом [1–2], состояние базы данных понимается как конечная сово-

купность отношений между элементами. Имена отношений и их арности (местности) фиксируются и называются схемой базы данных. Отдельная информация, хранящаяся

в отношении данной схемы, называется состоянием базы данных. Хотя реляционные базы данных были придуманы для конечных совокупностей данных, часто удобно предполагать, что существует бесконечная область определения – например, целые или рациональные числа, – так что элементы данных выбираются из этой области. Функции и отношения, определенные на всей области определения (например, отношение линейного порядка $<$ и операция сложения $+$), могут быть также использованы при запрашивании. Например, если в качестве языка запросов используется язык логики предикатов первого порядка, то запросы могут использовать как отношения базы данных, так и отношения области определения, при этом переменные изменяются на всей области определения. Выразительная сила запросов баз данных исследовалась в работах [3–10].

Формальная постановка

Пусть M – бесконечная структура сигнатуры L . Здесь мы рассматриваем упорядоченные структуры. Это означает, что L включает бинарный реляционный символ $<$, интерпретация которого в M удовлетворяет аксиомам линейного порядка. Мы фиксируем схему базы данных SC и вводим следующие обозначения:

$$L_0 = \{<\}, L' = L_0 \cup SC, L'' = L \cup SC.$$

Запрос базы данных может быть формально определен как отображение, которое принимает состояние базы данных и производит новое отношение фиксированной арности над M . Мы рассматриваем два языка для запрашивания. Запросы первого языка есть формулы сигнатуры L' – мы называем их ограниченными. Запросы второго языка есть формулы сигнатуры L'' – мы называем их расширенными.

Итак, базы данных предназначены для хранения текущей информации о как-то структурированной предметной области. В каждый момент времени эта информация является конечной и представляет собой

конечный набор конечных таблиц. Обычно число таблиц и устройство каждой таблицы не меняются с течением времени, но меняются строки таблиц. Могут добавляться новые строки и удаляться некоторые старые. Строки хранящихся таблиц представляют собой конечные последовательности элементов. Число элементов каждой последовательности фиксировано для фиксированной таблицы. Устройство таблицы практически и есть число элементов в каждой строке этой таблицы. Более формально, каждая таблица – это конечно местное конечное отношение, а сама база данных – это конечный набор конечно местных конечных отношений. Для удобства разговора о базе данных каждому ее отношению приписывают некоторое имя с указанием числа аргументов (или местности) этого имени отношения. Схема (или сигнатура) базы данных и есть конечная последовательность этих имен отношений с указанием местности каждого имени. В каждый момент времени именам отношений из этой схемы присвоены некоторые отношения соответствующих местностей. Это – состояние базы данных в данный момент.

Состояние называется конечным, если все его отношения конечны. Иногда удобно рассматривать не произвольные состояния базы данных, а ограниченные какими-то условиями. Типичным ограничением является условие, что элементы всех строк всех таблиц выбраны из фиксированного подмножества I универсума. Другими словами, каждому имени отношения из рассматриваемой схемы базы данных поставлено в соответствие отношение той же местности на множестве I . В этом случае говорят, что рассматриваемое состояние базы данных является состоянием над I .

Мы будем рассматривать локально генерические запросы, которые являются инвариантами при любых сохраняющих линейное упорядочение отображениях конечных подмножеств универсума в универсум. Грубо говоря, ответ на такой запрос основывается на хранящейся информации, но не зависит от способа кодировки этой информации при хранении.

Определение 1. Будем говорить, что k -арный запрос Θ является локально генерическим над конечными состояниями, если $\bar{a} \in \Theta$ тогда и только тогда, когда $\varphi(\bar{a}) \in \Theta(\varphi(s))$ для любого частичного $<$ -изоморфизма $\varphi: X \rightarrow M$, где $X \subseteq M$ для любого конечного состояния s над X и для любого k -кортежа $\bar{a}$ в X .

Состояние s обогащает универсум M сигнатуры L до L'' -структуры, которую мы будем обозначать как (M, s) .

Определение 2. ρ -состояние s для L -структуры W называется псевдоконечным в W , если (W, s) есть модель L'' -теории первого порядка всех структур (W, r) , где r – конечное состояние над W .

Псевдоконечное множество – это частный случай псевдоконечного состояния. Имеется в виду сигнатура, состоящая из одного одноместного отношения и некоторых других отношений. Рассматриваются такие системы этой сигнатуры, на которых выполняются все замкнутые формулы логики предикатов, истинные на всех конечных системах этой сигнатуры. Тогда интерпретация этого одноместного отношения в такой системе называется псевдоконечным множеством.

Определение 3. Будем говорить, что полная теория T имеет Свойство Изоляции, если существует кардинал λ такой, что для любого псевдоконечного множества A и для любого элемента $\bar{a}$ модели теории T существует $A_0 \subseteq A$ такое, что $|A_0| < \lambda$ и $\text{tp}(\bar{a}/A_0)$ изолирует $\text{tp}(\bar{a}/A)$.

Для произвольных подмножеств A, B структуры M пишут $A < B$, если $a < b$ всякий раз, когда $a \in A$ и $b \in B$. Если $A \subset M$ и $x \in M$, то пишут $A < x$, если $A < \{x\}$. Для произвольного полного 1-типа p через $p(M)$ обозначают множество реализаций типа p в M . Открытым интервалом I в структуре M называется параметрически определимое подмножество структуры M вида $I = \{c \in M: M \models a < c < b\}$ для некоторых $a, b \in M \cup \{-\infty, \infty\}$, где $a < b$. Аналогично можно определить замкнутые, полуоткрытые-полузамкнутые и т.п. интервалы в M , так что, например, произвольная точка структуры M является сама (тривиальным) замкнутым

интервалом. Подмножество A структуры M называется выпуклым, если для любых $a, b \in A$ и $c \in M$ всякий раз, когда $a < c < b$ следует, что $c \in A$.

Данная статья касается понятия слабой о-минимальности, первоначально глубоко исследованного Д. Макферсоном, Д. Маркером и Ч. Стайнхорном в [11]. Слабо о-минимальная структура есть линейно упорядоченная структура $M = \langle M, =, <, \dots \rangle$, такая, что любое определимое (с параметрами) подмножество структуры M является объединением конечного числа выпуклых множеств в M . Вспомним, что такая структура M называется о-минимальной, если каждое определимое (с параметрами) подмножество структуры M является объединением конечного числа интервалов в M . Таким образом, слабая о-минимальность является обобщением о-минимальности. Ранг выпуклости формулы с одной свободной переменной введен в [12]. Ниже мы расширяем определение ранга выпуклости формулы [12] на произвольные множества (необязательно определимые):

Определение 4. [12] Пусть T – слабо о-минимальная теория, M – достаточно насыщенная модель теории T , $A \subseteq M$. Ранг выпуклости множества A ($\text{RC}(A)$) определяется следующим образом:

- 1) $\text{RC}(A) = -1$, если $A = \emptyset$.
- 2) $\text{RC}(A) = 0$, если A конечно и непусто.
- 3) $\text{RC}(A) \geq 1$, если A бесконечно.
- 4) $\text{RC}(A) \geq \alpha + 1$, если существует параметрически определимое отношение эквивалентности $E(x, y)$ такое, что существуют $b_i \in A$, $i \in \omega$, которые удовлетворяют следующему:
 - для любых $i, j \in \omega$, всякий раз когда $i \neq j$, мы имеем $M \models \neg E(b_i, b_j)$
 - для каждого $i \in \omega$ $\text{RC}(E(M, b_i)) \geq \alpha$ и $E(M, b_i)$ – выпуклое подмножество множества A
- 5) $\text{RC}(A) \geq \delta$, если $\text{RC}(A) \geq \alpha$ для всех $\alpha \leq \delta$ (δ предельный).

Если $\text{RC}(A) = \alpha$ для некоторого α , то мы говорим, что $\text{RC}(A)$ определяется. В противном случае (т.е. если $\text{RC}(A) \geq \alpha$ для всех α), мы полагаем, $\text{RC}(A) = \infty$.

Ранг выпуклости формулы $\phi(x, \bar{a})$, где

$a \in M$, определяется как ранг выпуклости множества $\phi(M, a)$, т.е. $RC(\phi(x, a)) := RC(\phi(M, a))$. Ранг выпуклости 1-типа p определяется как ранг выпуклости множества $p(M)$, т.е. $RC(p) := RC(p(M))$.

В частности, теория имеет ранг выпуклости 1, если не существует определимого (с параметрами) отношения эквивалентности с бесконечным числом выпуклых бесконечных классов. Очевидно, что о-минимальная теория имеет ранг выпуклости 1.

Определение 5. [13] Пусть M – слабо о-минимальная структура, $A, B \in M$, $M - |A|^+$ -насыщенна, $p, q \in S_1(A)$ – неалгебраические. Будем говорить, что тип p не является слабо ортогональным типу q , если существуют A -определимая формула $H(x, y)$, $\alpha \in p(M)$ и $\beta_1, \beta_2 \in q(M)$ такие что $\beta_1 \in H(M, \alpha)$ и $\beta_2 \notin H(M, \alpha)$.

Определение 6. [14, 15] Пусть T – полная теория, $p_1(x_1), \dots, p_n(x_n) \in S_1(\emptyset)$. Тип $q(x_1, \dots, x_n) \in S_n(\emptyset)$ называется $(p_1, \dots, p_n)$ -типом, если $q(x_1, \dots, x_n) \supseteq \bigcup_{i=1}^n p_i(x_i)$. Множество всех $(p_1, \dots, p_n)$ -типов теории T обозначается через $S_{p_1, \dots, p_n}(T)$. Счетная теория T называется почти омега-категоричной, если для любых типов $p_1(x_1), \dots, p_n(x_n) \in S_1(\emptyset)$ существует лишь конечное число типов $q(x_1, \dots, x_n) \in S_{p_1, \dots, p_n}(T)$.

Почти омега-категоричность тесно связана с понятием эренфойхтовости теории. Так, в работе [14] доказано, что если T – почти омега-категоричная теория, имеющая ровно три счетные попарно неизоморфные модели, то в теории T интерпретируется плотный линейный порядок. Тем не менее существует пример (построенный М.Г. Перетяжкиным в [16]) теории, имеющей ровно три счетные попарно неизоморфные модели, но не являющейся почти омега-категоричной.

В работе [17] установлены почти омега-категоричность эренфойхтовых вполне о-минимальных теорий и выполнимость принципа замены для алгебраического замыкания для почти омега-категоричных вполне о-минимальных теорий. Недавно были доказаны ортогональность любого семейства попарно слабо ортогональных неалгебраических 1-типов над пустым

множеством для таких теорий и бинарность почти омега-категоричных вполне о-минимальных теорий [18] и почти омега-категоричных слабо о-минимальных теорий ранга выпуклости 1 [19].

В настоящей работе исследуется проблема выразимости расширенных запросов через ограниченные над слабо о-минимальной областью определения баз данных, имеющей ранг выпуклости 1 и малый счетный спектр. Мы доказываем, что слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1 с малым счетным спектром имеет свойство изоляции. В качестве следствия мы получаем сводимость расширенных запросов к ограниченному над слабо о-минимальной областью определения, имеющей ранг выпуклости 1 и малый счетный спектр.

Результаты

Теорема 7. [3] Предположим, что теория первого порядка структуры M имеет Свойство Изоляции. Пусть расширенный запрос φ эквивалентен над конечными состояниями ограниченному запросу.

Теорема 8. Пусть T – слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1 с малым счетным спектром. Тогда T имеет Свойство Изоляции.

Доказательство теоремы 9. Заметим, что слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1 с малым счетным спектром является почти омега-категоричной. Пусть M – достаточно насыщенная модель теории T . Возьмем произвольные элемент $a \in M$ и бесконечное множество $A \subseteq M$ и рассмотрим $p(x) := tp(a/A)$. В силу слабой о-минимальности $p(M)$ выпукло, и, следовательно, тип $p(x)$ определяется выпуклыми формулами.

Случай 1. $p(x)$ – изолированный. Тогда существует формула $\varphi(x, \bar{b})$, где $\bar{b} \in A$, такая, что $\varphi(M, \bar{b})$ выпукло и $p(M) = \varphi(M, \bar{b})$. Таким образом, в качестве A_0 можем взять множество элементов из кортежа $\bar{b}$.

Случай 2. $p(x)$ – квазирациональный. Не умаляя общности, предположим, что $p(x)$ – квазирациональный вправо. Тогда существует выпуклая формула $U(x, \bar{b})$ для некоторого $\bar{b} \in A$, так что $p(M) \subseteq U(M, \bar{b})$ и

$U(M, \bar{b})^+ = p(M)^+$. В силу бинарности T для любой выпуклой формулы $\varphi_i(x, \bar{b}_i) \in p$ левая граница множества $\varphi_i(M, \bar{b}_i)$ определяется выпуклой формулой $\varphi_i^1(x, \bar{b}_i^1)$ для некоторого $\bar{b}_i^1 \in \bar{b}_i$. В силу почти омега-категоричности попарно неэквивалентных выпуклых формул $\theta(x, \bar{b}_i^1)$ с условием $p(M) \subseteq \theta(M, \bar{b}_i^1)$ конечное число. Таким образом, мы заключаем, что левая граница множества $p(M)$ определяется счетным числом констант из A . Поэтому в качестве A_0 можем взять счетное подмножество множества A .

Случай 3. $p(x)$ – иррациональный. В этом случае можно показать аналогично случаю 2, что как левая, так и правая границы множества $p(M)$, определяются счетным λ множеством констант из A .

Таким образом, в качестве λ можем

взять первый несчетный кардинал ω_1 . Следовательно, T имеет Свойство Изоляции.

Заключение

Таким образом, в качестве следствия получаем, что если T – слабо о-минимальная теория ранга выпуклости 1 с малым счетным спектром, то любой расширенный запрос, являющийся локально генерическим над конечными состояниями, эквивалентен ограниченному запросу.

Благодарности

Данные исследования поддержаны Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант AP08855544).

REFERENCES

- 1 Codd E.F. A relational model for large shared data banks // Communications ACM, 1970, vol. 13, no. 6, pp. 377–387.
- 2 Codd E.F. Relational completeness of database sublanguages // Database systems, Prentice-Hall, 1972, pp. 33–64.
- 3 Benedikt M., Dong G., Libkin L., Wong L. Relational expressive power of constraint query languages // Journal of ACM, 1998, vol. 45, no. 1, pp. 1–34.
- 4 Belegardek O.V., Stolboushkin A.P. and Taitslin M.A. Extended order-generic queries // Annals of Pure and Applied Logic, 1999, vol. 97, pp. 85–125.
- 5 Taitslin M.A. A general condition for collapse results // Annals of Pure and Applied Logic, 2002, vol. 113, no. 1–3, pp. 323–330.
- 6 Dudakov S.M., Tajclin M.A. Transljacionnye rezul'taty dlja jazykov zaprosov v teorii baz dannyh // Uspehi matematicheskikh nauk, 2006, vol. 61, no. 2, pp. 3–66.
- 7 Kulpeshov B.Sh. On Problem of Expressiveness of Database Queries // International Journal of Mathematics, Computer Sciences and Information Technology, 2010, vol. 3, no. 2, pp. 123–128.
- 8 Kulpeshov B.Sh. To Reducibility of Database Queries over an Ordered Domain // Computer Modelling and New Technologies, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 34–39.
- 9 Kulpeshov B.Sh. On Reducibility of database queries over a circularly minimal domain // Advances in Computational Sciences and Technology, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 25–33.
- 10 Baizhanov B.S., Kulpeshov B.Sh. On the Isolation Property over a Database Domain // Journal of Mathematics and System Science, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 96–100.
- 11 Macpherson H.D., Marker D., Steinhorn Ch. Weakly o-minimal structures and real closed fields // Transactions of the American Mathematical Society, 2000, vol. 352, pp. 5435–5483.
- 12 Kulpeshov B.Sh. Weakly o-minimal structures and some of their properties // The Journal of Symbolic Logic, 1998, vol. 63, pp. 1511–1528.
- 13 Baizhanov B.S. Expansion of a model of a weakly o-minimal theory by a family of unary predicates // The Journal of Symbolic Logic, 2001, vol. 66, pp. 1382–1414.
- 14 Ikeda K., Pillay A., Tsuboi A. On theories having three countable models // Mathematical Logic Quarterly, 1998, vol. 44, no. 2, pp. 161–166.

15 Sudoplatov S.V. Classification of countable models of complete theories. Part 1. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publishing House, 2018, 326 p. ISBN 978-5-7782-3527-4.

16 Peretyat'kin M.G. A theory with three countable models // Algebra and Logic, 1980, vol. 19, no. 2, pp. 139–147.

17 Kulpeshov B.Sh., Sudoplatov S.V. Linearly ordered theories which are nearly countably categorical // Mathematical Notes, 2017, vol. 101, no. 3, pp. 475–483.

18 Altayeva A.B., Kulpeshov B.Sh. Binariness of almost ω -categorical quite o-minimal theories // Siberian Mathematical Journal, 2020, vol. 61, no. 3, pp. 379–390.

19 Kulpeshov B.Sh., Mustafin T.S. Almost ω -categorical weakly o-minimal theories of convexity rank 1 // Siberian Mathematical Journal, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 52–65.

Сведения об авторе

Алтаева Айжан Бакаткалиевна

Магистр, докторант Казахского национального университета имени аль-Фараби,
пр. Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-9238-7131

E-mail: vip.altayeva@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Алтаева Айжан Бакаткалиқызы, магистр, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университетінің PhD докторанты, әл-Фараби даңғылы, 71, 050040, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-9238-7131

E-mail: vip.altayeva@mail.ru

Information about author

Altayeva Aizhan Bakatkalievna

Master, PhD student of Al-Farabi Kazakh National University, 71, al-Farabi avenue, 050040, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-9238-7131

E-mail: vip.altayeva@mail.ru

IRSTI 67.09.33
UDK 693.547.3

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-2-13-19>

ENERGY SAVING FACTORS IN WINTER CONCRETING

BRZHANOV R.T.¹, SADUEVA G.H.¹, KURBANMAGOMEDOV A.K.²,
SHAIKHIYEVA K.M.¹

¹*Caspian State University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov,
130000, Aktau, Kazakhstan*

²*Mathematical Institute named after Nikolsky S.M. Russian Peoples' Friendship University,
101000, Moscow, Russia*

Abstract. This article considers energy-saving technologies for winter concreting of building structures and constructions. Various authors have studied mathematical models of the thermal regime of a three-dimensional building structure. The mathematical model of the heat balance equations in the concrete structure, the thermal conductivity coefficient, the dependences of the heat balance equations in the concrete structure and the junction, the thermal conductivity coefficient, the volumetric thermal conductivity, respectively, in the erected fragment and the previously erected part of the wall was implemented on a computer. The article considers the processes of cement and concrete strength gain during early freezing of concrete. In previous studies by various authors, it was found that with an increase in the time for gaining critical strength, the cost of electricity is reduced by 25-50%, due to the use of thermal inertia of the structure. The rate of cooling of monolithic structures at negative temperatures is revealed. The chemistry of cement hardening processes during early freezing is shown. Thermodynamic calculations set the limits of negative temperatures at which concrete strength curing stops, but under the action of repeated positive temperatures, the cement hydration process resumes and concrete continues to harden. The aluminum minerals of Portland cement clinker are usually the first to hydrate when the cement hardens with water; and in the presence of gypsum they form calcium hydrosulfoaluminate. This connection is very fragile and is destroyed by mechanical stress (repeated vibration) and over time even at normal temperatures. The article reviews the foreign experience of winter concreting and the preferred methods of work in this case.

Keywords: Winter concreting, massiveness of the structure, hydration of Portland cement minerals, additives in winter concrete, electric heating of the concrete mix, concreting in "greenhouses".

ҚЫСТА БЕТОНДАУДАҒЫ ЭНЕРГИЯНЫ ҮНЕМДЕУ ФАКТОРЛАРЫ

БРЖАНОВ Р.Т.¹, САДУЕВА Г.Х.¹, ҚҰРБАНМАГОМЕДОВ А.Қ.², ШАЙХИЕВА К.М.¹

¹*Ш.Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті,
130000, Ақтау қ., Қазақстан*

²*С.М. Никольский атындағы математика институты, Ресей халықтары достығы
университеті, 101000, Мәскеу қ., Ресей*

Аңдатпа. Бұл мақалада құрылыс конструкциялары мен құрылымдарын қысқы бетондаудың энергия үнемдейтін технологиялары қарастырылған. Әртүрлі авторлар үш өлшемді

құрылыс конструкциясының жылу режимінің математикалық үлгілерін зерттеген. Бетон конструкциясындағы жылу балансы теңдеулерінің математикалық моделі, жылу өткізгіштік коэффициенті, бетон конструкциясы мен түйіспедегі жылу балансы теңдеулерінің тәуелділіктері, сәйкесінше тұрғызылған фрагменттегі жылу өткізгіштік коэффициенті, көлемдік жылу өткізгіштік және қабырғаның бұрын салынған бөлігі компьютерде жүзеге асырылды. Мақалада бетонды ерте мұздату кезінде цемент пен бетонның беріктігін арттыру процестері қарастырылады. Әртүрлі авторлардың алдыңғы зерттеулерінде сыни беріктікке ие болу уақытының ұлғаюымен құрылымның жылу инерциясын пайдалану есебінен электр энергиясының құны 25-50% -ға төмендейтіні анықталды. Теріс температурада монолитті құрылымдардың салқындату жылдамдығы анықталды. Ерте мұздату кезіндегі цементтің қатаю процестерінің химиясы көрсетілген. Термодинамикалық есептеулер бетонның беріктігінің қатаюы тоқтайтын теріс температуралардың шектерін белгілейді, бірақ қайталанатын оң температуралардың әсерінен цементтің гидратация процесі қайта басталады және бетон қатаюды жалғастырады. Портландцемент клинкерінің алюминий минералдары әдетте цемент сумен қатқанда бірінші болып ылғалданады, ал гипстің қатысуымен кальций гидросульфоалюминат түзеді. Бұл байланыс өте нәзік және механикалық кернеумен (қайталанған діріл) және уақыт өте келе тіпті қалыпты температурада бұзылады. Мақалада қысқы бетондаудың шетелдік тәжірибесі және бұл жағдайда жұмыс істеудің қолайлы әдістері қарастырылады.

Түйінді сөздер: Қысқы бетондау, құрылымның массивтілігі, портландцемент минералдарының гидратациясы, қысқы бетондағы қоспалар, бетон қоспасын электрмен жылыту, «жылыжайларда» бетондау.

ФАКТОРЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ЗИМНЕМ БЕТОНИРОВАНИИ

БРЖАНОВ Р.Т.¹, САДУЕВА Г.Х.¹, ҚҰРБАНМАГОМЕДОВ А.Қ.²,
ШАЙХИЕВА К.М.¹

¹Каспийский государственный технологический университет имени Ш. Есенова,
130000, г. Актау, Казахстан

²Математический институт им. С.М. Никольского, Российский университет дружбы
народов, 101000, г. Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются энергосберегающие технологии зимнего бетонирования строительных конструкций и сооружений. Различными авторами исследованы математические модели теплового режима объемной строительной конструкции. Математическая модель уравнений теплового баланса в бетонной конструкции, коэффициент теплопроводности, зависимости уравнений теплового баланса в бетонной конструкции и примыкании, объемная теплопроводность соответственно в возведенном фрагменте и ранее возведенной части стены реализована на ЭВМ. В статье рассмотрены процессы набора прочности цементом и бетоном при раннем замерзании бетона. Предыдущими исследованиями разных авторов установлено, что при увеличении времени набора критической прочности затраты электроэнергии снижаются на 25–50% за счет использования тепловой инерции конструкции. Выявлена скорость охлаждения монолитных конструкций при отрицательных температурах. Показана химия процессов твердения цемента при раннем замерзании. Термодинамическими расчетами установлены пределы отрицательных температур, при которых прекращается набор прочности бетоном, но при действии повторных положительных температур процесс гидратации цемента возобновляется и бетон продолжает твердеть.

Алюминиевые минералы портландцементного клинкера обычно первыми гидратируются при затвердевании цемента водой, а в присутствии гипса образуют гидросульфоалюминат кальция. Это соединение очень непрочное и разрушается при механическом воздействии (повторной вибрации) и со временем даже при нормальных температурах. В статье рассмотрен зарубежный опыт зимнего бетонирования и предпочтительные методы работ в этом случае.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, массивность конструкции, гидратации минералов портландцемента, добавки в зимний бетон, электроразогрев бетонной смеси, бетонирование в «теплицах».

Introduction

Peculiar offers of energy-saving technology of winter concreting of constructions and structures are specified in the work [1]. On the basis of a mathematical model of the thermal regime of a three-dimensional building structure, a fragment of the concrete wall is investigated during the intermittent electric heating mode. An example of concrete of a wall adjacent to the existing wall is considered. The mathematical model of the dependence of the heat balance equations in the concrete structure and adjoinment, the coefficient of heat conductivity, the volume heat conductivity respectively in the elevated fragment and the previously erected part of the wall is implemented on the ECM [2]. Approximation of differential equations is made by the implicit difference scheme of Douglas Ghan's alternating directions. Based on the graphs shown here, the following conclusions can be drawn:

1. With an increase in the time for gaining critical strength, the cost of electricity is reduced by 25-50%, due to the use of thermal inertia of the structural design;
2. The softer thermodynamic characteristics of the controlled heating mode ensure flat heating and hence the quality of the concrete;
3. The mathematical model, executed in the algorithmic language Pascal, allows to vary the production technology of works and winter concrete methods.

Relevance of the article

The influence of ambient temperature on the temperature of internal layers is ambiguous and depends on the insulation capacity of the formwork, the massive structure, the exothermic cement. These factors are also influenced by other factors, i.e. the process of collecting

concrete strength in winter concreting is very complicated.

Research conditions and methods

When considering the hydration processes of minerals of Portland cement in the presence of additives, it was noted that new hydrate phases are formed as a substitute for a hydrate compound occurring under normal conditions. Let's consider the role of new hydrate phases in forming the strength of cement stone. The formation of $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ during the hydration of three-calcium aluminium in solution $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ greatly increases the strength of the samples [3]. The strength of the samples with NaNO_3 is not much different from that of the test samples. Since the formation of calcium hydronitrate requires a significant amount of calcium hydroxide in the system. As a result of the formation of complex calcium aluminium salts, the strength of aluminium containing clinker minerals in the cement hydration is slightly reduced, and the strength of potash and nitritetrium as well as chlorinated salts has slightly remained unchanged.

More significant is the role of new phases formed on the basis of calcium hydroxide - $3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. When hardening in frost, especially in the early stages, their formation leads to an increase in the hydration rate of silicate minerals, due to the lower solubility of these phases compared to $\text{Ca}(\text{OH})_2$. However, hydrochloride and calcium hydrocarbonate are not stable phases. The first one breaks down over time, and the second one breaks down with ambient temperatures. New phases formed instead of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ play a significant role in the formation of the structure of the cement stone, as their breakdown in some cases reduces the strength [4].

Research results

The cooling speed of monolithic structures according to standards is regulated as follows: 15°C/ h at surface module $M_p > 14 \text{ m}^{-1}$, 10°C/h at $M_p = 10-44 \text{ m}^{-1}$, 5°C/ h at $M_p = 5-10 \text{ m}^{-1}$. The general positivity, the rate of rise and cooling during electric heating depends on the required strength of concrete by the time the structure is stripped and is assigned based on the results of experimental data obtained taking into account the type and grade of concrete, the cements used and the specific dimensions of the structure and the environment.

At the early freezing of concrete, which coincides with the first kinetic stage of the hydration process, which ends, from the perspective of Berkovich T.M., with the initial crystallization of hydrate neoplasms, the hydration rate is determined mainly by the chemical velocity of cement minerals with water. Temperature has a significant effect on the rate of the hydration reaction, since as the temperature rises, the number of active molecules increases sharply, and the total kinetic energy of the molecules increases.

The influence of temperature on the kinetics of heterogeneous processes can be described by the Arrhenius equation, the integral expression of which has the form:

$$\ln k = - E/R_* T + B \quad (1)$$

where $\ln k$ - reaction rate constant; E - apparent activity energy;

R - universal gas, constant; T - temperature; B - constant, taking into account the influence of different factors on the speed of reaction.

Studies by Berkovich G.M., and Heyker D.M. and others have shown the applicability of this dependence to diffusion processes as well [5].

Equation (1) is also valid for the insulated condition. Under real-life conditions, due to external and internal heat effects on the hardened concrete, this dependence has a different appearance.

Budnikov P.P., Royak S.M., and others show that as the temperature of the thermal treatment increases, the duration of the induction period of the cement hydration process decreases and the

constant increases in proportion to the reaction rate.

The dissolution of the initial cement minerals and the chemical process of their hydration begin immediately after the cement is closed by water, and they continue under normal conditions for a relatively long time[6].

The second cement hydration period is characterized by the presence of stable, dense casings on the cement grains and by low rates of water diffusion and reverse diffusion of hydrated ions in solution.

The duration of each of these periods varies considerably depending on the environmental conditions. Thus, when the temperature increases, the length of not only the kinetic stage but also the first diffusion period (contact-heterogeneous process) decreases, based on this it can be assumed that electrical heating at an early stage of cement stone hardening will accelerate the onset of the film formation process and shorten the period of intensive hydration. In addition, the density and impermeability of the films on the cement grains will be much higher when the electric heating is forced than in normal, soft heat treatments[7].

Discussion of scientific results

Under these circumstances, it is reasonable to assume that the final degree of hydration of the binder will be slightly lower than in normal heat treatment, despite an increase in the quantity of the initial binder. The effect of intensive electric heating could be more rational if the concrete mixture was previously kept at low positive temperatures, which contributes to a deeper hydration process. Another measure that enhances the effect of intense electrical heating could be repeated vibration to destroy the loose film on the aggregate grains. Aluminium minerals of the Portland cement clinker are usually the first to be hydrated when cement is solidified with water, and in the presence of gypsum they form calcium hydrosulfonal aluminate. This compound is very weak and collapses during mechanical action (re-vibration) and over time, even at normal temperatures.

The application of rapid heating is optimal also from the point of view of thermodynamics of irreversible processes. As it is known, in

accordance with the Le Châtelier principle, cooling contributes to the completeness of heat-emitting processes. The forced electric heating, which is carried out until the maximum exothermic effect appears in the concrete, and the subsequent natural removal of heat during thermostatic conditioning, most combine the thermodynamics and kinetics of the structures of formation of cement stone.

A number of works investigated the production of concrete works in winter in greenhouses. This method is used in concrete-laying of foundations, units of hydraulic structures with covered pits with flat or tented light fences. Thermosets can be structural: volumetric, sectional, floor, local, movable, tented, etc [8].

Recently, in France, Poland, Turkey and other countries, so-called inflatable heaters have been successfully used. Theoretical principles of erection of vertical monolithic constructions using heating pneumocarcane modular decks (HPMD) in winter conditions have been developed. Technological principles for the operation of HPMD in winter vertical fencing.

In Alaska, Finland, and Japan, tarpaulin greenhouses are widely used, the load-bearing frame of which is light aluminum structures [9,10].

Conclusion

The choice of winter concrete method depends on the size and purpose of the design, on the expected winter temperatures, which can vary widely. It is necessary to take into account the properties of the cements used and the presence of heat sources in construction, the modes of production of work, and the provision of appropriate working conditions for workers. When choosing a method of performing work, their comparative economy, ease of performing work operations for laying and maintaining concrete should be taken into account. Of these listed criteria for the selection of winter concreting, part is regulated and part of the criteria is not regulated.

REFERENCES

- 1 Alexandrovsky S.V. Calculation of concrete and reinforced concrete structures for temperature and humidity effects. Moscow, Stroyizdat, 1966, pp. 360–367.
- 2 Brzhanov R.T. Thermodynamic calculations of cement minerals. Collection of works of the international scientific and practical conference "Valikhanov Readings 10" (Kokshetau, 2005), pp. 89–92.
- 3 Brzhanov R.T. Re-vibration as a factor in increasing the strength of concrete. Bulletin of PSU, 2009, no. 1, pp. 25–35.
- 4 Cao H. et al. Investigation of the effect of carbon dioxide curing on the properties of reactive powder concrete with an aggregate of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement // Coatings, 2022, vol. 12, no. 2, 209 p.
- 5 Liu D. et al. Mechanical and strength properties of concrete subjected to early freeze-thaw cycles // Materials and structures, 2021, vol. 54, no. 6, pp. 1–18.
- 6 Brzhanov R.T. Re-vibration as a factor in increasing the strength of concrete. Bulletin of PSU, 2009, no. 1, pp. 25–35.
- 7 Brzhanov R.T. Calculation of the time for concrete to gain critical strength during winter concreting. Vestik EKSTU, 2010, no 2.
- 8 Freeze-thaw damage evaluation and model creation for concrete exposed to freeze–thaw cycles at early-age // Construction and Building Materials, 2021, vol. 312, 125352 p.
- 9 Porras Y., Jones C., Schmiedeke N. Freezing and thawing durability of high early strength Portland cement concrete // Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, vol. 32, no. 5.
- 10 Liu D. et al. Freeze-thaw damage evaluation and model creation for concrete exposed to freeze–thaw cycles at early-age // Construction and Building Materials, 2021, vol. 312, 125352 p.

Information about authors

Brzhanov Rashit Temerzhanovich (corresponding author)

Docent, candidate of Technical Sciences, Professor "Construction inginiring". NAO Caspian State University of Technology and Engineering, 32 microdikst, 130000, Aktau, Kazakhstan

ORCID: 0000-0001-8755-8207

E-mail: brzhanov@mail.ru

Sadueva Gulmira Khudaibergenovna

Candidate of Technical Sciences, assistant professor "oil and gas engineering" . NAO Caspian State University of Technology and Engineering, 32 microdikst, 130000, Aktau, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-7691-4125

E-mail: gulmira.sadueva@mail.ru

Kurbanmagomedov Arslan Kurbanmagomedovich

PhD, senior lecturer Mathematical Institute named after Nikolsky S.M. Russian Peoples' Friendship University, 101000, Moscow, Russia

ORCID ID: 0000-0001-9158-0378

E-mail: akprepod@gmail.com

Shaikhiyeva Kulanda Maktapovna

Senior lecturer, MBA Master, NAO Caspian State University of Technology and Engineering, 32 microdikst 130000, Aktau, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-4556-1149

E-mail: kulanda.shaikhiyeva@yu.edu.kz

Авторлар туралы мәліметтер

Бржанов Рашит Темержанович (корреспонденция авторы)

Доцент, т.ғ.к., «Құрылыс инжиниринг» кафедрасының профессоры, КЕАҚ Ш.Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті, 32-ші шағынаудан, 130000, Ақтау қ., Қазақстан Республикасы.

ORCID - 0000-0001-8755-8207.

E-mail: brzhanov@mail.ru

Садуаева Гульмира Худайбергеновна

Т.ғ.к., «Мұнайхимия инжиниринг» кафедрасының доценті. КЕАҚ Ш.Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті, 32-ші шағынаудан, 130000, Ақтау қ., Қазақстан Республикасы

ORCID ID: 0000-0002-7691-4125

E-mail: gulmira.sadueva@mail.ru

Курбанмагомедов Арслан Курбанмагомедович

PhD, Никольский С.М. атындағы математика институтының аға оқытушысы, Ресей халықтар достығы университеті, 101000, Мәскеу, Ресей Федерациясы

ORCID ID: 0000-0001-9158-0378

E-mail: integralferma@gmail.com

Шайхиева Күлэнда Мақтаповна

«Құрылыс инжиниринг» кафедрасының аға оқытушысы, MBA магистрі, КЕАҚ Ш.Есенов

атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті, 32-ші шағынаудан, 130000, Ақтау қ., Қазақстан Республикасы

ORCID ID: 0000-0002-4556-1149

E-mail: kulanda.shaikhiyeva@yu.edu.kz

Сведения об авторах

Бржанов Рашит Темержанович (автор для корреспонденции)

Доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры «Строительный инжиниринг» НАО «Каспийский государственный университет технологии и инжиниринга им. Ш. Есенова», 32-й мкр, 130000, г. Ақтау, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-8755-8207

E-mail: brzhanov@mail.ru

Садуева Гульмира Худайбергеновна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтехимический инжиниринг» НАО «Каспийский государственный университет технологии и инжиниринга им. Ш. Есенова», 32-й мкр, 130000, г. Ақтау, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-7691-4125

E-mail: gulmira.sadueva@mail.ru

Курбанмагомедов Арслан Курбанмагомедович

Кандидат ф.-м.н., старший преподаватель Математического института им. С.М. Никольского Российский университет дружбы народов, 101000, г. Москва, Россия

ORCID ID: 0000-0001-9158-0378

E-mail: integralferma@gmail.com

Шайхиева Куланда Мактаповна

Магистр MBA, старший преподаватель кафедры «Строительный инжиниринг» НАО «Каспийский государственный университет технологии и инжиниринга им. Ш. Есенова», 32-й мкр, 130000, г. Ақтау, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-4556-1149

E-mail: kulanda.shaikhiyeva@yu.edu.kz

UDC 510.67
IRSTI 27.03.66<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-2-20-28>ON (p, q) -SPLITTING FORMULAS IN ALMOST OMEGA-CATEGORICAL
WEAKLY O-MINIMAL THEORIESIZBASAROV A.A.¹, KULPESHOV B.SH.¹, EMEL'YANOV D.YU.²¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan²Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia

Abstract. The present paper concerns the notion of weak o-minimality introduced by M. Dickmann and originally studied by D. Macpherson, D. Marker, and C. Steinhorn. Weak o-minimality is a generalization of the notion of o-minimality introduced by A. Pillay and C. Steinhorn in series of joint papers. As is known, the ordered field of real numbers is an example of an o-minimal structure. We continue studying properties of almost omega-categorical weakly o-minimal theories. Almost omega-categoricity is a notion generalizing the notion of omega-categoricity. Recently, a criterion for binarity of almost omega-categorical weakly o-minimal theories in terms of convexity rank has been obtained. Binary convexity rank is the convexity rank in which parametrically definable equivalence relations are replaced by $\emptyset$ -definable equivalence relations. (p, q) -splitting formulas express a connection between non-weakly orthogonal non-algebraic 1-types in weakly o-minimal theories. In many cases, the binary convexity ranks of non-weakly orthogonal non-algebraic 1-types are not equal. The main result of this paper is finding necessary and sufficient conditions for equality of the binary convexity ranks for non-weakly orthogonal non-algebraic 1-types in almost omega-categorical weakly o-minimal theories in terms of (p, q) -splitting formulas.

Keywords: weak o-minimality, almost omega-categoricity, (p, q) -splitting formula, convexity rank, weak orthogonality, equivalence relation.

ДЕРЛІК ОМЕГА-КАТЕГОРИЯЛЫҚ ӘЛСІЗ О-МИНИМАЛДЫ
ТЕОРИЯЛАРЫНДА (p, q) -СЕКТОРЛАР ТУРАЛЫІЗБАСАРОВ А.А.¹, КУЛПЕШОВ Б.Ш.¹, ЕМЕЛЬЯНОВ Д.Ю.²¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан²Новосібір мемлекеттік техникалық университеті, 630073, Новосибирск қ., Ресей

Аңдатпа. Бұл жұмыс М. Дикманн енгізген және бастапқыда Д. Макферсон, Д. Маркер және Ч. Стейнхорн зерттеген әлсіз о-минималдылық түсінігіне қатысты. Әлсіз о-минималдылық – бұл А. Пиллай мен Ч. Стейнхорнның бірлескен мақалалар сериясында енгізген о-минималдылығы ұғымының жалпылауы. Белгілі болғандай, нақты сандардың реттелген өрісі о-минималды құрылымның алгебралық мысалы болып табылады. Біз дерлік омега категориялық әлсіз о-минималды теориялардың қасиеттерін зерттеуді жалғастырамыз. Омега-категориялық дерлік – бұл омега категориялық түсінігін жалпылайтын ұғым. Жақында дөңестік рангісі бойынша дерлік омега категориялық әлсіз о-минималды

теориялардың бинарлық критерийі алынды. Бинарлық дөңестік рангісі – параметрлік анықталатын эквиваленттік қатынастар бос жиынмен анықталатын эквиваленттік қатынастармен ауыстырылатын дөңестік рангісі. (p, q) -бөлу формулалары әлсіз o -минималды теориялардағы әлсіз ортогональды алгебралық емес 1 -түрлер арасындағы байланысты білдіреді. Көптеген жағдайларда әлсіз емес ортогональды алгебралық емес 1 -түрлердің бинарлық дөңестік рангілері тең емес. Бұл жұмыстың негізгі нәтижесі (p, q) -бөлу формулалары тұрғысынан дерлік ω -категориялық әлсіз o -минималды теориялардағы әлсіз ортогональды алгебралық емес 1 -түрлері үшін екілік дөңес рангтарының теңдігі үшін қажетті және жеткілікті шарттарды табу болып табылады.

Түйінді сөздер: әлсіз o -минималдылық, дерлік ω -категориялық, (p, q) -бөлу формуласы, дөңестік ранг, әлсіз ортогональдық, эквиваленттік қатынас.

О (p, q) -СЕКАТОРАХ В ПОЧТИ ОМЕГА-КАТЕГОРИЧНЫХ СЛАБО O -МИНИМАЛЬНЫХ ТЕОРИЯХ

ИЗБАСАРОВ А.А.¹, КУЛПЕШОВ Б.Ш.¹, ЕМЕЛЬЯНОВ Д.Ю.²

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

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Настоящая статья касается понятия слабой o -минимальности, введенного М. Дикманном и первоначально исследованного Д. Макферсоном, Д. Маркером и Ч. Стейнхорном. Слабая o -минимальность является обобщением понятия o -минимальности, введенного А. Пиллэем и Ч. Стейнхорном в серии совместных статей. Как известно, упорядоченное поле вещественных чисел является примером o -минимальной структуры. Мы продолжаем изучение свойств почти ω -категоричных слабо o -минимальных теорий. Почти ω -категоричность – это понятие, обобщающее понятие ω -категоричности. Недавно был получен критерий бинарности почти ω -категоричных слабо o -минимальных теорий в терминах ранга выпуклости. Бинарный ранг выпуклости – это ранг выпуклости, в котором параметрически определяемые отношения эквивалентности заменяются пусто-определимыми отношениями эквивалентности. (p, q) -секаторы выражают связь между не слабо ортогональными неалгебраическими 1 -типами в слабо o -минимальных теориях. В большинстве случаев бинарные ранги выпуклости не слабо ортогональных неалгебраических 1 -типов не совпадают. Основным результатом данной статьи является нахождение необходимых и достаточных условий равенства бинарных рангов выпуклости для не слабо ортогональных неалгебраических 1 -типов в почти ω -категоричных слабо o -минимальных теориях в терминах (p, q) -секаторов.

Ключевые слова: слабая o -минимальность, почти ω -категоричность, (p, q) -секатор, ранг выпуклости, слабая ортогональность, отношение эквивалентности.

Preliminaries

Let L be a countable first-order language. Throughout this paper we consider L -structures and suppose that L contains a binary relation symbol $<$ which is interpreted as a linear order in

these structures. A subset A of a linearly ordered structure M is convex if for all $\alpha, b \in A$ and $c \in M$ whenever $\alpha < c < b$ we have $c \in A$. This paper concerns the notion of *weak o -minimality* that was initially deeply studied by D. Macpherson,

D. Marker, and C. Steinhorn in [1]. A *weakly o-minimal structure* is a linearly ordered structure $M = \langle M, <, \dots \rangle$ such that any definable (with parameters) subset of M is a union of finitely many convex sets in M . We recall that such a structure M is said to be *o-minimal* if any definable (with parameters) subset of M is a union of finitely many intervals and points in M . Thus, weak o-minimality generalizes the notion of o-minimality. Real closed fields with a proper convex valuation ring provide an important example of weakly o-minimal (not o-minimal) structures [2, 3].

Let A and B be arbitrary subsets of a linearly ordered structure M . Then the expression $A < B$ means that $a < b$ whenever $a \in A$ and $b \in B$, and $A < b$ means that $A < \{b\}$. For a subset A of M we introduce the following notations: $A^+ := \{b \in M \mid A < b\}$ and $A^- := \{b \in M \mid b < A\}$. For an arbitrary one-type p we denote by $p(M)$ the set of realizations of p in M . If $B \subseteq M$ and E is an equivalence relation on M then we denote by B/E the set of equivalence classes (E -classes) which have representatives in B . If f is a function on M , then we denote by (f) the domain of M . A theory T is said to be *binary* if every formula of f is equivalent in T to a Boolean combination of formulas with at most two free variables.

Further throughout the paper we consider an arbitrary complete theory T (if unless otherwise stated), where M is a sufficiently saturated model of T .

Definition 1.1 Let T be a weakly o-minimal theory, $M \models T$, $A \subseteq M$, $p, q \in S_1(A)$ be non-algebraic. We say that p is not weakly orthogonal to q (denoting this by $p \not\perp^w q$) if there exist an L_A -formula $H(x, y)$, $\alpha \in p(M)$ and $\beta_1, \beta_2 \in q(M)$ such that $\beta_1 \in H(M, \alpha)$ and $\beta_2 \notin H(M, \alpha)$.

In other words, p is weakly orthogonal to q (denoting this by $p \perp^w q$) if $p(x) \cup q(y)$ has a unique extension to a complete 2-type over A .

Lemma 1.2 [4] Let T be a weakly o-minimal theory, $M \models T$, $A \subseteq M$. Then the relation of non-weak orthogonality is an equivalence relation on $S_f(A)$.

The definition of convexity rank for a set was introduced in [5].

Definition 1.3 Let T be a weakly o-minimal theory, M be a sufficiently saturated model of the theory T , $A \subseteq M$. The convexity rank of the set A ($RC(A)$) is defined as follows:

1) $RC(A) = -1$ if $A = \emptyset$.

2) $RC(A) = 0$ if A is finite and non-empty.

3) $RC(A) \geq 1$ if A is infinite.

4) $RC(A) \geq \alpha + 1$ if there exists a parametrically definable equivalence relation $E(x, y)$ such that there are $b_i \in A$, $i \in \omega$, which satisfy the following:

- For any $i, j \in \omega$, whenever $i \neq j$ we have $M \models \neg E(b_i, b_j)$;

- For every $i \in \omega$ $RC(E(M, b_i)) \geq \alpha$ and $E(M, b_i)$ is a convex subset of A .

5) $RC(A) \geq \delta$ if $RC(A) \geq \alpha$ for all $\alpha < \delta$ (δ is limit).

If $RC(A) = \alpha$ for some α , we say that $RC(A)$ is defined. Otherwise (i.e. if $RC(A) \geq \alpha$ for all α), we put $RC(A) = \infty$.

The rank of convexity of a formula $\varphi(x, \bar{a})$, where $\bar{a} \in M$, is defined as the rank of convexity of the set $\varphi(M, \bar{a})$. The rank of convexity of a 1-type p is defined as the rank of convexity of the set $p(M)$, i.e., $RC(p) := RC(p(M))$. In particular, a theory has convexity rank 1 if there are no definable (with parameters) equivalence relations with infinitely many infinite convex classes.

We say that the convexity rank of an arbitrary set A is binary and denote it by $RC_{bin}(A)$ if parametrically definable equivalence relations are replaced by $\emptyset$ -definable (i.e., binary) equivalence relations.

Definition 1.4 [6, 7] Let T be a complete theory, and $p_1(x_1), \dots, p_n(x_n) \in S_1(\emptyset)$. A type $q(x_1, \dots, x_n) \in S_n(\emptyset)$ is said to be a $(p_1, \dots, p_n)$ -type if

$$q(x_1, \dots, x_n) \supseteq p_1(x_1) \cup \dots \cup p_n(x_n).$$

The set of all $(p_1, \dots, p_n)$ -types of the theory T is denoted by $S_{p_1, \dots, p_n}(T)$. A countable theory T is said to be almost ω -categorical if for any types $p_1(x_1), \dots, p_n(x_n) \in S_1(\emptyset)$ there are only finitely many types $q(x_1, \dots, x_n) \in S_{p_1, \dots, p_n}(T)$.

Almost omega-categoricity is closely connected with the notion of Ehrenfeuchtness of a theory. So, in [6] it was proved that if T

is an almost omega-categorical theory with $I(T, \omega) = 3$ then a dense linear order is interpreted in T . Nonetheless there exists an example (constructed by M.G. Peretyat'kin in [8]) of a theory with the condition $I(T, \omega) = 3$ that is not almost omega-categorical.

In [9] the authors established almost omega-categoricity of Ehrenfeucht quite o-minimal theories and that the Exchange Principle for algebraic closure holds in almost omega-categorical quite o-minimal theories. Recently in [10], orthogonality of any family of pairwise weakly orthogonal non-algebraic 1-types over $\emptyset$ for such theories and binarity of almost omega-categorical quite o-minimal theories were proved. Also, in [11], binarity of almost omega-categorical weakly o-minimal theories of convexity rank 1 was established. At last, in the work [12], a criterion for binarity of almost omega-categorical weakly o-minimal theories in terms of convexity rank was found.

Theorem 1.5 [10] Let T be an almost omega-categorical weakly o-minimal theory, $p \in S_1(\emptyset)$ be non-algebraic. Then $RC_{bin}(p) < \omega$.

Recall some notions originally introduced in [1]. Let $Y \subset M^{n+1}$ be an $\emptyset$ -definable subset, let $\pi: M^{n+1} \rightarrow M^n$ be the projection which drops the last coordinate, and let $Z := \pi(Y)$. For each $\bar{a} \in Z$ let $Y_{\bar{a}} := \{y : (\bar{a}, y) \in Y\}$. Suppose that for every $\bar{a} \in Z$ the set $Y_{\bar{a}}$ is convex and bounded above but does not have a supremum in M . We let $\sim$ be the $\emptyset$ -definable equivalence relation on M^n given by

$$\begin{aligned} \bar{a} \sim \bar{b} & \text{ for all } \bar{a}, \bar{b} \in M^n \setminus Z, \text{ and} \\ \bar{a} \sim \bar{b} & \Leftrightarrow \sup Y_{\bar{a}} = \sup Y_{\bar{b}} \text{ if } \bar{a}, \bar{b} \in Z. \end{aligned}$$

Let $\bar{Z} := Z/\sim$, and for each tuple $\bar{a} \in Z$ we denote by $[\bar{a}]$ the $\sim$ -class of $\bar{a}$. There is a natural $\emptyset$ -definable total order on $M \cup \bar{Z}$, defined as follows. Let $\bar{a} \in Z$ and $c \in M$. Then $\bar{a} < c$ if and only if $c < w$ for all $w \in Y_{\bar{a}}$. Also, we say $c < [\bar{a}]$ iff $\neg([\bar{a}] < c)$, i.e. there exists $w \in Y_{\bar{a}}$ such that $c \leq w$. If $\bar{a}$ is not $\sim$ -equivalent to $\bar{b}$ then there is some $x \in M$ such that $[\bar{a}] < x < [\bar{b}]$ or $[\bar{b}] < x < \bar{a}$, and so $<$ induces a total order on $M \cup \bar{Z}$. We call such a set $\bar{Z}$ a sort (in this case, $\emptyset$ -definable sort) in $\bar{M}$, where $\bar{M}$ is the Dedekind completion of M , and view $\bar{Z}$ as naturally embedded in $\bar{M}$. Similarly, we can

obtain a sort in $\bar{M}$ by considering infima instead of suprema.

Thus, we will consider definable functions from M to its Dedekind completion $\bar{M}$, more precisely in definable sorts of the structure $\bar{M}$, representing infima or suprema of definable sets.

Let $A, D \subseteq M$, D be infinite, $Z \subseteq \bar{M}$ be an A -definable sort and $f: D \rightarrow Z$ be an A -definable function. We say f is locally increasing (locally decreasing, locally constant) on D if for any element $a \in D$ there is an infinite interval $J \subseteq D$ containing $\{a\}$ so that f is strictly increasing (strictly decreasing, constant) on J ; we also say f is locally monotonic on D if it is locally increasing or locally decreasing on D .

Let f be an A -definable function on $D \subseteq M$, E be an A -definable equivalence relation on D . We say f is strictly increasing (decreasing) on D/E if for any $a, b \in D$ with $a < b$ and $\neg E(a, b)$ we have $f(a) < f(b)$ ($f(a) > f(b)$).

Proposition 1.6 [13] Let M be a weakly o-minimal structure, $A \subseteq M$, $p \in S_1(A)$ be a non-algebraic type. Then any A -definable function of which the domain contains the set $p(M)$ is locally monotonic or locally constant on $p(M)$.

Definition 1.7 [14] Let T be a weakly o-minimal theory, $M \models T$, $A \subseteq M$, $p \in S_1(A)$ be non-algebraic.

(1) An L_A -formula $F(x, y)$ is said to be p -preserving (or p -stable) if there exist elements $\alpha, \gamma_1, \gamma_2 \in p(M)$ such that

$$\begin{aligned} [F(M, \alpha) \setminus \{\alpha\}] \cap p(M) & \neq \emptyset \text{ and} \\ \gamma_1 & < F(M, \alpha) \cap p(M) < \gamma_2. \end{aligned}$$

(2) A p -preserving formula $F(x, y)$ is said to be convex-to-right (left) if there exists an element $\alpha \in p(M)$ such that $F(M, \alpha) \cap p(M)$ is convex, α is the left (right) endpoint of the set $p(M)$ and $\alpha \in F(M, \alpha)$.

Definition 1.8 [15] Let $F(x, y)$ be a p -preserving convex-to-right (left) formula. We say that $F(x, y)$ is said to be equivalence-generating if for any $\alpha, \beta \in p(M)$ such that $M \models F(\beta, \alpha)$ the following holds:

$$\begin{aligned} M & \models \forall x [x \geq \beta \rightarrow [F(x, \alpha) \leftrightarrow F(x, \beta)]] \\ (\text{resp. } M & \models \forall x [x \leq \beta \rightarrow [F(x, \alpha) \leftrightarrow F(x, \beta)]]). \end{aligned}$$

Lemma 1.9 [15] Let T be a weakly o-minimal theory, $M \models T$, $A \subseteq M$, $p \in S_1(A)$ be non-algebraic. Suppose that $F(x, y)$ is a p -preserving convex-to-right (left) formula that is also equivalence-generating. Then

(1) $G(x, y) := F(y, x)$ is a p -preserving convex-to-left (right) formula which is also equivalence-generating.

(2) $E(x, y) := F(x, y) \vee F(y, x)$ is an equivalence relation on $p(M)$ partitioning it into infinitely many infinite convex classes.

Proposition 1.10 [10] Let T be an almost omega-categorical weakly o-minimal theory, $p \in S_1(\emptyset)$ be non-algebraic. Then any p -preserving convex-to-right (left) formula is equivalence-generating.

In this work we present a criterion for equality of the binary convexity ranks for non-weakly orthogonal non-algebraic 1-types in almost omega-categorical weakly o-minimal theories.

Results

Recall the notion of a (p, q) -splitting formula introduced in [16] for non-algebraic isolated 1-types. Let $A \subseteq M$, $p, q \in S_1(A)$ be non-algebraic, p is not weakly orthogonal to q . Extending the definition of (p, q) -splitting formula to non-isolated case, we say that an L_A -formula $\varphi(x, y)$ is a (p, q) -splitting formula, if there is $a \in p(M)$ such that

$$\begin{aligned} \varphi(a, M) \cap q(M) &\neq \emptyset, \neg \varphi(a, M) \cap q(M) \neq \emptyset, \\ \varphi(a, M) \cap q(M) &\text{ is convex, and} \\ [\varphi(a, M) \cap q(M)]^- &= [q(M)]^-. \end{aligned}$$

If $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ are (p, q) -splitting formulas then we say that $\varphi_1(x, y)$ is not less than $\varphi_2(x, y)$ if there is $a \in p(M)$ such that $\varphi_1(a, M) \cap q(M) \subseteq \varphi_2(a, M) \cap q(M)$. We say that (p, q) -splitting formulas $\varphi_1(x, y)$ and $\varphi_2(x, y)$ are equivalent ($\varphi_1(x, y) \sim \varphi_2(x, y)$) if $\varphi_1(x, y) \cap q(M) = \varphi_2(x, y) \cap q(M)$ for some (any) $a \in p(M)$.

Obviously, if $p, q \in S_1(A)$ are non-algebraic and p is not weakly orthogonal to q , then there is at least one (p, q) -splitting formula, and the set of all (p, q) -splitting formulas is partitioned into a linearly ordered set of equivalence classes with respect to $\sim$. For every (p, q) -splitting

formula $\varphi(x, y)$ we will consider the function f^φ , where $f^\varphi := \sup \varphi(x, M)$. Also, obviously that for any (p, q) -splitting formula $\varphi(x, y)$ the function f^φ is not constant on $p(M)$.

We will also say [17] that for a (p, q) -splitting formula $\varphi(x, y)$ the set $\text{Range } f^\varphi|_{p(M)}$ is everywhere dense in $q(M^{eq})$ if for any $b_1, b_2 \in q(M)$ with $b_1 < b_2$ there exists $a \in p(M)$ such that $b_1 < f^\varphi(a) < b_2$.

Example 2.1. Let $M = \langle M; <, P_1^1, P_2^1, E^2 \rangle$ be a linearly ordered structure so that M is a disjoint union of interpretations of unary predicates P_1 and P_2 with $P_1(M) < P_2(M)$. We identify the interpretation of P_1 with $\mathbb{Q}$, ordered as usual, and the interpretation of P_2 with $\mathbb{Q} \times \mathbb{Q}$, ordered lexicographically. The relation E is an equivalence relation on $P_2(M)$:

$$E((a_1, a_2), (c_1, c_2)) \Leftrightarrow a_1 = c_1 \text{ for any } (a_1, a_2), (c_1, c_2) \in P_2(M)$$

The relation R is defined as follows:

$$R(a, (b_1, b_2)) \Leftrightarrow b_1 \leq a \text{ for any } a \in P_1(M), (b_1, b_2) \in P_2(M).$$

It is not difficult to establish that M is a countably categorical weakly o-minimal structure. Let $p := \{P_1(x)\}$, $q := \{P_2(x)\}$. Obviously, p and q determine complete types over $\emptyset$, p is not weakly orthogonal to q , $RC(p) = 1$, $RC(q) = 2$ and $R(x, y)$ is a (p, q) -splitting formula. The function f^R is strictly increasing on $p(M)$, and the set $\text{Range } f^R|_{p(M)}$ is not everywhere dense in $q(M^{eq})$.

Theorem 2.2 Let T be an almost omega-categorical weakly o-minimal theory, M be a sufficiently saturated model of T , $p, q \in S_1(\emptyset)$ be non-algebraic, p is not weakly orthogonal to q . Suppose that there exists an $\emptyset$ -definable equivalence relation $E(x, y)$ partitioning $p(M)$ into infinitely many infinite convex classes. Then the following conditions are equivalent:

- (1) $RC_{bin}(p) = RC_{bin}(q) + RC_{bin}(E(a, M))$ for some (any) $a \in p(M)$;
- (2) $RC_{bin}(p) > RC_{bin}(q)$;
- (3) for any (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ there exists an $\emptyset$ -definable equivalence relation $E'(x, y)$ partitioning $p(M)$ into infinitely many infinite convex classes so that f^R is constant

on each E' -class and the set $\text{Range } f^R_{p(M)}$ is everywhere dense in $q(M^{eq})$;

(4) for any (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ the function f^R is constant on each E -class, the set $\text{Range } f^R_{p(M)}$ is everywhere dense in $q(M^{eq})$, and $E'(x, y)$ is maximal with this property.

Proof of Theorem 2.2. Let for a definiteness $RC_{bin}(p) = n$. Then there exist $\emptyset$ -definable equivalence relations $E_1(x, y), \dots, E_{n-1}(x, y)$ partitioning $p(M)$ into infinitely many infinite convex classes so that $E_1(a, M) \subset \dots \subset E_{n-1}(a, M)$ for some (any) $a \in p(M)$. Obviously, by the hypotheses of the theorem $n \geq 2$.

(1) $\Rightarrow$ (2). Obviously, since each E -class is infinite, i.e. $RC_{bin}(E(a, M)) \geq 1$.

(2) $\Rightarrow$ (3). Suppose that $RC_{bin}(p) > RC_{bin}(q)$. Assume the contrary: there exists a (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ such that for any $\emptyset$ -definable equivalence relation $E'(x, y)$ partitioning $p(M)$ into infinitely many infinite convex classes $f^R(x) := \sup R(x, M)$ is not constant on each E' -class. Then f^R is not constant on each E_i -class. But then f^R must be strictly monotonic (strictly increasing or strictly decreasing) on each E_i -class. Indeed, f^R can not be locally monotonic (non-strictly monotonic) on each E_i -class, since otherwise an $\emptyset$ -definable equivalence relation $E_0(x, y)$ partitioning $p(M)$ into infinitely many infinite convex classes is appeared, so that $E_0(a, M) \subset E_1(a, M)$ for some (any) $a \in p(M)$ which contradicts the hypothesis that $E_1(x, y)$ is minimal among $\emptyset$ -definable non-trivial equivalence relations on $p(M)$. Thus, f^R is strictly monotonic on each E_i -class. If the set $\text{Range } f^R_{p(M)}$ is not everywhere dense in $q(M^{eq})$, then there exist $b_1, b_2 \in q(M)$ such that $b_1 < b_2$ and for any $a \in p(M)$ either $f^R(a) \leq b_1$ or $b_2 \leq f^R(a)$. If f^R is strictly increasing on each E_i -class, then consider the following formula:

$$S(x, b_1) := b_1 \leq x \wedge \exists u [f^R(u) \leq b_1 \wedge \forall t (u < t \wedge E_1(u, t) \rightarrow x < f^R(t))]$$

If f^R is strictly decreasing on each E_i -class, then consider the following formula:

$$S(x, b_1) := b_1 \leq x \wedge \exists u [f^R(u) \leq b_1 \wedge \forall t (t < u \wedge E_1(u, t) \rightarrow x < f^R(t))].$$

It not difficult to see that $S(x, y)$ is a q -preserving convex-to-right formula. Then by almost omega-categoricity of T it must be equivalence-generating, whence we also have a contradiction with the fact that $E_1(x, y)$ is minimal among $\emptyset$ -definable non-trivial equivalence relations on $p(M)$.

Further we consider the behaviour of the function f^R on each $E_2(a, M)/E_1$, where $a \in p(M)$. It must be strictly monotonic on each $E_2(a, M)/E_1$ and $\text{Range } f^R_{p(M)}$ must be everywhere dense in $q(M^{eq})$, since otherwise an $\emptyset$ -definable equivalence relation $E''(x, y)$ is appeared with the property $E_1(a, M) \subset E''(a, M) \subset E_2(a, M)$ which contradicts the fact that E_2 is an immediate successor of E_1 among all $\emptyset$ -definable equivalence relations on $p(M)$. Similarly, it can be proved that f^R is strictly monotonic on each $E_{k+1}(a, M)/E_k$, where $1 \leq k \leq n-2$ and f^R is strictly monotonic on $p(M)/E_{n-1}$.

Consider the following formulas:

$$E'_1(x, y) := [x \leq y \rightarrow \exists t_1 \exists t_2 (E_1(t_1, t_2) \wedge f(t_1) < \leq x \leq y < f(t_2))] \wedge [x > y \rightarrow \exists t_1 \exists t_2 (E_1(t_1, t_2) \wedge \wedge f(t_1) < y < x < f(t_2))]$$

... ..

$$E'_{n-1}(x, y) := [x \leq y \rightarrow \exists t_1 \exists t_2 (E_{n-1}(t_1, t_2) \wedge < f(t_2))] \wedge [x > y \rightarrow \exists t_1 \exists t_2 (E_{n-1}(t_1, t_2) \wedge \wedge f(t_1) < y < x < f(t_2))]$$

One can understand that $E'_1(x, y), \dots, E'_{n-1}(x, y)$ are equivalence relations partitioning $q(M)$ into infinitely many infinite convex classes and $E'_1(b, M) \subset \dots \subset E'_{n-1}(b, M)$, whence we have $RC_{bin}(q) \geq n$ which contradicts our assumption.

(3) $\Rightarrow$ (4). By Theorem 1.5 there exist only finitely many $\emptyset$ -definable equivalence relations partitioning $q(M)$ into infinitely many infinite convex classes. Therefore, there exists a maximal $\emptyset$ -definable equivalence relation with this property.

(4) $\Rightarrow$ (1). Let for any (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ the function $f^R(x) := \sup R(x, M)$ is constant on each E -class. Clearly,

$$RC_{bin}(p) = RC_{bin}(q) + RC_{bin}(E(a, M)).$$

for some (any) $a \in p(M)$

Obviously, $E(x, y) \equiv E_i(x, y)$ for some $1 \leq i \leq n - 1$. Then $RC_{bin}(E(a, M)) = i$ for any $a \in p(M)$. Fix an arbitrary (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ and consider the behaviour of the function f^R on each $E_{i+1}(a, M)/E_i$,

where $a \in p(M)$. The function f^R can not be constant on each $E_{i+1}(a, M)/E_i$, since otherwise f^R is constant on each E_{i+1} -class which contradicts maximality of $E_i(x, y)$ with this property. Consequently, f^R must be strictly monotonic on each $E_{i+1}(a, M)/E_i$, since otherwise if it is locally monotonic (non-strictly monotonic) on each $E_{i+1}(a, M)/E_i$, then an $\emptyset$ -definable equivalence relation $E''(x, y)$ is appeared with the property that $E_i(a, M) \subset E''(a, M) \subset E_{i+1}(a, M)$ which contradicts the fact that E_{i+1} is an immediate successor of $E_i(x, y)$ among all $\emptyset$ -definable equivalence relations on $p(M)$. Similarly, we can prove that the function f^R is strictly monotonic on each $E_{k+1}(a, M)/E_k$, where $i \leq k \leq n - 2$ and f^R is strictly monotonic on $p(M)/E_{n-1}$.

Consider the following formulas:

$$\begin{aligned} E'_{i+1}(x, y) &:= \exists t_1 \exists t_2 [E_{i+1}(t_1, t_2) \wedge \\ &\wedge f(t_1) < x < f(t_2) \wedge f(t_1) < y < f(t_2)] \\ &\dots \dots \dots \\ E'_{n-1}(x, y) &:= \exists t_1 \exists t_2 [E_{n-1}(t_1, t_2) \wedge \\ &\wedge f(t_1) < x < f(t_2) \wedge f(t_1) < y < f(t_2)] \end{aligned}$$

Then it can be established that $E'_{i+1}(x, y), \dots, E'_{n-1}(x, y)$ are equivalence relations partitioning $q(M)$ into infinitely many infinite convex classes so that $E'_{i+1}(b, M) \subset \dots \subset E'_{n-1}(b, M)$, whence $RC_{bin}(q) \geq n - i$.

Further, if there exists an $\emptyset$ -definable equivalence relation $E^q(x, y)$ partitioning $q(M)$ into

infinitely many infinite convex classes with the property $E^q(b, M) \subset E'_{i+1}(b, M)$, then consider the following formula:

$$\begin{aligned} E^*(x, y) &:= \exists t_1 \exists t_2 [E^q(t_1, t_2) \wedge \\ &\wedge f(x) < t_1 < f(y) \wedge f(x) < t_2 < f(y)] \end{aligned}$$

Obviously, $E_i(a, M) \subset E^*(a, M) \subset E_{i+1}(a, M)$ which also contradicts the fact that E_{i+1} is an immediate successor of E_i among all $\emptyset$ -definable equivalence relations on $p(M)$. Similarly, we can prove that there is no $\emptyset$ -definable equivalence relation $E^q(x, y)$ partitioning $q(M)$ into infinitely many infinite convex classes so that $E'_k(b, M) \subset E^q(b, M) \subset \subset E'_{k+1}(b, M)$ for any k with $i + 1 \leq k \leq n - 2$ or $E'_{n-1}(b, M) \subset E^q(b, M)$.

Thus, $RC_{bin}(q) = n - i$, i.e.,

$$RC_{bin}(p) = RC_{bin}(q) + RC_{bin}(E(a, M)).$$

Corollary 2.3. Let T be an almost omega-categorical weakly o-minimal theory, $p, q \in S_1(\emptyset)$ be non-algebraic, p is not weakly orthogonal to q . Then the following conditions are equivalent:

- (1) $RC_{bin}(p) = RC_{bin}(q)$;
- (2) there exists a (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ such that $\text{Range } f^R_{p(M)}$ is everywhere dense in $q(M^{eq})$ and for any $\emptyset$ -definable equivalence relation $E(x, y)$ partitioning $p(M)$ into infinitely many infinite convex classes the function f^R is not constant on each E -class;
- (3) there exists a (p, q) -splitting formula $R(x, y)$ such that $\text{Range } f^R_{p(M)}$ is everywhere dense in $q(M^{eq})$ and the function f^R is locally monotonic (not locally constant) on $p(M)$.

Acknowledgements. This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP08855544).

REFERENCES

- 1 Macpherson H.D., Marker D. and Steinhorn C. Weakly o-minimal structures and real closed fields // Transactions of The American Mathematical Society, vol. 352, issue 12, 2000, pp. 5435–5483.
- 2 Dickmann M. Elimination of quantifiers for ordered valuation rings // The Journal of Symbolic Logic, vol. 52, 1987, pp. 116–128.
- 3 L. van den Dries, Lewenberg A.H. T-convexity and tame extensions // The Journal of Symbolic Logic, vol. 60, issue 1, 1995, pp. 74–102.

- 4 Baizhanov B.S. Expansion of a model of a weakly o-minimal theory by a family of unary predicates // *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 66, issue 3, 2001, pp. 1382–1414.
- 5 Kulpeshov B.Sh. Weakly o-minimal structures and some of their properties // *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 63, issue 4, 1998, pp. 1511–1528.
- 6 Ikeda K., Pillay A., Tsuboi A. On theories having three countable models // *Mathematical Logic Quarterly*, vol. 44, issue 2, 1998, pp. 161–166.
- 7 Sudoplatov S.V. Classification of countable models of complete theories. Part 1. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ. House, 2018, ISBN 978-5-7782-3527-4, 326 p.
- 8 Peretyat'kin M.G. A theory with three countable models // *Algebra and Logic*, vol. 19, issue 2, 1980, pp. 139–147.
- 9 Kulpeshov B.Sh., Sudoplatov S.V. Linearly ordered theories which are nearly countably categorical // *Mathematical Notes*, vol. 101, issue 3, 2017, pp. 475–483.
- 10 Altayeva A.B., Kulpeshov B.Sh. Binariness of almost omega-categorical quite o-minimal theories // *Siberian Mathematical Journal*, vol. 61, issue 3, 2020, pp. 379–390.
- 11 Kulpeshov B.Sh., Mustafin T.S. Almost omega-categorical weakly o-minimal theories of convexity rank 1 // *Siberian Mathematical Journal*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 52–65.
- 12 Kulpeshov B.Sh. A criterion for binarity of almost omega-categorical weakly o-minimal theories // *Siberian Mathematical Journal*, vol. 62, no. 6, 2021, pp. 1063–1075.
- 13 Kulpeshov B.Sh. Countably categorical quite o-minimal theories // *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 188, issue 4 (2013), pp. 387–397.
- 14 Baizhanov B.S. Orthogonality of one-types in weakly o-minimal theories // *Algebra and Model Theory II* (A. G. Pinus and K. N. Ponomaryov, editors), Novosibirsk State Technical University, 1999, pp. 3–28.
- 15 Baizhanov B.S., Kulpeshov B.Sh. On behaviour of 2-formulas in weakly o-minimal theories // *Mathematical Logic in Asia, Proceedings of the 9th Asian Logic Conference* (editors S. Goncharov, R. Downey, H. Ono), Singapore, World Scientific, 2006, pp. 31–40.
- 16 Kulpeshov B.Sh. Criterion for binarity of ω -categorical weakly o-minimal theories // *Annals of Pure and Applied Logic*, vol. 45, issue 2, 2007, pp. 354–367.
- 17 Altayeva A.B., Kulpeshov B.Sh., Sudoplatov S.V. Algebras of distributions of binary isolating formulas for almost omega-categorical weakly o-minimal theories // *Algebra and Logic*, vol. 60, no. 4, 2021, pp. 241–262.

Information on the authors

Izbassarov Azamat Abilkairovich

Master Student, School of Mathematics and Cybernetics, Kazakh-British Technical University, Kazakh-British Technical University, 59, Tole bi street, 050000, Almaty, Kazakhstan
 ORCID ID: 0000-0001-7042-8705
 E-mail: az_izbassarov@kbtu.kz

Kulpeshov Beibut Shaiykovich (corresponding author)

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, School of Mathematics and Cybernetics, Kazakh-British Technical University, Kazakh-British Technical University, 59, Tole bi street, 050000, Almaty, Kazakhstan
 ORCID ID: 0000-0002-4242-0463
 E-mail: b.kulpeshov@kbtu.kz

Emelyanov Dmitry Yurevich

Assistant, Novosibirsk State Technical University, K. Marx ave., 20, 630073, Novosibirsk, Russia.

ORCID ID: 0000-0003-4005-6060

E-mail: dima-pavlyk@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Избасаров Азамат Абилкаирович

Магистрант, Математика және кибернетика факультеті, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Толе би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-7042-8705

E-mail: az_izbasarov@kbtu.kz

Кулпешов Бейбут Шайыкович (корреспонденция авторы)

Физика математика ғылымдарының докторы, профессор, Математика және кибернетика факультеті, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Толе би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-4242-0463

E-mail: b.kulpeshov@kbtu.kz

Емельянов Дмитрий Юрьевич

Ассистент, Новосибир мемлекеттік техникалық университеті, К.Маркс даңғылы, 20, 630073, Новосибирск қ., Ресей

ORCID ID: 0000-0003-4005-6060

E-mail: dima-pavlyk@mail.ru

Информация об авторах

Избасаров Азамат Абилкаирович

Магистрант, факультет математики и кибернетики, Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-7042-8705

E-mail: az_izbasarov@kbtu.kz

Кулпешов Бейбут Шайыкович (автор для корреспонденции)

Доктор физико-математических наук, профессор, факультет математики и кибернетики, Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-4242-0463

E-mail: b.kulpeshov@kbtu.kz

Емельянов Дмитрий Юрьевич

Ассистент, Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

ORCID ID: 0000-0003-4005-6060

E-mail: dima-pavlyk@mail.ru

УЛУЧШЕНИЕ ПАССИВИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК SiO_2 , ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА, ПОСЛЕ ХИМИЧЕСКОЙ RCA ОБРАБОТКИ

НУСУПОВ К.Х.¹, БЕЙСЕНХАНОВ Н.Б.¹, СУЛТАНОВ А.Т.¹, ТЫСЧЕНКО И.Е.²,
КУСАЙНОВА А.Ж.¹, БУГЫБАЙ З.К.¹, ЫСКАК К.М.¹

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова», 630390, Новосибирск, Россия

Аннотация. Как известно увеличение эффективности кремниевых солнечных элементов является одной из важнейших задач в современной индустрии альтернативной энергетики. Оптимизация антиотражающего и пассивирующего слоя является наиболее экономичным способом увеличения КПД. В данной работе исследовано влияние предварительной очистки на пассивирующие свойства пленок диоксида кремния (SiO_2), выращенных методом быстрого термического отжига (RTP) при температурах отжига 900 и 950 °C в атмосфере сухого кислорода. Выращивание тонких пленок SiO_2 на поверхности монокристаллических пластин кремния осуществлено в камере французской установки быстрого термического отжига AS-ONE 150. Измерения бесконтактным СВЧ-методом времени жизни неосновных носителей заряда показали, что наилучшая пассивация образцов достигается при применении предварительной трехэтапной химической очистки (RCA) поверхности пластин кремния n-типа. Методом ИК-спектроскопии формирование слоя SiO_2 подтверждается наличием интенсивного максимума при 1071 см^{-1} , что было отнесено к валентным колебаниям типа «растяжение-сжатие». Результаты расчетов оптических констант полученных пленок SiO_2 с использованием спектров отражения и программного обеспечения SCOUT показывают наличие слоя диоксида кремния, у которого показатель преломления и коэффициент экстинкции близки к эталонным.

Ключевые слова: кремний, диоксид кремния, пассивация, быстрый термический отжиг, RCA очистка.

RCA ХИМИЯЛЫҚ ӨНДЕУДЕН КЕЙІН ЖЫЛДАМ ТЕРМИЯЛЫҚ КҮЙДІРУ АРҚЫЛЫ ӨСІРІЛГЕН SiO_2 ҚАБЫРШАҚТАРДЫҢ ПАССИВАЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЖАҚСARTУ

НҮСІПОВ К.Х.¹, БЕЙСЕНХАНОВ Н.Б.¹, СҮЛТАНОВ А.Т.¹, ТЫСЧЕНКО И.Е.²,
ҚҰСАЙЫНОВА А.Ж.¹, БҰҒЫБАЙ З.К.¹, ЫСҚАК К.М.¹

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

²Ғылымның Федералдық мемлекеттік бюджеттік мекемесі А.В. Ржанов атындағы
Жартылай өткізгіштер физикасы институты, 630090, Новосибирск, Ресей

Аңдатпа. Өздеріңіз білетіндей, кремний күн батареяларының тиімділігін арттыру қазіргі заманғы баламалы энергетика индустриясындағы маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Шағылысуға қарсы және пассивтеуші қабатты оңтайландыру ПӘК арттырудың ең бюджеттік әдісі болып

табылады. Бұл жұмыста құрғақ оттегі атмосферасындағы 900 және 950 °C температураларында жылдам термиялық күйдіру (RTP) әдісімен өсірілген кремний диоксиді (SiO_2) қабыршақтарының пассивтеуші қасиеттеріне алдын ала тазартудың әсері зерттелді. Кремнийдің монокристалды тілімдерінің беттерінде SiO_2 жұқа қабыршақтарын өсіру AS-ONE 150 жылдам термиялық күйдіру француз қондырғысының камерасында жүзеге асырылды. Негізгі емес зарядты тасымалдаушылардың өмір сүру уақытын байланыссыз микротолқынды әдіспен өлшеу, үлгілердің ең жақсы пассивациясына иісін кремний тілімінің бетін алдын-ала үш сатылы химиялық тазарту (RCA) көмегімен қол жеткізілетіндігін көрсетті. ИҚ-спектроскопия әдісімен SiO_2 қабатының қалыптасуы 1071 см^{-1} кезінде қарқынды максимумның болуымен расталды, бұл "созылу-сығылу" түріндегі валенттік тербелістерге жатқызылды. Шағылысу спектрлері мен SCOUT бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, алынған SiO_2 қабыршақтарының оптикалық тұрақтыларын есептеу нәтижелері сыну көрсеткіші мен экстинк коэффициенті эталондарға жақын кремний диоксиді қабатының болуын көрсетеді.

Түйінді сөздер: кремний, кремний диоксиді, пассивация, жылдам термиялық күйдіру, үш сатылы химиялық тазарту.

IMPROVEMENT OF THE PASSIVATION PROPERTIES OF SiO_2 FILMS, GROWN BY THE METHOD OF RAPID THERMAL ANNEALING, AFTER CHEMICAL RCA TREATMENT

NUSSUPOV K.KH.¹, BEISENKHANOV N.B.¹, SULTANOV A.T.¹, TYSCHENKO I.E.², KUSAINOVA A.ZH.¹, BUGYBAI Z.K.¹, YSKAK K.M.¹

¹Kazakhstan-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

²Federal State Budgetary Institution of Science A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia

Abstract. As it is known, increasing the efficiency of silicon solar cells is one of the most important tasks in modern alternative energy industry. Optimization of the antireflection and passivation layer is the most economical way to increase efficiency. In this work, the effect of pretreatment on the passivation properties of silicon dioxide (SiO_2) films grown by rapid thermal processing (RTP) at annealing temperatures of 900 and 950°C in a dry oxygen atmosphere, was studied. The growth of thin films of SiO_2 on the surface of monocrystalline silicon wafers was carried out in the AS-ONE 150 rapid thermal annealing chamber (France). Measurements of the lifetime of minority charge carriers by the non-contact microwave method showed that the best passivation of the samples is achieved by applying a preliminary three-stage chemical cleaning (RCA) of the surface of the n-type silicon wafers. IR spectroscopy confirmed the formation of a SiO_2 layer by the presence of an intense maximum at 1071 cm^{-1} , which was attributed to stretching vibrations of the "tension-compression" type. The results of calculations of the optical constants of the obtained SiO_2 films using the reflection spectra and the SCOUT software show the presence of a silicon dioxide whose refractive index and extinction coefficient are close to the reference.

Keywords: silicon, silicon dioxide, passivation, rapid thermal annealing, three-stage chemical purification

Введение

Использование традиционных источников энергии, таких как уголь, нефть и газ, сопровождается рядом серьезных проблем, обусловленных ограниченностью и труднодоступностью природных ресурсов. Более того, их использование сопровождается возраста-

нием негативных последствий парникового эффекта, влияющих на здоровье человека и климат нашей планеты [1]. Поэтому переход значительной части мировой энергетики на возобновляемые источники энергии является лишь вопросом времени. Кремниевые солнечные элементы обладают наибольшим по-

тенциалом для смены традиционных источников энергии. Тем не менее поверхность кремниевого солнечного элемента представляет собой резкий разрыв кристаллической решетки. Это означает, что зонная структура материала нарушается и в запрещенной зоне возникает полуконтинуум энергетических состояний. Эти состояния соответствуют незамкнутым, или так называемым оборванным поверхностным связям [2]. Для достижения высокого КПД солнечных элементов требуется наличие пассивирующего слоя, который значительно увеличивает эффективное время жизни неосновных носителей заряда. Так, например, такие концепции кремниевых солнечных элементов, как Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) [3] и Passivated Emitter Rear Locally-diffused (PERL) [4], которые показывают высокую эффективность ~21-25%, включают в себя пассивирующий слой высокого качества.

Как известно, наиболее эффективным пассивирующим слоем является термически выращенный SiO_2 . N.C. Mandal и соавторы [5] показали, что термически выращенный слой SiO_2 в сравнении с другими методами синтеза оксида кремния обеспечивает максимальное время жизни неосновных носителей заряда в пластинах кремния как p-, так и n-типа. Тем не менее классический метод выращивания SiO_2 в кварцевой печи из-за необходимости длительного поддержания высокой температуры является дорогостоящим и не может конкурировать с более экономичными методами пассивации поверхности. Поэтому большое развитие получили тонкие пленки SiO_2 , выращенные методом быстрого термического окисления (RTO, или RTP), в котором высокие температуры (900–1000 °C) достигаются менее чем за несколько минут. H. Fukuda и соавторы [6] предложили практическую модель для роста ультратонких (< 10 нм) пленок SiO_2 в кинетике быстрого термического окисления. C.P. Liu и соавторы [7] рассмотрели возможность внедрения быстрого термического отжига в существующую линию производства монокристаллических солнечных элементов. В результате внедрение тон-

кого пассивирующего слоя между пластиной кремния и слоем SiN_x позволило увеличить КПД на 0,23%, при этом эффективное время жизни неосновных носителей возросло с 4,84 до 24,33 μs . К.М. Gad и соавторы в работе [8] сравнили пассивирующие свойства пленок SiO_2 , выращенных различными методами. Как показали результаты, ультратонкие пленки диоксида кремния, синтезированные методом быстрого термического отжига, показали наилучшие свойства, в особенности после отжига в формирующем газе N_2 (95%) + H_2 (5%) при температуре 400 °C в течение 20 минут. Таким образом, тонкие пленки SiO_2 , выращенные методом быстрого термического отжига, показали высокий потенциал для пассивации поверхности кремниевой подложки, а относительно низкая стоимость данной методики по сравнению с традиционным отжигом в кварцевой печи позволяет внедрить ее в производство солнечных элементов.

Считается, что предварительная химическая очистка значительно улучшает пассивирующие свойства диэлектрических пленок и увеличивает эффективное время жизни неосновных носителей заряда кремниевых подложек [9]. В данной работе продемонстрировано значительное увеличение времени жизни неосновных носителей заряда в результате трехэтапной RCA очистки поверхности кремниевой подложки перед выращиванием пленок SiO_2 методом быстрого термического отжига.

Экспериментальная часть

Для формирования тонких пассивирующих слоев диоксида кремния были использованы подложки кремния, выращенного методом Чохральского, n- и p-типа с ориентацией (100) и удельным электрическим сопротивлением 0,25 и 22,9 $\Omega \cdot \text{см}$ соответственно. Перед выращиванием пленок SiO_2 была произведена очистка поверхности кремниевых подложек различными способами. Поверхность первой партии образцов была очищена кипячением в этиловом спирте в течение 5 минут. Вторая партия образцов была подвергнута трехэтапной химической очистке RCA [9] в

перекись аммиачном растворе, затем в плавиковой кислоте и растворе $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$. Обработка в перекись аммиачном растворе и смеси гидрохлопероксида производилась при температуре 70°C в течение 10 минут, а травление естественного окисного слоя производилось в плавиковой кислоте и длилось не более 1 минуты при комнатной температуре. Для сравнения были также выращены пленки диоксида кремния на кремниевых подложках, которые не подвергались какой-либо очистке.

неосновных носителей заряда $\tau_{\text{эфф}}$ полученных образцов было измерено на установке ТАУМЕТР бесконтактным СВЧ методом.

На спектрофотометре EVOLUTION UV-300 были измерены спектры отражения образцов, с помощью которых выполнены расчеты оптических констант полученных пленок методом компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения SCOUT. Для определения толщины, шероховатости и плотности выращенных пленок

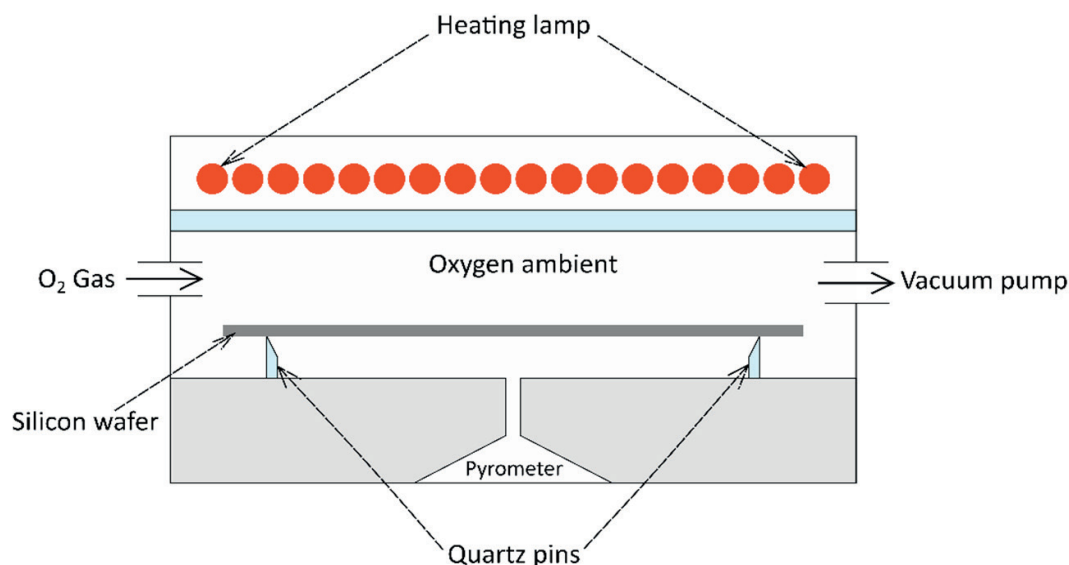


Рисунок 1 – Схема печи быстрого отжига As-One 150 для формирования тонких слоев диоксида кремния

Быстрое термическое окисление поверхности кремния было произведено в печи быстрого отжига As-One 150, схема которой изображена на рисунке 1. Перед началом отжига в камере печи устанавливалось давление 1×10^{-4} мм рт. столба, после чего производился напуск кислорода до достижения давления 500 мм рт. столба. Нагрев кремниевых пластин осуществлялся галогенными лампами при скорости подъема температуры $10^\circ\text{C}/\text{сек}$.

Окисление проведено при температурах 900 и 950°C в среде кислорода при давлении 500 мм рт. столба. Для образцов, которые не подвергались очистке или были очищены этанолом, время отжига составляло 5 минут, а для образцов, подвергнутых трехэтапной химической очистке RCA, время отжига составило 3 минуты. Эффективное время жизни

были измерены спектры рентгеновской рефлектометрии на установке ComplexRay C6, которые были обработаны с помощью программного обеспечения GenX. ИК-спектр полученных пленок был измерен на Nicolet iS 50 при комнатной температуре в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$.

Результаты и обсуждение

Основной задачей данной работы является изучение влияния химической обработки на пассивирующие свойства термически выращенных пленок SiO_2 . На рисунке 2 (стр. 33) представлены значения времени жизни носителей заряда кремниевых подложек с выращенным слоем SiO_2 после каждой предварительной очистки, использованной в данной работе. Как точка от-

счета (для сравнения) приведено $\tau_{\text{эфф}} = 12,9 \text{ мс}$ для пластины кремния перед началом процедур по очистке и формированию слоя оксида кремния. Как видно, время жизни неосновных носителей заряда пластины без предварительной очистки после термической обра-

ботки при температурах 900 и 950 °C падает, достигая величин 4,6 и 6,0 мс соответственно. Это вызвано проникновением поверхностных загрязнений в объем кремниевой пластины, что увеличивает количество дефектов и, как следствие, центров рекомбинации.

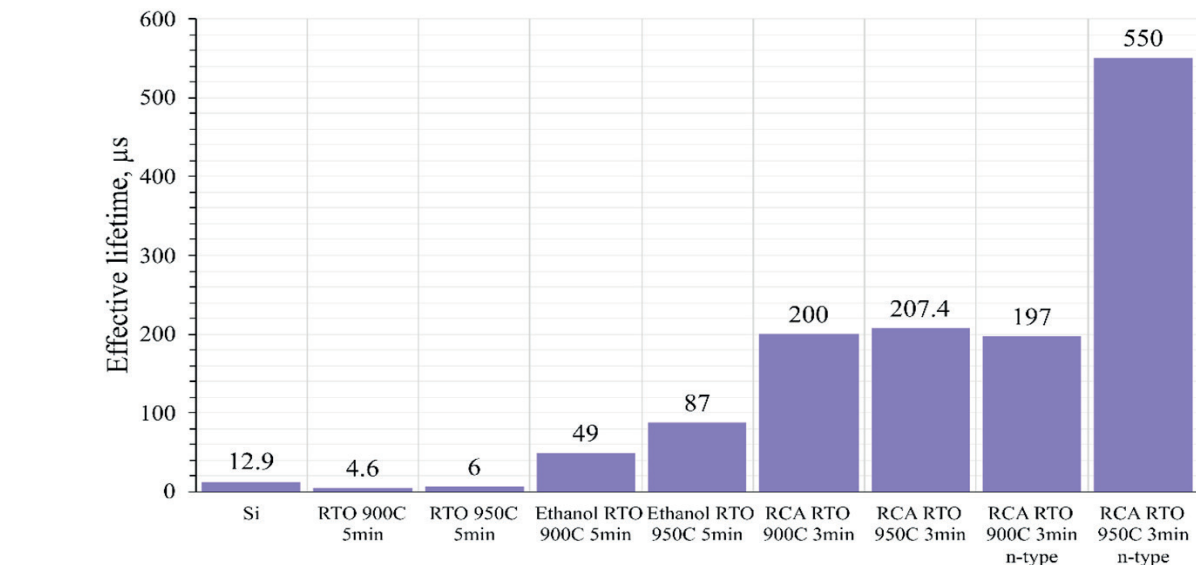


Рисунок 2 – Эффективное время жизни неосновных носителей заряда кремниевых подложек, пассивированных термически выращенным слоем SiO_2 , при температурах 900 и 950 °C с различными предварительными химическими очистками

ботки при температурах 900 и 950 °C падает, достигая величин 4,6 и 6,0 мс соответственно. Это вызвано проникновением поверхностных загрязнений в объем кремниевой пластины, что увеличивает количество дефектов и, как следствие, центров рекомбинации.

В отличие от этого время жизни неосновных носителей заряда кремниевых пластин, подвергнутых очистке кипячением в этиловом спирте, возрастает и составляет 49 мс после термической обработки при температуре 900 °C и 87 мс после термообработки при температуре 950 °C. При этом рост $\tau_{\text{эфф}}$ с увеличением температуры связан с формированием более толстой пленки SiO_2 при более высокой температуре. Отсюда следует, что спирт позволяет удалить некоторое количество поверхностных загрязнений, включая органические, но степень пассивации остается на низком уровне, и это не позволит достигнуть высокого значения КПД солнечного элемента.

и 207,4 мс для температур отжига 900 и 950 °C соответственно.

Как известно, SiO_2 в лучшей степени пассивирует поверхность кремния n-типа, поэтому для получения максимально достижимого времени жизни пленки оксида кремния были выращены на такой пластине при идентичных условиях роста. В результате удалось получить $\tau_{\text{эфф}} = 550 \text{ мс}$ после термообработки при температуре 950 °C. Из этого следует, что метод RCA позволяет осуществлять эффективную очистку поверхности кремниевой пластины и, как следствие, формировать качественный пассивирующий слой SiO_2 .

Как известно, наибольшее практическое применение находит пассивирующий слой, который не только увеличивает время жизни неосновных носителей заряда, но и способствует уменьшению отражения от поверхности и, как следствие, увеличению поглощения солнечного излучения в объеме солнечного элемента. Поэтому оптические константы

играют важную роль в выборе пассивирующего слоя. Для расчета показателя преломления и коэффициента экстинкции полученных пленок был использован спектр отражения образца, измеренный на спектрофотометре EVOLUTION UV-300, и программное обеспечение SCOUT. Полученная зависимость показателя преломления и коэффициента экстинкции пленок от длины волны в интервале длин волн 300–1100 нм приведена на рисунке 3. Для сравнения представлены оптические константы эталонных пленок SiO_2 [10].

вале длин волн 300–1100 нм. Поскольку отличия этих кривых незначительные и не превышают 3%, то можно утверждать, что методом быстрого термического отжига удалось получить слои SiO_2 , близкие к эталонным по своим оптическим характеристикам.

Для подтверждения наличия пленки SiO_2 , сформированной методом быстрого термического отжига, был измерен ИК-спектр образца кремния после предварительной очистки в этиловом спирте и термообработки при температуре 900 °C. В спектре (рисунок 4, стр. 35) отчетливо виден интенсивный пик с максимумом при 1071 cm^{-1} , который относит-

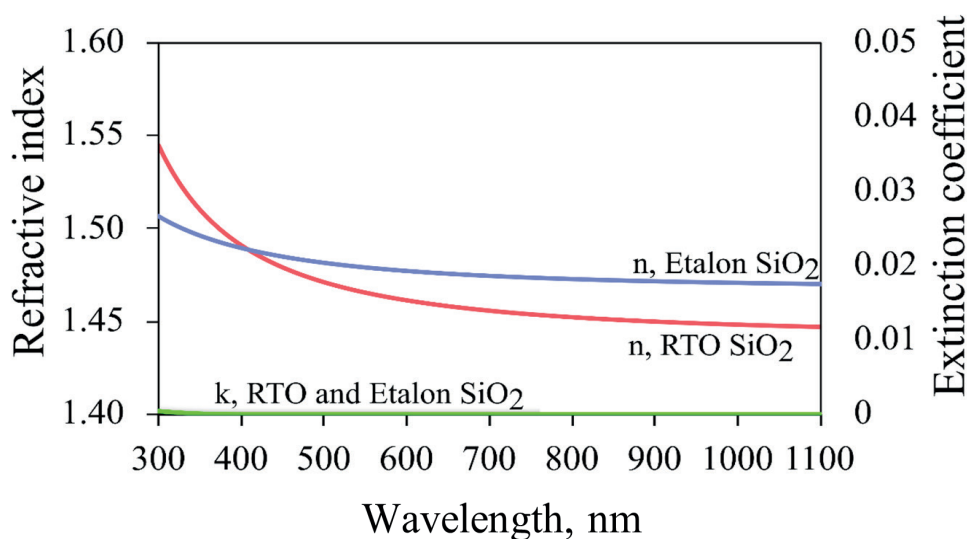


Рисунок 3 – Эталонные и измеренные волновые зависимости оптических констант пассивирующих пленок SiO_2

Видно, что для обоих случаев коэффициент экстинкции k близок к нулю во всем интервале длин волн, что говорит о высокой прозрачности пленок диоксида кремния. В свою очередь, значения показателя преломления n незначительно отличаются. Для пленок, синтезированных в данной работе, показатель преломления уменьшается с 1,54 при длине волны 300 нм до 1,44 при длине волны 1100 нм. Показатель преломления эталонных пленок SiO_2 варьируется в меньших пределах и уменьшается от 1.50 до 1.47 в том же интер-

ся к валентным колебаниям типа «растяжение-сжатие» связей Si-O, а плечевой пик на 1142 cm^{-1} относится к противофазному движению атомов кислорода [11] [12]. Также можно заметить наличие широкой полосы поглощения в области 760–970 cm^{-1} , которое можно отнести к деформационным колебаниям маятникового типа связей Si-O. Таким образом, полученный ИК-спектр подтверждает наличие пленки диоксида кремния, выращенной методом быстрого термического отжига RTP.

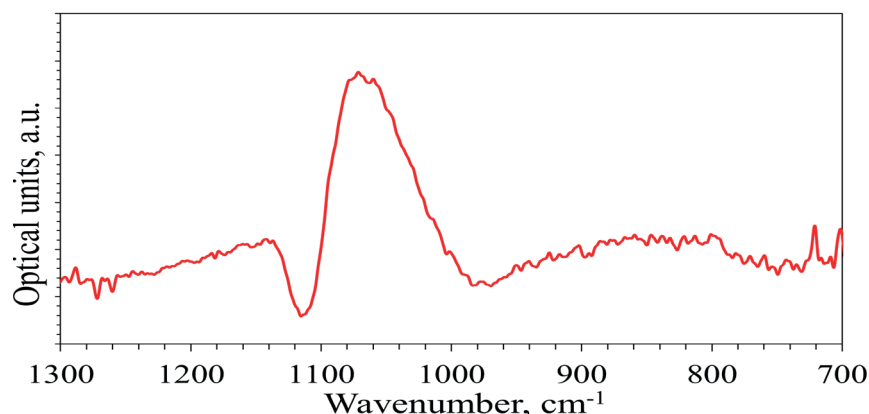


Рисунок 4 – ИК-спектр пленок SiO_2 , сформированных методом быстрого термического отжига при температуре 900°C

Заключение

Методом быстрого термического отжига в течение 3 и 5 минут при температурах 900 и 950°C в среде кислорода при давлении 500 мм рт. ст. были сформированы пассивирующие пленки диоксида кремния SiO_2 . Было показано влияние предварительной очистки поверхности кремния на качество пассивирующих пленок. Показано, что рост пленки SiO_2 без предварительной очистки приводит к уменьшению эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии с 12.9 мс до 4.6 и 6 мс. Удаление поверхностных загрязнений кипячением в этиловом спирте приводит к улучшению пассивации и увеличению времени жизни неосновных носителей до 49 и 87 мс после отжига при 900 и 950°C . Наилучшей пассивации удастся достичь при

трехэтапной химической очистке RCA, где $\tau_{\text{эфф}} = 207,4$ мс для пластин p-типа и 550 мс для пластин n-типа.

Результаты расчетов оптических констант полученных пленок SiO_2 с использованием спектров отражения и программного обеспечения SCOUT показывают наличие слоя диоксида кремния, близкого к эталонным. Величина n уменьшается от 1.50 до 1.47 в интервале длин волн 300 – 1100 нм, а k остается на нулевом уровне в рассматриваемом диапазоне длин волн.

Методом ИК-спектроскопии подтверждено формирование слоя SiO_2 методом RTP. Идентифицированы пики с максимумами при 1071 cm^{-1} , 1142 cm^{-1} , 760 – 970 cm^{-1} , которые отнесены к валентным и деформационным колебаниям связей Si-O.

REFERENCES

- 1 Nussupov K.K., Beisenkhanov N.B., Keiinbay S., Sultanov A.T. Silicon carbide synthesized by RF magnetron sputtering in the composition of a double layer antireflection coating SiC/MgF_2 // Optical Materials, 2022, vol. 128, no. 112370.
- 2 Bonilla R.S., Hoex B., Hamer P., Wilshaw P.R. Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review. // Phys. Status Solidi A., 2017, no. 1700293.
- 3 Green M.A. The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production // Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, pp. 190–197.
- 4 Cacciato A., Duerinck F., Baert K., Moors M., Caremans T., Leys G., Keersmaecker K.D., Szlufcik J. Investigating manufacturing options for industrial PERL-type Si solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, pp. 153–159.
- 5 Mandal N. C., Biswas S., Acharya S., Panda T. Study of the properties of SiO_x layers prepared by different techniques for rear side passivation in TOPCon solar cells / Materials Science in Semiconductor Processing, 2020, p. 119.

6 Fukuda H., Yasuda M., Iwabuchi T. Kinetics of Rapid Thermal Oxidation of Silicon // Applied Physics, 1992, pp. 3436–3439.

7 Liu C. P., Chang M.W., Chuang C.L. Effect of rapid thermal oxidation on structure and photoelectronic properties of silicon oxide in monocrystalline silicon solar cells // Current Applied Physics, 2014, pp. 653–658.

8 Gad K.M., Vössing D., Balamou P., Hiller D., Stegemann B., Angermann H., Kasemann M. Improved Si/SiO_x interface passivation by ultra-thin tunneling oxide layers prepared by rapid thermal oxidation // Applied Surface Science, 2015, vol. 353, pp. 1269–1276.

9 Kern W. The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology // Journal of the Electrochemical Society, 1990, vol. 137, no 6, pp. 1887–1892.

10 Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Refractive index determination of SiO₂ layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs // J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public., 2013, vol. 8, no 13010.

11 Prasad I., Chandorkar A.N. Spectroscopy of silicon dioxide films grown under negative corona stress // Journal of Applied Physics, 2003, vol. 94, no 4, pp. 2308–2310.

12 Samitier J., Marco S., Ruiz O., Morante J.R., Esteve-Tinto J., Bausells J. Analysis by FT-IR spectroscopy of SiO₂-polycrystalline structures used in micromechanics: stress measurements // Sensors and Actuators A, 1992, vol. 32, pp. 347–353.

Сведения об авторах

Нусупов Каир Хамзаевич

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-8200-7510

E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Бейсенханов Нуржан Бейсенханович

Доктор физико-математических наук, руководитель НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-5908-5614

E-mail: beisen@mail.ru

Султанов Асанали Талгатбекулы (автор для корреспонденции)

Ph.D. студент, младший научный сотрудник НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-0074-431X

E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Тыщенко Ида Евгеньевна

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 13, 630090, г. Новосибирск, Россия

ORCID ID: 0000-0002-9518-0651

E-mail: tys@isp.nsc.ru

Кусайнова Айжан Жамбуловна

Магистрант, ведущий химик-технолог НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-2485-9739

E-mail: a.kusainova@kbtu.kz

Бугыбай Захида Куанышқызы

Магистрант, менеджер НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ»,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Ыскак Камила Мухтарқызы

Магистрант НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ»,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0001-9139-0400
E-mail: yskakkamila@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет

Нүсіпов Каир Хамзаевич

ф-м.ғ.д., бас ғылыми қызметкер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0001-8200-7510
E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Бейсенханов Нұржан Бейсенханович

ф-м.ғ.д., жетекші, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-5908-5614
E-mail: beisen@mail.ru

Сұлтанов Асанали Талгатбекұлы (корреспонденция авторы)

PhD студент, кіші ғылыми қызметкер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-0074-431X
E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Тысченко Ида Евгеньевна

ф-м.ғ.д., жетекші ғылыми қызметкер, А. В. Ржанова атындағы Федералды мемлекеттік бюджеттік ғылыми мекеме жартылай өткізгіштер физикасы институты, 630090, Ресей, Новосибирск қ, пр. Ак. Лаврентьева, 13
ORCID ID: 0000-0002-9518-0651
E-mail: tys@isp.nsc.ru

Кұсайынова Айжан Жамбуловна

Магистрант, жетекші химик-технолог, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Бұғыбай Захида Қуанышқызы

Магистрант, менеджер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Ысқақ Камила Мұхтарқызы

Магистрант, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы,
ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0001-9139-0400
E-mail: yskakkamila@gmail.com

Information on the authors

Nussupov Kair Khamzaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of the Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnology of JSC "KBTU", Tole Bi 59, 050000, Almaty, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0001-8200-7510
E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Beisenkhanov Nurzhan Beisenkhanovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Supervisor, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0002-5908-5614
E-mail: beisen@mail.ru

Sultanov Assanali Talgatbekuly (corresponding author)

Ph.D. student, Junior Research, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0003-0074-431X
E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Tyschenko Ida E.

Ph.D., Dr of Scie., Leading scientist, Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 13 Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia
ORCID ID: 0000-0002-9518-0651
E-mail: tys@isp.nsc.ru

Kusainova Aizhan Zhambulovna

Master student, Leading chemist-technologist, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0002-2485-9739
E-mail: a.kusainova@kbtu.kz

Bugybay Zakhida Kuanyshkyzy

Master student, Manager, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Yskak Kamila

Master student, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0001-9139-0400
E-mail: yskakkamila@gmail.com

AN APPLICATION OF STABILITY ANALYSIS OF HYDROCARBON MIXTURES FROM X AND Y FIELDS TO PREDICT WAX PRECIPITATION

BAZARBAYEVA M.B.¹, ISMAILOVA D.A.¹, ABDUKARIMOV A.K.¹,
DELIKESHEVA D.N.¹, MOMBEKOV B.I.¹, ZERPA L.²

¹Satbayev University, 050000, Almaty, Kazakhstan

²Colorado School of Mines, 80401, Colorado, USA

Abstract. The thermodynamic description of wax deposition is a relatively new approach to solving the problem of wax precipitation, which the oil and gas industry has been struggling with for a long time. Many models exist in the literature to predict the thermodynamic conditions under which the first paraffin crystal is formed. The first task in all models is to determine the stability of the hydrocarbon mixture in order to define the possibility of wax precipitation. The stability of a mixture is determined by the thermodynamic behavior of the phases of a multicomponent mixture, namely, the presence of all existing phases in equilibrium. To this end, a new stability algorithm with Gibbs energy minimization to determine the wax precipitation in hydrocarbon mixtures has been developed. The algorithm is based on multi-solid thermodynamic model with EOS concepts. The main criterion for stability is the existing of the mixture at its global minimum. Proposed stability analysis predicts whether a given mixture will be split into multiple phases or will exist as the single phase at a given temperature and pressure conditions. The model was proven with 6 samples from fields X and Y showing the instability of original petroleum mixtures that agree with the real behavior of the oil in in-situ conditions. The results of the new stability algorithm are comparable with the results of the models presented previously. The main advantage of the method is its simplicity and reliability.

Keywords: Stability analysis, Gibbs energy, global minimum, fugacity, heptane plus characterization, wax deposition, chemical potential, splitting, phase equilibrium, multi-solid model.

ПАРАФИН ТҮСУІН БОЛЖАУ ҮШІН X ЖӘНЕ Y КЕНДЕРІНІҢ КӨМІРСУТЕГІ ҚОСПАСЫНЫҢ ТҮРАҚТЫЛЫҚ АНАЛИЗІН ҚОЛДАНУ

БАЗАРБАЕВА М.Б.¹, ИСМАЙЛОВА Д.А.¹, АБДУКАРИМОВ А.К.¹,
ДЕЛИКЕШЕВА Д.Н.¹, МОМБЕКОВ Б.И.¹, ЗЕРПА Л.²

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050000, Алматы қ., Қазақстан

²Колорадо тау-кен мектебі, 80401, Колорадо, АҚШ

Аңдатпа. Парафин шөгуінің термодинамикалық сипаттамасы мұнай-газ өнеркәсібі біраз уақыттан бері күресіп келе жатқан парафин шөгуінің мәселесін шешудің салыстырмалы

түрде жаңа тәсілі болып табылады. Әдебиетте бірінші парафин кристалы түзілетін термодинамикалық жағдайларды болжауға арналған көптеген модельдер бар. Барлық модельдердегі бірінші міндет парафин тұнудың мүмкіндігін тексеру үшін көмірсутекті қоспаның тұрақтылығын анықтау болып табылады. Қоспаның тұрақтылығы көпкомпонентті қоспаның фазаларының термодинамикалық күйімен, атап айтқанда, барлық фазалардың тепе-теңдікте болуымен анықталады. Осы мақсатта көмірсутек қоспаларындағы парафинның шөгуін анықтау үшін Гиббс энергиясын минимизациялау арқылы жаңа тұрақтылық алгоритмі әзірленді. Алгоритм күй теңдеулері концепциялары бар multi-solid термодинамикалық модельге негізделген. Тұрақтылықтың негізгі критерийі қоспаның оның жаһандық минимумында болуы. Ұсынылған тұрақтылық алгоритмі берілген қоспаның белгілі температура мен қысым жағдайында бірнеше фазаға бөлінетінін немесе бір фаза ретінде болатынын болжайды. Модель X және Y кен орындарынан алынған 6 үлгіден сыналды, бұл кендердегі мұнайдың нақты әрекетіне сәйкес келетін бастапқы мұнай қоспаларының тұрақсыздығын көрсетті. Жаңа тұрақтылық алгоритмінің нәтижелерін бұрын ұсынылған үлгілермен салыстыруға болады. Әдістің басты артықшылығы оның қарапайымдылығы мен сенімділігі болып табылады.

Түйінді сөздер: тұрақтылық анализі, Гиббс энергиясы, жаһандық минимум, ұшына, гептан-плюс фракциясының сипаттамасы, парафин жиналуы, химиялық потенциал, бөліну, фазалық тепе-теңдік, multi-solid моделі.

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА СТАБИЛЬНОСТИ СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ X И Y ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫПАДЕНИЯ ПАРАФИНА

БАЗАРБАЕВА М.Б.¹, ИСМАИЛОВА Д.А.¹, АБДУКАРИМОВ А.К.¹,
ДЕЛИКЕШЕВА Д.Н.¹, МОМБЕКОВ Б.И.¹, ЗЕРПА Л.²

¹Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, 050000, г. Алматы, Казахстан

²Колорадская горная школа, 80401, Колорадо, США

Аннотация. Термодинамическое описание осаждения парафина – относительно новый подход в решении проблемы выпадения парафина, с которой нефтегазовая индустрия борется довольно продолжительное время. В литературе существует множество моделей с целью прогнозирования термодинамических условий, при которых образуется первый кристалл парафина. Первой задачей во всех моделях является определение стабильности смеси углеводородов для того, чтобы определить перспективу выпадения парафина. Стабильность смеси определяется термодинамическим поведением фаз многокомпонентной смеси, а именно нахождением всех существующих фаз в равновесии. С этой целью разработан новый алгоритм стабильности с минимизацией энергии Гиббса для определения осаждения парафина в углеводородных смесях. Алгоритм основан на термодинамической модели multi-solid с концепциями УС. Главный критерий устойчивости – нахождение смеси в ее глобальном минимуме. Предлагаемый анализ стабильности предсказывает, будет ли данная смесь разделена на несколько фаз или будет существовать как одна фаза при заданных условиях температуры и давления. Модель была проверена на 6 образцах из месторождений X и Y, показывающих нестабильность исходных нефтяных смесей, что согласуется с реальным поведением нефти в условиях месторождения. Результаты нового

алгоритма устойчивости сопоставимы с результатами моделей, представленных ранее. Главное достоинство метода – простота и надежность.

Ключевые слова: анализ стабильности, энергия Гиббса, глобальный минимум, летучесть, описание фракции гелтан-плюс, отложение парафина, химический потенциал, расщепление, фазовое равновесие, модель multi-solid.

Introduction

Crude oil is a complex mixture of hydrocarbons, consisting of alkanes, naphthenics, asphaltenes, resins and aromatics. Paraffins (normal alkanes) are the first precipitating components and their amount in wax are greater than other components. Hence, wax deposition is often associated with paraffin deposition. Wax precipitation substantially affects oil production and transportation. Wax deposition increases pressure drop and therefore power requirements, and decreases effective flow area of the pipeline reducing oil production. To prevent these problems, it is required to predict the thermodynamic conditions under which the waxes will precipitate in functions of pressure, temperature and composition. The thermodynamic- predictive models are useful to complete this task.

Thermodynamic behavior of petroleum mixtures can lead to a number of multiphase equilibrium states, including vapor–liquid, liquid–multi-solid (wax) and vapor–liquid–multi-solid (wax) equilibria. Multiphase equilibrium calculations are solved by two widely used stability analysis algorithms. The first is the solution of a system of equations that describe the phase equilibrium [1], [2] and the second approach is consist of Gibbs free energy minimization. [3], [4]. Stability analysis predicts whether a given mixture will be split into multiple phases, the number of phases at equilibrium and the distribution of components within these phases [5]. Both approaches are based on multi-solid thermodynamic model. Multi-solid model assumes that precipitated wax predominantly consists of mutually immiscible pure hydrocarbon components. The number of precipitating species can be determined at fixed temperature and pressure using a stability analysis.

[2] showed that at constant temperature, T ,

and pressure, P , a component i may precipitate as a pure solid if it fulfills this expression:

$$f_i^L(P, T, Z_i) - f_{i,pure}^S(P, T) \geq 0$$

where $f_i(P, T, Z_i)$ is the fugacity of component i in an original petroleum mixture with composition Z and $f_{i,pure}^S(P, T)$ is the fugacity of component i as a pure solid. This equation is easily derived from Eq. (5) of [4]. The vapor–liquid phase behavior is described using Peng–Robinson EOS [6]. The criterion for thermodynamic equilibrium is that the fugacities of every component in each phase must be equal implying zero net mass transfer between the phases.

The second assumption is numerical and geometrical methods of stability analysis based on Gibbs' tangent plane and global minimum criterions. The tangent plane criterion theory suggests that if the tangent hyperplane to the Molar Gibbs energy surface at original composition z to the energy surface at composition y , $F(y)$ is the at no point lies above the energy surface, the system is stable. If any of the parallel tangent planes lie below the energy surface the mixture is unstable and will split into at least two phases. Numerically, the necessary and sufficient condition for global stability is: [3]

$$F(y) = g(y) - L(y; z) = \sum_i^N y_i(\mu_i(y) - \mu_i(z)) \geq 0$$

At this work based on the multi-solid phase model for petroleum mixtures, a new and effective stability analysis using Gibbs energy minimization is proposed.

Main part

This section considers the fundamental theoretical concepts regulating the stability of hydrocarbon mixture that are the foundation

of this paper. In addition, the heptane plus characterization methodology is presented, and equations for calculating the critical properties of alkanes heavier than C_{7+} and their chemical potentials are developed. These values are required to obtain the final inequality equation.

Problem statement

The Gibbs energy of an M-component mixture with mole fractions ($z_1, z_2, \dots, z_M$) at given temperature and pressure (T_o, P_o) is

$$G_o = \sum_i^M n_i \mu_i^0$$

where μ_i^0 is the chemical potential of i-component of the mixture.

We have an assumption that this mixture is divided into two phases with mole numbers $N - \epsilon$ and ϵ , respectively. The number of moles ϵ of the second phase is infinitesimal and the mole fractions in phase II are ($y_1, y_2, \dots, y_M$).

The change in Gibbs energy after splitting is:

$$\Delta G = G_I + G_{II} - G_o$$

or using a Taylor series expansion of G_I , discarding second order terms in ϵ , gives

$$\Delta G = G(\epsilon) - \epsilon \sum_i^N y_i \mu_i^0 = \epsilon \sum_i^N y_i (\mu_i(y) - \mu_i^0)$$

Original mixture is stable when its Gibbs energy is at the global minimum. Consequently, a necessary criterion for stability is:

$$F(y) = \sum_i^N y_i (\mu_i(y) - \mu_i^0) \geq 0$$

for all trial compositions y .

For binary mixtures stability criterion is that the tangent hyperplane at no point lies above the energy surface. Multiphase system is in an equilibrium when the individual species have identical chemical potentials in all phases and global minimum criterion is also satisfied [4].

Materials

Three oil sample from field X and as many from field Y were obtained to produce the laboratorial analysis. Composition of the crudes was investigated using gas chromatography. Table 1 presents the composition of six oils. Study of the group composition of oil by SARA analysis was performed. More than half of the mixtures consist of saturated hydrocarbons, the portion of aromatic hydrocarbons is about one fifth, the rest belongs to resins and asphaltenes. The molecular weight of the mixture varies from 270-275 g / mol.

Table 1 – Composition of six oil samples obtained from gas chromatography

Component	Mole fraction					
	1	2	3	4	5	6
i-butane	0,00047	0,00047	0,00054	0,00072	0,00065	0,00068
i-pentane	0,00102	0,00105	0,00113	0,00251	0,00239	0,00254
n-pentane	0,00115	0,0012	0,00128	0,00419	0,00403	0,00428
hexane	0,00337	0,00343	0,00379	0,00984	0,00981	0,01029
heptane	0,00602	0,00614	0,0064	0,0156	0,01584	0,0169
octane	0,0119	0,01235	0,01274	0,02346	0,02399	0,02581
nonane	0,01556	0,01592	0,01631	0,02502	0,02552	0,02748
decane	0,02192	0,02234	0,02226	0,02666	0,02712	0,02961
C_{11}	0,02438	0,02473	0,0243	0,02605	0,02642	0,029
C_{12}	0,02679	0,02706	0,02633	0,02649	0,02679	0,02936
C_{13}	0,03264	0,0329	0,03166	0,03072	0,03105	0,03395
C_{14}	0,03227	0,0325	0,03101	0,02914	0,02946	0,032
C_{15}	0,03837	0,03862	0,03681	0,03439	0,03476	0,03731
C_{16}	0,03275	0,03301	0,03121	0,02878	0,0291	0,03081
C_{17}	0,03238	0,03262	0,03055	0,02791	0,02825	0,02956
C_{18}	0,03302	0,03329	0,03107	0,02833	0,02864	0,02964
C_{19}	0,03185	0,03198	0,02979	0,02707	0,02734	0,0278
C_{20+}	0,64539	0,63826	0,64047	0,61379	0,60087	0,57849
i-hexane	0,00049	0,00051	0,00054	0,00137	0,00136	0,00144

methylcyclopentane	0,00067	0,00069	0,00072	0,00211	0,0021	0,00222
benzene	0,00064	0,0008	0,00084	0,00206	0,00207	0,0022
cyclohexane	0	0	0,00003	0,00006	0,00006	0,00006
methylcyclohexane	0,0032	0,00332	0,00347	0,00632	0,0064	0,00683
Toluol	0,00012	0,00315	0,0132	0,00195	0,01043	0,00566
Ethylbenzene	0,00083	0,00086	0,00087	0,00146	0,0015	0,00162
m-xylene	0,0012	0,00123	0,00123	0,00156	0,00159	0,00178
o-xylene	0,00036	0,00037	0,00018	0,00054	0,00055	0,0006
Trimethylbenzene	0,00121	0,00123	0,00125	0,00186	0,00188	0,00204
Total	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Methods

Phase behavior calculations using cubic equation of state to predict the reservoir fluid properties require components characteristics such as critical pressure and temperature, acentric factor and binary interaction parameters (BIP). Separation techniques including gas chromatography and distillation are not able to identify all components in mixture, particularly, heavier than C_7 . These components are grouped in heptane-plus fraction and next calculations are performed to simulate C_{7+} characterization. [10]

Molecular weight and density of C_{7+} . Density is calculated at standard conditions ($P = 101325$ Pa, $T = 293$ K)

Mole fraction of heptane-plus:

$$z_{C7+} = \sum_{i=7}^n z_i$$

Molecular weight of C_{7+} fraction:

$$M_{wC7+} = \frac{\sum_{i=7}^n z_i * M_i}{z_{C7+}}$$

Density:

$$\rho_{C7+} = \frac{M_{wC7+}}{V_{C7+}}$$

Total volume calculation: since the pressure is low, the mixture might be considered as ideal solution and the total volume can be calculated summarizing component's partial volume.

Sum of partial volumes based on the known densities at standard conditions.

$$V_{C7+} = \sum_{i=7}^n z_i * V_i$$

Specific gravity:

$$SG = \rho_{C7+} / \rho_w$$

Split the C_{7+} fraction:

Universal Oil Products (UOP) characterization factor [7]:

$$K_{wC7+} = 4.5579 M^{0.12178} \gamma^{-0.84573}$$

Molar weight [8]:

$$M_i = 14n - 4$$

$$\gamma_i = \left(\frac{K_{wC7+}}{4.5579 M_i^{0.15178}} \right)^{\frac{1}{-0.84573}}$$

Mole fraction [8]:

$$z_{cn} = 1.38205 z_{C7+} \exp(-0.25903n)$$

Boiling point in R:

$$T_{bi} = (K_{wC7+} \gamma_i)^3$$

Knowing boiling temperature and specific gravity of all components, other characteristics can be calculated using Lee-Kesler correlation.

Lee-Kesler correlations, T_c in °R, P_c in psi [7]:

Critical temperature:

$$T_{ci} = 341.1 + 811\gamma_i + (0.4244 + 0.1174\gamma_i)$$

$$T_{bi} + (0.4669 * -0.2623\gamma_i) * 10^{-5} T_{bi}^{-1}$$

Critical pressure:

$$\ln P_{ci} = 8.3634 - \frac{0.0566}{\gamma_i} - \left[\left(0.24244 + \frac{2.2898}{\gamma_i} + \frac{0.11857}{\gamma_i^2} \right) * 10^{-3} \right] T_{bi} +$$

$$+ \left[\left(1.4685 + \frac{3.648}{\gamma_i} + \frac{0.47227}{\gamma_i^2} \right) * \right.$$

$$\left. * 10^{-7} \right] T_{bi}^2 - \left[\left(0.42019 + \frac{1.6977}{\gamma_i^2} \right) * 10^{-10} \right] T_{bi}^3$$

Acentric factor:

$$\omega_i = \frac{-\ln\left(\frac{P_c}{14.7}\right) + A_1 + A_2 T_{bri}^{-1} + A_3 \ln T_{bri} + A_4 T_{bri}^6}{A_5 + A_6 T_{bri}^{-1} + A_7 \ln T_{bri} + A_8 T_{bri}^6}$$

where $A_1 = -5.92714$; $A_2 = 6.09648$; $A_3 = 1.28862$; $A_4 = -0.169347$; $A_5 = 15.2518$; $A_6 = -15.6875$; $A_7 = -13.4721$; $A_8 = 0.43577$

Binary interaction parameters:

$$k_{ij}^{EOS} = 1 - \left[\frac{2V_{ci}^{1/6}V_{cj}^{1/6}}{V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3}} \right]$$

Gibbs energy minimization

Global minimum:

$$F(y) = \sum_i z_{cn}(\mu_i(y) - \mu_i^0) \geq 0$$

Chemical potential of pure component:

$$\mu_0 = \frac{G_0}{n_i}$$

Gibbs energy of pure component G_0 is obtained from [9].

Chemical potential of component i in the mixture:

Results and discussions

Heptane-plus fraction is characterized in Table 2. The portion of intermediate and heavy hydrocarbons is extremely high, because the

petroleum mixtures produced from X and Y fields are characterized by a great amount of paraffins and resins present. The pour point temperature is also relatively high.

Table 2 – Properties of heptane-plus fraction

Sam- ple	zC ₇₊	MwC ₇₊ , g/mol	VC ₇₊ , m ³ / mol	ρC ₇₊ , g/m ³	SG
1	0,98524	341,476	0,000429004	795974,038	0,75597404
2	0,98172	339,901	0,000427143	795755,809	0,7957558
3	0,97091	344,09	0,000432035	796440,235	0,79644024
4	0,96341	336,747	0,000423413	795316,126	0,795316
5	0,95515	333,924	0,000420134	794802,822	0,7948028
6	0,95772	327,314	0,000412325	793826,029	0,793826

In Fig. 1 splitted molar composition of the first sample from field X is presented. Hydrocarbons with carbon number higher than 20 are grouped and their 4% of heptane-plus fraction. A great part of the fraction consists from liquid hydrocarbons and the portion of heavy paraffins are significant.

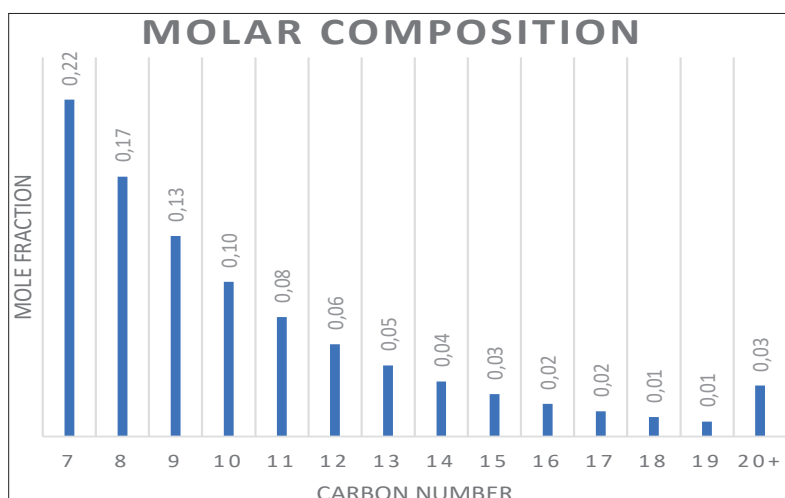


Figure 1– Molar composition of the oil sample #1 from field X after splitting

Heptane-plus characterization results with critical properties are tabulated in the Table 3.

Table 3 – Properties of heptane-plus fraction components from field X, sample #1

Carbon number	Mole fraction	MW, g/mol	Pc, MPa	Tc, K	Acentric factor
7	0,222125641	94	2,660247011	642,1377145	-0,388615554
8	0,17143654	108	2,395102473	663,0170572	-0,388615554
9	0,132314699	122	2,174872927	682,429072	-0,388615554
10	0,102120468	136	1,988558059	700,6390911	-0,388615554
11	0,078816563	150	1,828582633	717,8421369	-0,388615554
12	0,060830613	164	1,689535127	734,1863416	-0,388615554
13	0,046949059	178	1,567432645	749,7872435	-0,388615554
14	0,036235278	192	1,459270229	764,7369485	-0,388615554
15	0,027966383	206	1,362732803	779,1102394	-0,388615554
16	0,02158445	220	1,276004529	792,9687869	-0,388615554

17	0,016658876	234	1,197638844	806,3641357	-0,388615554
18	0,012857318	248	1,126467572	819,3398726	-0,388615554
19	0,009923277	262	1,061535934	831,9332351	-0,388615554
20+	0,033561697				

This work is based on multi-solid thermodynamic model and performing splitting, we assume that our mixture is divided into pure hydrocarbon components. After splitting we

thermodynamic models based on solid-solution and multi-solid theories to predict the wax appearance at certain pressure temperature conditions. The main part of these models

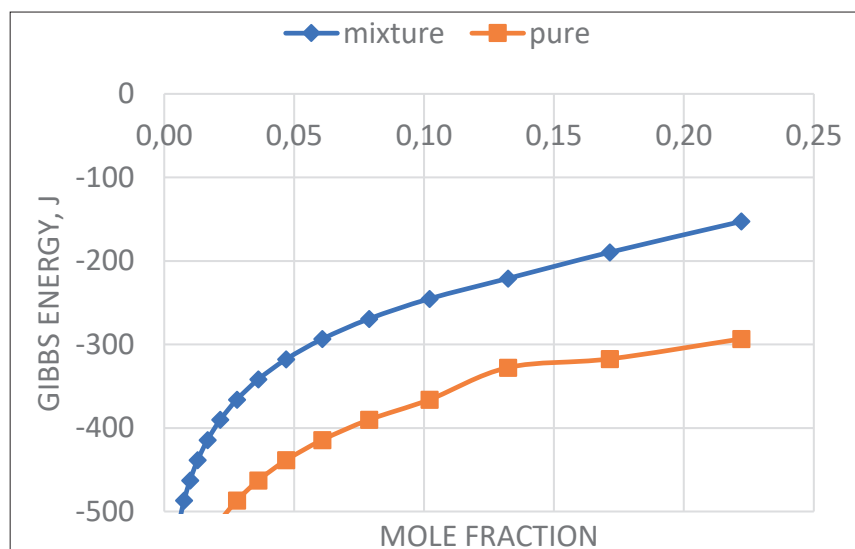


Figure 2 – Gibbs energy as a function of molar composition

know the exact number of components present in heptane-plus fraction. In our samples the highest carbon number is 149.

In fig 2 the Gibbs energy of pure hydrocarbon components and their Gibbs energy as the part of the mixture are compared. Pure components have Gibbs energy less than when they are in the mixture. Consequently, their chemical potential as in the negligible pure phase are smaller than in the original petroleum mixture. In the global minimum criterion, our potential differences are negative and the instability of the mixture is proved.

Conclusion

Problems related to the wax precipitation during production and transportation of crude oil cause major difficulties in these processes. To prevent the wax segregation from the original mixture it is recommended to predict the thermodynamic conditions at which the components are not at equilibrium. There are

is stability analysis, which predicts whether a given mixture at equilibrium or not. At this work a new stability algorithm based on Gibbs tangent criterion is proposed.

The stability of the mixture requires that its Gibbs energy be at a global minimum. If the mixture of hydrocarbons is stable under certain thermodynamic conditions of the formation it will exists as a single phase, but if the stability criterion is not satisfied, the mixture will split into two or more different phases. In our case the petroleum mixtures are not at their global minimum. It means that the mixtures are unstable and segregated into at least liquid and solid phases. The solid phase is our wax that consists of pure hydrocarbons, since our work is based on the multi-solid model. A new algorithm is simple and does not require a lot input data.

Acknowledgements

This paper was prepared as part of the project “Development of PVT model for

prediction of wax precipitation” AP09058452, within the framework of the competition is held on grant financing of fundamental and applied research young scientists on scientific and (or)

scientific and technical projects for 2021-2023 by Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

REFERENCES

- 1 Pan H., Firoozabadi A., Fotland P., SPE Prod. Facility J, 1997, 10, 250–258.
- 2 Lira-Galeana, Firoozabadi A., Prausnitz J.M., AIChE J., 1996, 42, 239–248.
- 3 Wasylkiewicz S.K., Sridhar L.N., Doherty M.F. & Malone M.F, Industrial and Engineering Chemistry Research, 1996, 35(4), <https://doi.org/10.1021/ie950049r>.
- 4 Michelsen M.L. Fluid Phase Equilibria, 1982, 9: 1-19, [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(82\)85001-2](https://doi.org/10.1016/0378-3812(82)85001-2).
- 5 Monroy-Loperena R. Fluid Phase Equilibria, 2013, 348, <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2013.03.005>.
- 6 Robinson D.B., Peng D.Y., S.Y.K. Chung, Fluid Phase Equil, 1985, 24.
- 7 Whitson C.H, SPE J. Phase behavior, 1983, 683–694.
- 8 Danesh, A. *PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids*, 1998, [https://doi.org/10.1016/s0264-8172\(99\)00062-8](https://doi.org/10.1016/s0264-8172(99)00062-8).
- 9 Parks G.S. Journal of the American Chemical Society, 1954, 76 (7), <https://doi.org/10.1021/ja01636a111>.
- 10 Makhatova M. C7+ splitting and lumping, 2019.

Information about authors

Bazarbayeva Makpal Bulatovna (corresponding author)

Bachelor student, Satbayev university, Satpayev st. 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-7217-6238

E-mail: makpal.bazarbayeva.pe@gmail.com

Ismailova Jamilyam Abdulakhmatovna

PhD, Satbayev University, Satpayev st. 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-7680-7084

E-mail: j.Ismailova@satbayev.university

Abdukarimov Aibek Kenzhebekovich

MSc in Petroleum Engineering, PhD student, Satbayev University, Satpayev st. 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-6570-2810

E-mail: abdukarimov1303@gmail.com

Delikesheva Dinara Nasipulovna

MSc, Satbayev University, Satpayev st. 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-5442-4763

E-mail: d.delikesheva@satbayev.university

Mombekov Bagdat Isakhanovich

MSc, Satbayev University, Satpaev st. 22, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-7112-8920

E-mail: b.mombekov@satbayev.university

Dr. Luis Zerpa

Associate Professor of Petroleum Engineering, Colorado School of Mines, 1500 Illinois St., Golden, CO, 80401, USA

ORCID ID: 0000-0003-3211-2704

E-mail: lzerpa@mines.edu

Авторлар туралы ақпарат

Базарбаева Мақпал Булатовна (корреспонденция авторы)

Бакалавриат студенті, Қ.И.Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтпаев көш., 22, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-7217-6238

E-mail: makpal.bazarbayeva.pe@gmail.com

Исмаилова Джамилям Абдулахатовна

Техника ғылымдарының докторы, Қ.И.Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтпаев көш., 22, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-7680-7084

E-mail: j.Ismailova@satbayev.university

Абдукаримов Айбек Кенжебекович

Техника ғылымдарының магистрі, PhD докторанты, Қ.И.Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтпаев көш., 22, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-6570-2810

E-mail: abdukarimov1303@gmail.com

Деликешева Динара Насипуловна

Техника ғылымдарының магистрі, Қ.И.Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтпаев көш., 22, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-5442-4763

E-mail: d.delikesheva@satbayev.university

Момбеков Бағдат Исаханұлы

Техника ғылымдарының магистрі, Қ.И.Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Сәтпаев көш., 22, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-7112-8920

E-mail: b.mombekov@satbayev.university

Доктор Луис Зерпа

Мұнай инженериясы кафедрасының ассоциацияланған профессоры, Колорадо тау-кен мектебі, Иллинойс көшесі, 1500, Голден, СО 80401, АҚШ

ORCID ID: 0000-0003-3211-2704

E-mail: lzerpa@mines.edu

Информация об авторах

Базарбаева Макпал Булатовна (автор для корреспонденции)

Студент бакалавриата, КазННТУ им. К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050000,

г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-7217-6238

E-mail: makpal.bazarbayeva.pe@gmail.com

Исмаилова Джамилям Абдулахатовна

Доктор технических наук, КазННТУ им. К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050000,

г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-7680-7084

E-mail: j.Ismailova@satbayev.university

Абдукаримов Айбек Кенжебекович

Магистр технических наук, PhD докторант, КазННТУ им. К.И. Сатпаева,

ул. Сатпаева, 22, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-6570-2810

E-mail: abdukarimov1303@gmail.com

Деликешева Динара Насипуловна

Магистр технических наук, КазННТУ им. К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050000,

г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-5442-4763

E-mail: d.delikesheva@satbayev.university

Момбеков Багдат Исаханович

Магистр технических наук, КазННТУ им. К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, 050000,

г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-7112-8920

E-mail: b.mombekov@satbayev.university

Доктор Луис Зерпа

Ассоциированный профессор нефтяной инженерии, Колорадская горная школа, 1500

Иллинойс-Стрит, Голден, Колорадо, 80401, США

ORCID ID: 0000-0003-3211-2704

E-mail: lzerpa@mines.edu

УДК 620.193.47
МРНТИ 81.33.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-2-49-59>

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИНЫ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НЕФТЕПРОВОДОВ

САДЫКОВА Н.Ж.¹, УТЕЛБАЕВ Б.Т.², ШАРИПОВ Р.Х.¹, БАЛГИМБАЕВА У.А.¹,
СУЛЕЙМЕНОВ Э.Н.¹

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

²Институт химических наук им. А.Б. Бектурова,
050000, г.Алматы, Казахстан

Аннотация. Трубопроводный транспорт считается самым эффективным и экономически целесообразным видом в отличие от железнодорожного, сухопутного или других видов транспорта. Транспортируемые продукты – как правило, нефтепродукты – с различными физическими и механическими свойствами способны оказывать различное негативное влияние на материал трубопровода, тем самым вызывая коррозию, износ, утечку и выбросы. Актуальность исследований в этом направлении обусловлена тем, что из-за относительно сложного состава нефтей Казахстана во время перекачки нефти трибоэлектрические эффекты на границе раздела фаз вызывают возникновение электрических зарядов, которые приводят к повышению эффективности химических реакций, вызывающих коррозию материала трубопроводов. Поэтому необходима разработка специфических способов защиты нефтепроводов от разрушений, вызванных коррозией металлов. ИК-спектроскопический анализ нефти показывает наличие различных видов углеводородов. На основе разгонки нефти АО «Озенмунайгаз» сложность в молекулярном составе нефти вызывает электрические эффекты, приводящие к увеличению скорости коррозии. Все это надо учитывать при разработке защиты от коррозии. В процессе транспортировки в объеме нефти и нефтепродуктов благодаря сложной микроструктуре и определенной гетерогенности макроструктуры могут образовываться электростатические заряды. Так как при трибоэлектрических эффектах происходит электризация, а также тепловыделение, данные процессы требуют уточнения процессов теплопередачи на микро-, макроуровне. При этом разность потенциалов между отдельными участками объема жидкости может быть достаточно велика. В работе использовались химические и физико-химические методы инструментального анализа. В настоящей работе были получены экспериментальные значения удельной электропроводности нефти и нефтепродуктов в лабораторных условиях, которые позволяют судить об их диэлектрическом характере. В данной работе был изучен трибоэлектрический эффект на месте границы металлов и органических жидкостей (нефть, мазут и т.п.), чтобы определить их влияние на коррозию металлов трубопроводов, и установлены значения электропроводности нефтей и нефтепродуктов.

Ключевые слова: коррозия, потенциал, нефть, мазут, трибоэлектрический эффект трубопровод, ИК-спектроскопический анализ, причины коррозии.

МЕТАЛЛ МҰНАЙ ҚҰБЫРЛАРЫНЫҢ ТОТТАНУ СЕБЕПТЕРІН ЗЕРТТЕУ

САДЫКОВА Н.Ж.¹, УТЕЛБАЕВ Б.Т.², ШАРИПОВ Р.Х.¹, БАЛГИМБАЕВА У.А.¹,
СУЛЕЙМЕНОВ Э.Н.¹¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы, Қазақстан²А.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты, 050000, Алматы қ., Қазақстан

Аңдатпа. Құбыр көлігі теміржол, құрлық немесе басқа тасымалдау түрлеріне қарағанда ең тиімді және экономикалық тұрғыдан орынды болып саналады. Тасымалданатын өнімдер, әдетте, мұнай өнімдері, әртүрлі физикалық және механикалық қасиеттері бар, олар құбыр материалына әртүрлі теріс әсер етуі мүмкін, осылайша коррозия, тозу, ағып кету және шығарындылар тудырады. Бұл бағыттағы зерттеулердің өзектілігі мұнай айдау кезінде Қазақстан мұнайларының салыстырмалы түрде күрделі құрамына байланысты фазалар шекарасындағы трибоэлектрлік әсерлер электр зарядтарының пайда болуына әкеліп соғады, бұл құбыр материалының коррозиясын тудыратын химиялық реакциялардың тиімділігін арттырады. Сондықтан мұнай құбырларын металдардың коррозиясынан болатын бұзылулардан қорғаудың нақты әдістерін жасау қажет. Мұнайдың ИҚ спектроскопиялық талдауы көмірсутектердің әртүрлі түрлерінің болуын көрсетеді. "Өзенмұнайгаз" АҚ мұнай айдау негізінде мұнайдың молекулалық құрамындағы қиындық коррозия жылдамдығының артуына әкелетін электрлік әсерлерді тудырады. Мұның бәрі коррозиядан қорғауды дамыту кезінде ескерілуі керек. Мұнай мен мұнай өнімдерін тасымалдау процесінде күрделі микроқұрылым мен макроқұрылымның белгілі бір гетерогенділігіне байланысты электростатикалық зарядтар пайда болуы мүмкін. Триболитикалық эффекттерде электрлену, сондай-ақ жылу бөлу жүретіндіктен, бұл процестер микро-макро деңгейдегі жылу беру процестерін нақтылауды қажет етеді. Бұл жағдайда сұйықтық көлемінің жеке бөлімдері арасындағы ықтимал айырмашылық айтарлықтай үлкен болуы мүмкін. Жұмыста аспаптық талдаудың химиялық және физика-химиялық әдістері қолданылды. Зертханалық жағдайда мұнай мен мұнай өнімдерінің нақты электр өткізгіштігінің эксперименттік мәндері алынды, бұл олардың диэлектрлік сипатын бағалауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыста олардың құбыр металдарының коррозиясына әсерін анықтау үшін металдар мен органикалық сұйықтықтардың (мұнай, мазут және т.б.) шекарасындағы жердегі трибоэлектрлік әсер зерттелді және мұнай мен мұнай өнімдерінің электр өткізгіштік мәндері белгіленді.

Түйінді сөздер: коррозия, потенциал, мұнай, мазут, трибоэлектрлік эффектiлi құбыр, коррозия, ИҚ-спектроскопиялық талдау, коррозия себептері.

STUDY OF THE REASONS FOR CORROSION OF METALLIC OIL

SADYKOVA N.ZH.¹, UTELBAYEV B.T.², SHARIPOV R.H.¹,
BALGIMBAYEVA U.A.¹, SULEIMENOV E.N.¹¹ Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan² Institute of Chemical Sciences named after A.B.Bekturov, 050000, Almaty, Kazakhstan

Abstract. Pipeline transport is considered to be the most efficient and economically feasible type, unlike rail, land or other types of transportation. Transported products are usually petroleum products with various physical and mechanical properties that can have various negative effects

on the pipeline material, thereby causing corrosion, wear, leakage and emissions. The relevance of research in this direction is due to the fact that due to the relatively complex composition of Kazakhstan's oils during oil pumping, triboelectric effects at the phase interface cause the occurrence of electric charges, which lead to an increase in the efficiency of chemical reactions that cause corrosion of the pipeline material. Therefore, it is necessary to develop specific ways to protect oil pipelines from damage caused by metal corrosion. IR spectroscopic analysis of oil shows the presence of various types of hydrocarbons. Based on the oil dispersal of JSC Ozenmunaigas, the complexity in the molecular composition of oil causes electrical effects that lead to an increase in the corrosion rate. All this should be taken into account when developing corrosion protection. In the process of transportation in the volume of oil and petroleum products, due to the complex microstructure and certain heterogeneity of the macrostructure, electrostatic charges can be formed. Since electrification and heat generation occur during tribolytic effects, these processes require refinement of heat transfer processes at the micro-macro level. In this case, the potential difference between individual sections of the liquid volume can be quite large. Chemical and physico-chemical methods of instrumental analysis were used in the work. In this work, experimental values of the specific electrical conductivity of oil and petroleum products were obtained under laboratory conditions, which allow us to judge their dielectric nature. In this work, the triboelectric effect was studied at the site of the boundary of metals and organic liquids (oil, fuel oil, etc.) to determine their effect on the corrosion of pipeline metals. and the values of electrical conductivity of oils and petroleum products are established.

Keywords: *corrosion, potential, oil, fuel oil, pipeline with triboelectric effect, corrosion, IR spectroscopic analysis, causes of corrosion.*

Введение

При транспортировке нефти, газа и их продуктов по трубопроводам коррозия металлических изделий существенным образом оказывает влияние на экологическую обстановку в результате загрязнения окружающей среды продуктами органических веществ [1–9]. На сегодняшний день тема охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов в условиях роста промышленного производства – одна из самых актуальных проблем. Неоднократно в своих посланиях Президент Республики Казахстан поднимал вопрос об охране окружающей среды, рациональном природопользовании, внедрении наилучших существующих технологий, а также вопросы недропользования [10]. Экологические исследования, проведенные в последние десятилетия во многих странах мира, показали, что всевозрастающее разрушительное воздействие антропогенных факторов на окружающую среду может привести к экологическому кризису. При добыче, транспортировке и переработке нефти-сырца в резуль-

тате аварийных ситуаций и несоблюдения технических требований разлитая нефть и нефтепродукты оказывают негативное влияние на окружающую среду. В литературе главным образом рассматриваются аспекты эксплуатации технологического оборудования химической, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, энергетики, транспорта, судостроения в связи с обеспечением условий безопасности и надежности. Это вызвано тем, что, например, под воздействием агрессивных сред на металлоконструкции происходит как общая, так и локальная коррозия, что увеличивает затраты на изготовление, монтаж и ремонт оборудования [11–20]. Точечная (питтинговая) коррозия представляет собой один из опасных видов локального коррозионного разрушения, которое может вызвать растрескивание трубопроводов под давлением протекающей жидкости [13–16]. Необходимы исследования причин, обуславливающих коррозию, и разработка инновационных методов предотвращения коррозии металлов. Следовательно, требуется более тщательный

анализ электрофизических свойств нефтей и нефтепродуктов, транспортирующихся по нефтепроводам. Эти свойства недостаточно изучены, особенно в части возникновения электрофоретических эффектов при движении отдельных компонентов жидкости относительно друг друга [21, 22].

Общеизвестно, что трибология изучает взаимодействие соприкасающихся поверхностей веществ при их перемещении относительно друг друга и связанных с ним энергетических проявлениях. В свою очередь, трибоэлектрический эффект, связанный с появлением электрических зарядов у веществ, наблюдается не только из-за трения, но и при обыкновенном контакте. То есть при соприкосновении поверхностей разнородных материалов они становятся электрически заряженными. При соприкосновении поверхностей в результате деформации структур происходит изменение структурно-энергетического соответствия. Данное явление взаимодействия двух веществ вызвано отличием структурно-энергетического состояния макроскопических образований. Влияние геометрических размеров вещества на его физико-химические свойства широко обсуждается в области технологии, нанотехнологии и естествознания. При этом структурно-энергетическое состояние на границе раздела фаз вещества отличается от объемной фазы. Следовательно, существует необходимость углубленного изучения зависимости строения вещества от его микро-, макроскопических характеристик и его структурных элементов как единого взаимосвязанного объекта. Нефть и нефтепродукты являются источником пожарной опасности, в том числе вызываемой наличием электрических зарядов, обусловленных трибоэлектрическими эффектами. Эти обстоятельства требуют более детального изучения названных систем. Механизм возникновения электростатических зарядов между поверхностями двух движущихся жидкостей, жидкость – твердая поверхность тел до сих пор изучен недостаточно и требует фундаментального решения проблемы. Целью настоящей работы является изучение состава нефти месторожде-

ния АО «Озенмунайгаз» и ее электрических свойств при транспортировке по трубопроводу.

Экспериментальная часть

В работе использовались химические и физико-химические методы инструментального анализа.

Анализ и методика экспериментальных работ проводились согласно стандартам и ГОСТам: ГОСТ 2177–99 «Нефтепродукты». Методы определения фракционного состава. ГОСТ 2517–12 «Нефть и нефтепродукты». Методы отбора проб. Разгонку нефти проводили на установке АРН-3 по ГОСТ 11011-85. Выделение парафино-нафтеновых и смолистых углеводородов от асфальтенов осуществляли с помощью растворителей марки «Чистый».

Анализ углеводородов проводили на газожидкостном хроматографе Chrom-4 с ионизационно-пламенной детекцией. Температура испарителя 300 °С, а колонки – 250 °С. Газ-носитель – аргон. Твердый носитель – силанизированный хроматон. Скорость газа-носителя – 50 см³/мин. ИК-спектры образцов снимали на спектрометре ИКС-29. Рентгенодифрактометрический анализ проведен на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: $U=35$ кВ; $I=20$ мА; съемка θ -2 θ ; детектор 2 град/мин. Рентгенофазовый анализ на полуквантитативной основе выполнен по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Определялись количественные соотношения кристаллических фаз. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием данных картотеки ICDD: база порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) и дифрактограмм, чистых от примесей минералов.

Предварительными опытами проводилась оценка погрешности результатов измерений с помощью стандартного отклонения статистическим методом при доверительной вероятности 0.95 по критерию Стьюдента.

Для определения трибоэлектрических эф-

фектов на границе металлоорганических жидкостей (нефть, мазут) определяли электрофизическое свойства нефтепродуктов (бензин, керосин) согласно методике [23].

Результаты и обсуждение

Для определения трибоэлектрических эффектов нефти и нефтепродуктов в первую очередь был определен состав нефти месторождения Озенмунайгаз Мангистауской области. Особое место занимает нефть и нефтепродукты, которые отличаются по физико-химическим характеристикам. Элементный состав нефти АО «Озенмунайгаз» приведен в таблице 1.

ИК-спектроскопический анализ фракций образцов 50–320 °С показывает полосы поглощения, характерные для алифатических функциональных групп углеводородов (2953.7; 2920.5; 2850.2; 1463.1; 1377.0; 723.0 и 719.7 см⁻¹) (рисунок 1, стр. 54). Симметричные и асимметричные валентные колебания для СН₃-групп при 2885–2865 см⁻¹ и 2975–2950 см⁻¹ соответственно и для СН₂-групп симметричные около 2870–2840 см⁻¹ и асимметричные около 2930 см⁻¹, а деформационные и асимметричные деформационные колебания СН₃-групп наблюдаются при 1470–1440 см⁻¹. Данная полоса перекрывает-

Таблица 1 – Элементный состав нефти АО «Озенмунайгаз»

Пробы нефти	Содержание элементов, %					Другие, %
	С	Н	N	S	О	
Нефть 1	85,1	13,6	0,4	1,8	1,4	1,1
Нефть 2	85,0	12,8	0,2	2,0	1,1	0,3
Нефть 3	84,4	12,0	0,2	1,7	1,3	0,4

По содержанию серы нефть относится ко второму классу. По элементному составу нефти отличаются по содержанию серы. У нефти содержание кислорода увеличивается от 1,3 до 1,4% масс, азота – от 0,2 до 0,4% масс.

ся ножничным колебанием СН₂, которое возникает при 1490–1440 см⁻¹, симметричное колебание СН₃ происходит при 1390–1370 см⁻¹ (рисунок 1, стр 54).

Таблица 2 – Физико-химические характеристики нефти АО «Озенмунайгаз»

Наименование	Нефть 1	Нефть 2	Нефть 3
Вид	Темно-коричневый	Темный	Темно-коричневый
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,816	0,844	0,864
Содержание воды, %	0,6	0,7	0,8
Концентрация хлоридов, мг/л	450	560	600
Кинематическая вязкость, мм ² /с (20°С)	56	60	64
Температура застывания, °С	15- 20	18-21	14-18
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	58	56	60
Коксуемость, %	4,6	4,8	5,0
Остаток после разгонки 320 °С, в т.ч. (%):	48,0	47,5	47,4
Парафино-нафтены	26,0	26,5	25,4
Арены	9,0	9,5	9,6
Смолы	7,0	7,0	7,0
Асфальтены	5,0	4,0	5,0
Другие	1,0	0,5	0,4

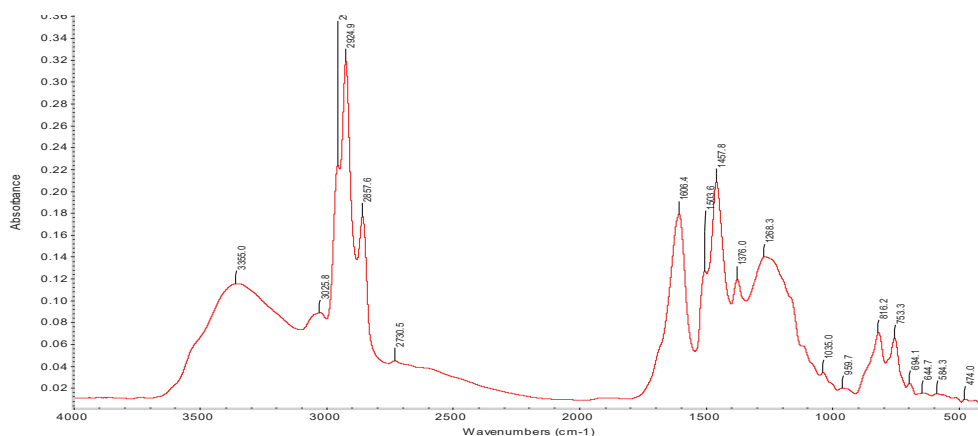


Рисунок 1 – ИК-спектр нефти месторождения АО «Озенмунайгаз»

Следует отметить, что превышение по интенсивности полос поглощения метиленовых групп над метильными, имеющихся в образцах, свидетельствует о преобладании высокомолекулярных соединений со звеном $-\text{CH}_2-$ удлинённых углеродных цепей, характерных для асфальто-смолистых соединений. В пользу этого служит расщепление полос поглощения в области 720 см^{-1} (723 и 719.7 см^{-1}), характерное для метиленовых цепочек. Кроме того, отчетливое проявление поглощения в области 720 см^{-1} (частично смещённый от $710\text{--}690 \text{ см}^{-1}$) относится к полициклическим ароматическим соединениям, характерным для смол. Эти соединения в результате индуктивных и мезомерных эффектов, возникающих в местах, где происходит перемещение электронов, обуславливают возникновение локальных электрических потенциалов и триболических эффектов.

бует уточнения процессов теплопередачи на микро-, макроуровне.

В процессе транспортировки в объеме нефти и нефтепродуктов благодаря сложной микроструктуре и определенной гетерогенности макроструктуры могут образовываться электростатические заряды. При этом разность потенциалов между отдельными участками объема жидкости может быть достаточно велика. Полученные экспериментальные значения удельной электропроводности нефти и нефтепродуктов в лабораторных условиях позволяют судить об их диэлектрическом характере. Установлены значения электропроводности нефтей и нефтепродуктов (таблица 3).

Очевидно, что нефть и нефтепродукты являются плохими проводниками. По литературным данным, удельная электрическая проводимость составляет для сырой нефти $10^{-5}\text{--}10^{-8} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Однако даже незначитель-

Таблица 3 – Значение удельной электропроводности нефти и нефтепродуктов

Нефть и нефтепродукты	Удельная электропроводность, $\text{см} \cdot \text{м}^{-1}$
Нефть Озенмунайгаз	$1 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5}$
Мазут	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-9}$
Бензин (Н.к – 140°C)	$4 \cdot 10^{-11} - 6 \cdot 10^{-12}$
Керосин (фр. $140\text{--}180^\circ\text{C}$)	$1 \cdot 10^{-10} - 4,6 \cdot 10^{-12}$
Авиационный бензин (фр. $40\text{--}180^\circ\text{C}$)	$1,1 \cdot 10^{-11} - 4,6 \cdot 10^{-11}$
Реактивное топливо (фр. $180\text{--}260^\circ\text{C}$)	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-12}$
Дизель (фр. $220\text{--}280^\circ\text{C}$)	$3 \cdot 10^{-11} - 5 \cdot 10^{-11}$
Газойль (фр. $240\text{--}350^\circ\text{C}$)	$2 \cdot 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-9}$

Как известно, при триболических эффектах не только происходит электризация, но имеет место тепловыделение, которое тре-

ное содержание примесей и при движении этих жидкостей вызывает образование электростатических зарядов. При механическом

перемещении компонентов нефти относительно друг друга возникает поляризация молекул углеводородов, в результате которой возникает межфазная разность потенциалов. Любое нарушение этого равновесного состояния приводит к поляризации «электромагнитных частиц» на поверхности веществ и создает разность потенциалов [23]. Накопление электростатических зарядов в итоге может реализовываться в виде искрового разряда, химического процесса и возникновения коррозионных процессов. Это приводит к возникновению возгорания нефтепродуктов, разрушению трубопроводов, преждевременному выходу из строя деталей оборудования.

Показано, что появление электрических эффектов, т.е. возникновение электрического потенциала у трубопроводов с нефтепродуктами, вызывает возникновение процесса коррозии. В [25] отмечено, что физико-химические свойства веществ определяются строением первичных элементов микроструктуры – «химических индивидов». При трении и деформации материалов «электромагнитные частицы» поляризуются, изме-

няется электромагнитное взаимодействие и выделяются «электромагнитные частицы» в виде теплоты и других форм передачи энергии [26]. Кроме того, изучение электрических эффектов позволит выявить причины возникновения протекания различных нежелательных процессов, таких как разрушение материалов в результате коррозий и триболических эффектов.

Заключение

Установлена недостаточность наших знаний о механизме и причинах возникновения коррозии на границе нефть и нефтепродукты/металл. Выявлены причины изменения, происходящего в микроструктуре с возникновением электрических потенциалов, которые обусловлены трибоэлектрическими эффектами, что отражается в изменениях свойств макроскопического образования. Предотвращение возникновения электрических потенциалов и микрогальванических пар позволяет моделировать взаимодействующие поверхности и в перспективе разработать эффективные электрофизические методы защиты металлов от коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Мешечко Е.Н. Основы экологии / Е.Н. Мешечко. – М.: Экоперспектива, 2018. – 376 с.
- 2 Мартынюк В.Ф. Защита окружающей среды в чрезвычайных ситуациях / В.Ф. Мартынюк, Б.Е. Прусенко. – М.: Нефть и газ, 2020. – 336 с.
- 3 Перелет Р.А. Наше общее будущее. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР) / ред. С.А. Евтеев, Р.А. Перелет. – М.: Прогресс, 2020. – 376 с.
- 4 Маврищев В.В. Основы экологии / В.В. Маврищев. – Минск: Вышэйшая школа, 2019. – 447 с.
- 5 Павлова Е.И. Общая экология: Учебник и практикум для прикладного бакалавриата / Е.И. Павлова, В.К. Новиков. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 190 с.
- 6 Корытный Л.М. Экологические основы природопользования: Учебное пособие для СПО / Л.М. Корытный, Е.В. Потапова. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 374 с.
- 7 Гурова Т.Ф. Экология и рациональное природопользование: Учебник и практикум для академического бакалавриата / Т.Ф. Гурова, Л.В. Назаренко. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 188 с.
- 8 Жуйкова Т.В. Экологическая токсикология: Учебник и практикум для академического бакалавриата и магистратуры / Т.В. Жуйкова, В.С. Безель. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 362 с.
- 9 Ларионов Н.М. Промышленная экология: Учебник и практикум для СПО /

Н.М. Ларионов, А.С. Рябышенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 382 с.

10 Казахстан в новой реальности: время действий («Озеленение» экономики, охрана окружающей среды). Послание Президента Республики Казахстан К. Токаева (1 сентября 2020 года).

11 Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии: Учебное пособие / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. – М. : Физматлит, 2010. – 416 с.

12 Зарубина Л.П. Защита зданий, сооружений, конструкций и оборудования от коррозии. Биологическая защита. Материалы, технологии, инструменты и оборудование / Л.П. Зарубина. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. – 224 с.

13 Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. – М.: Физматлит, 2010. – 416 с.

14 Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. – М. : Высш. шк., 1984.

15 Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. – М.: Металлургия, 1985. – 88 с.

16 Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов.

17 Улиг Г.Г., Ревы Р.О. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.

18 Мустафин Ф.М. Защита трубопроводов от коррозии: в 2 т. / Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков и др. – М.: Недра, 2007. – 708 с. – т. 2.

19 Мустафин Ф.М. Защита трубопроводов от коррозии: в 2 т. / Ф.М. Мустафин, М.В. Кузнецов и др. – М.: Недра, 2005. – 620 с. – т.1.

20 Хайдерсбах Р. Защита от коррозии и металловедение оборудования для добычи нефти и газа / Р. Хайдерсбах. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2014. – 416 с.

21 Замок GS, Шейн Л.Б. Общая модель контактной электрификации изолятора сферасфера. // Журнал электростатики. – №36(2). – 1995. – С.165–173. DOI:10.1016/0304-3886(95)00043-7.

22 Утелбаев Б.Т., Сулейменов Э.Н., Утелбаева А.Б., Шарипов Р.Х. Трибоэлектризация и электромагнитная материя. // Наука и мир. – 2020. – № 9 (85). – С. 17–23.

23 Устройство для оценки электризации жидких нефтепродуктов (2018). – URL: <https://findpatent.ru/patent/264/2642257.html>

24 Utelbayev B.T., Suleimenov E.N., Utelbayeva A.B.. Atomic Molecular Struture of Substances and Energy Manifistations // Global journal of Science Frontier Research: Physics and Space Science, vol.20, issue 1, version 1, 2020, pp. 1–6.

25 Utelbayev B.T., Suleimenov E.N., Utelbayeva A. & Zhanabai N., 2019. Role of Atomic-Molecular Formations in Chemistry. Theory and Applications of Chemistry, vol. 1, pp. 88–97. Retrieved from <https://stm1.bookpi.org/index.php/tac-v1/article/view/100>

26 Утелбаева А.Б., Жанабай Н., Сулейменов Э.Н., Утелбаев Б.Т. Электрическая и магнитная компоненты элементарных «электромагнитных частиц» // Тенденция развития науки и образования. – 2021. – № 80. – Ч.5. – С.167–176. DOI: 10.18411/trnio-12 -2021-257.

REFERENCES

1 Meshechko E.N. (2018) Osnovy jekologii. Ed. E.N. Meshechko. Moscow, Jekoperspektiva, 376 p.

2 Martynjuk V.F. (2020) Zashhita okruzhajushhej sredy v chrezvychajnyh situacijah. Ed. V.F. Martynjuk, B.E. Prusenko. Moscow, Neft' i gaz, 336 p.

3 Perelet R.A. (2020) Nashe obshhee budushhee. Doklad Mezhdunarodnoj komissii po okruzhajushhej srede i razvitiju (MKOSR). Ed. S.A. Evteev, R.A. Perelet. Moscow, Progress, 376 p.

4 Mavrishhev V.V. (2019) Osnovy jekologii. Ed. V.V. Mavrishhev. Minsk, Vyshnejshaja shkola, 447 p.

- 5 Pavlova E.I. (2019) Obshhaja jekologija. Ed. E.I. Pavlova, V.K. Novikov. Moscow, Izdatel'stvo Jurajt, 190 p.
- 6 Korytnyj L.M. (2019) Jekologicheskie osnovy prirodopol'zovanija. Ed. L.M. Korytnyj, E.V. Potapova. 2nd ed. Moscow, Jurajt, 374 p.
- 7 Gurova T.F. (2019) Jekologija i racional'noe prirodopol'zovanie. Ed. T.F. Gurova, L.V. Nazarenko. 3rd ed. Moscow, Jurajt, 188 p.
- 8 Zhujkova T.V. (2019) Jekologicheskaja toksikologija. Ed. T.V. Zhujkova, V.S. Bezel'. Moscow, Jurajt, 362 p.
- 9 Larionov N.M. (2018) Promyshlennaja jekologija. Ed. N.M. Larionov, A.S. Rjabyshenkov. 2nd ed. Moscow, Jurajt, 382 p.
- 10 Kazakhstan v novoj real'nosti: vremja dejstvij («Ozelenenie» jekonomiki, ohrana okruzhajushhej sredy). Poslanie Prezidenta Respubliki Kazakhstan K. Tokaeva (1 sentjabrja 2020 goda).
- 11 Semenova I.V. (2010) Korrozija i zashhita ot korrozii. Ed. I.V. Semenova, G.M. Florianovich, A.V. Horoshilov. Moscow, Fizmatlit, 416 p.
- 12 Zarubina L.P. (2015) Zashhita zdaniy, sooruzhenij, konstrukcij i oborudovanija ot korrozii. Biologicheskaja zashhita. Materialy, tehnologii, instrumenty i oborudovanie. Ed. L.P. Zarubina. Vologda, Infra-Inzhenerija, 224 p.
- 13 Semenova I.V. (2010) Korrozija i zashhita ot korrozii. Ed. I.V. Semenova, G.M. Florianovich, A.V. Horoshilov. Moscow, Fizmatlit, 416 p.
- 14 Antropov L. I. (1984) Teoreticheskaja jelektrohimija. Moscow, Vyssh. shk.
- 15 Kolotyrkin Ja.M. (1985) Metall i korrozija. Moscow, Metallurgija, 88 p.
- 16 Rozenfel'd I.L. Atmosfernaja korrozija metallov.
- 17 Ulig G.G., Revi R.O. (1989) Korrozija i bor'ba s nej. Vvedenie v korrozionnuju nauku i tehniku. L., Himija, 456 p.
- 18 Mustafin F.M. (2007) Zashhita truboprovodov ot korrozii. Ed. F.M. Mustafin, L.I. Bykov. Moscow, Nedra, 708 p., t. 2.
- 19 Mustafin F.M. (2005) Zashhita truboprovodov ot korrozii: v 2 t. / F.M. Mustafin, M.V. Kuznecov i dr. Moscow.: Nedra, vol. 1, 620 p.
- 20 Hajdersbah R. (2014) Zashhita ot korrozii i metallovedenie oborudovanija dlja dobychi nefti i gaza. Ed. R. Hajdersbah. Vologda, Infra-Inzhenerija, 416 p.
- 21 Zamok GS, Shejn L.B. (1995) Obshhaja model' kontaktnoj jelektrifikacii izoljatora sfera-sfera. Zhurnal jelektrostatiki, no 36 (2), pp.165–173. DOI:10.1016/0304-3886(95)00043-7.
- 22 Utelbaev B.T., Sulejmenov Je.N., Utelbaeva A.B., Sharipov R.H. (2020) Tribojelektrizacija i jelektromagnitnaja materija. Nauka i mir, no 9 (85), pp. 17–23.
- 23 Ustrojstvo dlja ocenki jelektrizacii zhidkih nefteproduktov (2018). URL: <https://findpatent.ru/patent/264/2642257.html>
- 24 Utelbayev B.T., Suleimenov E.N., Utelbaeva A.B.. Atomic Molecular Struture of Substances and Energy Manifistations. Global journal of Science Frontier Research: Physics and Space Science, vol.20, issue 1, version 1, 2020, pp. 1–6.
- 25 Utelbayev B.T., Suleimenov E.N., Utelbayeva A. & Zhanabai N., 2019. Role of Atomic-Molecular Formations in Chemistry. Theory and Applications of Chemistry, vol. 1, pp. 88–97. Retrieved from <https://stm1.bookpi.org/index.php/tac-v1/article/view/100>.
- 26 Utelbaeva A.B., Zhanabaj N., Sulejmenov Je.N., Utelbaev B.T. (2021) Jelektricheskaja i magnitnaja komponenty jelementarnyh «jelektromagnitnyh chastic». Tendencija razvitija nauki i obrazovanija, no 80, pp.167–176. DOI: 10.18411/trnio-12 -2021-257.

Сведения об авторах

Садыкова Назерке Жунисбеккызы (автор для корреспонденции)

Магистрант НОЦМиПК АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-8435-1083

E-mail: n_sadykova@kbtu.kz

Утелбаев Болысбек Тойчибекович

Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт химических наук им. А.Б. Бектурова, ул. Ш. Уалиханова, 106, 050010, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-3794-4833

E-mail: b.utelbayev@mail.ru

Шарипов Рустам Хасанович

Магистр, руководитель НОЦМиПК АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-1670-9914

E-mail: freedom.k@mail.ru

Балгимбаева Улпан Аманкоскызы

Магистр, координатор магистерских и докторских программ НОЦМиПК АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-6051-5538

E-mail: balgimbayeva@inbox.ru

Сулейменов Эсен Нургалиевич

Доктор технических наук, главный научный сотрудник НОЦМиПК АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-6992-3028

E-mail: metallaim@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Садыкова Назерке Жунисбеккызы (корреспонденция авторы)

Магистрант НОЦМиПК АО «КБТУ», Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-8435-1083

E-mail: n_sadykova@kbtu.kz

Утелбаев Болысбек Тойчибекович

Техника ғылымдарының докторы, профессор, жетекші ғылыми қызметкер, А.Б.Бектұров атындағы химия ғылымдарының институты, Ш. Уәлиханов көш., 106, 050010, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-3794-4833

E-mail: b.utelbayev@mail.ru

Шарипов Рустам Хасанович

Магистр, НОЦМиПК АО «КБТУ» төрағасы, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-1670-9914

E-mail: freedom.k@mail.ru

Балгимбаева Улпан Аманкоскызы

Магистр, НОЦМиПК АО «КБТУ» магистрлік және докторлық бағдарламалардың координаторы, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-6051-5538

E-mail: balgimbayeva@inbox.ru

Сулейменов Эсен Нурғалиевич

Техника ғылымдарының докторы, НОЦМиПК АО «КБТУ» бас ғылыми қызметкері, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-6992-3028

E-mail: metallaim@mail.ru

Information about authors

Sadykova Nazerke Zhunisbekkyzy (corresponding author)

Master's student of Scientific Educational Center of Science and Corrosion Problems, Kazakh-British Technical University, Tole bi st., 59, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-8435-1083

E-mail: n_sadykova@kbtu.kz

Utelbayev Bolysbek Toichibekovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, Institute of Chemical Sciences named after A.B.Bekturov, Sh. Ualikhanov, 106, 050010, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-3794-4833

E-mail: b.utelbayev@mail.ru

Sharipov Rustam Hasanovich

Master, Head of Scientific Educational Center of Science and Corrosion Problems, Kazakh-British Technical University, Tole bi st., 59, 050010, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-1670-9914

E-mail: freedom.k@mail.ru

Balgimbayeva Ulpan Amankoskyzy

Master, coordinator of master's and doctoral programs of Scientific Educational Center of Science and Corrosion Problems, Kazakh-British Technical University, Tole bi st., 59, 050010, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-6051-5538

E-mail: balgimbayeva@inbox.ru

Suleimenov Esen Nurgalievich

Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of Scientific Educational Center of Science and Corrosion Problems, Kazakh-British Technical University, Tole bi st., 59, 050010, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-6992-3028

E-mail: metallaim@mail.ru

ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ

HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY

ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ответственный за выпуск

Есбергенов Досым Бектенович

Редакторы

Мазибаева Жанар Оралхановна
Скуратова Ирина Михайловна

Компьютерный дизайн и верстка

Жадыранова Гульнур Даутбековна

Подписано в печать 17.06.2022 г.
Тираж 300 экз. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага тип. Уч.-изд.л. 3,5 Заказ №181

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