ISSN 2518-7198 (Print)
ISSN 2663-5089 (Online)

№ 4(96)/2019

ФИЗИКА сериясы
Серия ФИЗИКА
PHYSICS Series

ҚАРАҒАНДЫ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК КАРАГАНДИНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

BULLETIN OF THE KARAGANDA UNIVERSITY

ISSN 2518-7198 (Print)
ISSN 2663-5089 (Online)
Индексі 74616
Индекс 74616

ҚАРАҒАНДЫ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК КАРАГАНДИНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

BULLETIN OF THE KARAGANDA UNIVERSITY

ФИЗИКА сериясы

Серия ФИЗИКА

PHYSICS Series

№ 4(96)/2019

Қазан–қараша–желтоқсан
30 желтоқсан 2019 ж.

Октябрь–ноябрь–декабрь
30 декабря 2019 г.

October–November–December
December, 30, 2019

1996 жылдан бастап шығады
Издается с 1996 года
Founded in 1996

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

Қарағанды, 2019
Караганда, 2019
Karaganda, 2019

Бас редакторы

химия ғыл. д-ры, профессор, ҚР ҰҒА корр.-мүшесі

Е.М. Тажбаев

Жауапты хатшы **Ғ.Б. Саржанова**, PhD д-ры

Редакция алқасы

Б.Р. Нүсіпбеков, ғылыми редактор техн. ғыл. канд. (Қазақстан);
Т.Ә. Көкетайтегі, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
Н.Х. Ибраев, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
А.О. Сәулебеков, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
И.В. Брейдо, техн. ғыл. д-ры (Қазақстан);
И.П. Курытник, техн. ғыл. д-ры (Польша);
М. Стоев, PhD д-ры (Болгария);
М.М. Кидибаев, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қырғызстан);
З.Ж. Жаңабаев, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
Г.В. Климушева, физ.-мат. ғыл. д-ры (Украина);
С.Е. Көмеков, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
В.М. Лисицын, физ.-мат. ғыл. д-ры (Ресей);
И.Н. Огородников, физ.-мат. ғыл. д-ры (Ресей);
О.П. Пчеляков, физ.-мат. ғыл. д-ры (Ресей);
А.Т. Акылбеков, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
А.Ж. Тұрмұхамбетов, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
К.Ш. Шүңкеев, физ.-мат. ғыл. д-ры (Қазақстан);
В.Ю. Кучерук, техн. ғыл. д-ры (Украина);
В.А. Кульбачинский, физ.-мат. ғыл. д-ры (Ресей);
Л.В. Чиркова, жауапты хатшы техн. ғыл. канд. (Қазақстан)

Редакцияның мекенжайы: 100024, Қазақстан, Қарағанды қ., Университет к-сі, 28
Тел.: (7212) 77-03-69 (ішкі 1026); факс: (7212) 77-03-84.
E-mail: vestnick_kargu@ksu.kz; tchlv_53@mail.ru (*жауапты хатшы*)
Сайты: https://physics-vestnik.ksu.kz/

Редакторлары

Ж.Т. Нурмуханова, С.С. Балкеева

Компьютерде беттеген

В.В. Бутяйкин

Қарағанды университетінің хабаршысы. «Физика» сериясы.

ISSN 2518-7198 (Print). ISSN 2663-5089 (Online).

Меншік иесі: «Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті» РММ.

Қазақстан Республикасының Мәдениет және ақпарат министрлігімен тіркелген. 23.10.2012 ж. № 13111–Ж тіркеу куәлігі.

Басуға 28.12.2019 ж. қол қойылды. Пішімі 60×84 1/8. Қағазы офсеттік. Көлемі 13,37 б.т. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша. Тапсырыс № 133.

Е.А. Бөкетов атындағы ҚарМУ баспасының баспаханасында басылып шықты.
100012, Қазақстан, Қарағанды қ., Гоголь к-сі, 38. Тел. 51-38-20. E-mail: izd_kargu@mail.ru

© Қарағанды мемлекеттік университеті, 2019

Главный редактор

д-р хим. наук, профессор, чл.-корр. НАН РК

Е.М. Тажбаев

Ответственный секретарь **Г.Б. Саржанова**, д-р PhD

Редакционная коллегия

Б.Р. Нусупбеков,	научный редактор канд. техн. наук (Казахстан);
Т.А. Кокетайтеги,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
Н.Х. Ибраев,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
А.О. Саулебеков,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
И.В. Брейдо,	д-р техн. наук (Казахстан);
И.П. Курытник,	д-р техн. наук (Польша);
М. Стоев,	д-р PhD (Болгария);
М.М. Кидибаев,	д-р физ.-мат. наук (Кыргызстан);
З.Ж. Жанабаев,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
Г.В. Климушева,	д-р физ.-мат. наук (Украина);
С.Е. Кумеков,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
В.М. Лисицын,	д-р физ.-мат. наук (Россия);
И.Н. Огородников,	д-р физ.-мат. наук (Россия);
О.П. Пчеляков,	д-р физ.-мат. наук (Россия);
А.Т. Акылбеков,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
А.Ж. Турмухамбетов,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
К.Ш. Шункеев,	д-р физ.-мат. наук (Казахстан);
В.Ю. Кучерук,	д-р техн. наук (Украина);
В.А. Кульбачинский,	д-р физ.-мат. наук (Россия);
Л.В. Чиркова,	ответственный секретарь канд. техн. наук (Казахстан)

Адрес редакции: 100024, Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28

Тел.: (7212) 77-03-69 (внутр. 1026); факс: (7212) 77-03-84.

E-mail: vestnick_kargu@ksu.kz; tchlv_53@mail.ru (*отв. секретарь*)

Сайт: https://physics-vestnik.ksu.kz/

Редакторы

Ж.Т. Нурмуханова, С.С. Балкеева

Компьютерная верстка

В.В. Бутяйкин

Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика».

ISSN 2518-7198 (Print). ISSN 2663-5089 (Online).

Собственник: РГП «Карагандинский государственный университет имени академика Е.А. Букетова».

Зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан. Регистрационное свидетельство № 13111–Ж от 23.10.2012 г.

Подписано в печать 28.12.2019 г. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Объем 13,37 п.л. Тираж 300 экз. Цена договорная. Заказ № 133.

Отпечатано в типографии издательства КарГУ им. Е.А. Букетова.
100012, Казахстан, г. Караганда, ул. Гоголя, 38, тел.: (7212) 51-38-20. E-mail: izd_kargu@mail.ru

© Карагандинский государственный университет, 2019

Main Editor

Doctor of Chemical sciences, Professor, Corresponding member of NAS RK

Ye.M. Tazhbayev

Responsible secretary **G.B. Sarzhanova**, PhD

Editorial board

B.R. Nusupbekov,	Science editor Cand. of techn. sciences (Kazakhstan);
T.A. Kuketaev,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
N.Kh. Ibrayev,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
A.O. Saulebekov,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
I.V. Breido,	Doctor of techn. sciences (Kazakhstan);
I.P. Kurytnik,	Doctor of techn. sciences (Poland);
M. Stoev,	PhD (Bulgaria);
M.M. Kidibaev,	Doctor of phys.-math. sciences (Kyrgyzstan);
Z.Zh. Zhanabaev,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
G.V. Klimusheva,	Doctor of phys.-math. sciences (Ukraine);
S.E. Kumekov,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
V.M. Lisitsyn,	Doctor of phys.-math. sciences (Russia);
I.N. Ogorodnikov,	Doctor of phys.-math. sciences (Russia);
O.P. Pchelyakov,	Doctor of phys.-math. sciences (Russia);
A.T. Akylbekov,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
A.Zh. Turmuhambetov,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
K.Sh. Shunkeyev,	Doctor of phys.-math. sciences (Kazakhstan);
V.Yu. Kucheruk,	Doctor of techn. sciences (Ukraine);
V.A. Kulbachinskii,	Doctor of phys.-math. sciences (Russia);
L.V. Chirkova,	Secretary Cand. of techn. sciences (Kazakhstan)

Postal address: 28, University Str., 100024, Karaganda, Kazakhstan

Tel.: (7212) 77-03-69 (add. 1026); fax: (7212) 77-03-84.

E-mail: vestnick_kargu@ksu.kz; tchlv_53@mail.ru (*secretary*)

Web-site: https://physics-vestnik.ksu.kz/

Editors

Zh.T. Nurmukhanova, S.S. Balkeyeva

Computer layout

V.V. Butyaikin

Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series.

ISSN 2518-7198 (Print). ISSN 2663-5089 (Online).

Proprietary: RSE «Academician Ye.A. Buketov Karaganda State University».

Registered by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan. Registration certificate No. 13111–Zh from 23.10.2012.

Signed in print 28.12.2019. Format 60×84 1/8. Offset paper. Volume 13,37 p.sh. Circulation 300 copies. Price upon request. Order № 133.

Printed in the Ye.A. Buketov Karaganda State University Publishing house.

100012, Kazakhstan, Karaganda, Gogol Str., 38, Tel.: (7212) 51-38-20. E-mail: izd_kargu@mail.ru

© Karaganda State University, 2019

МАЗМҰНЫ

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

Мейрамбай А., Ержанов К.К. Янг-Бакстер теңдеуінің әдістері арқылы алынған Шварцшильд деформацияланған метрикасының шешімдері 8

Мұстафин А. Модуляция сапалығына байланысты екі лазердің динамикасы..... 15

Карипбаев Ж., Мусаханов Д., Лисицын В., Алпысова Г., Голковский М., Лисицына Л., Тулегенова А., Акылбеков А., Даулетбекова А., Балабеков К., Козловский А., Усеинов А. Радиация өрісіндегі ИАГ және ИАГГ люминофорларының құрылымын зерттеу және синтездеу 24

Шанина З.К., Разина О.В. Еркін бозондық ішектің модификацияланған модельдері және олардың шешімдері 30

Шостэк Р., Гуральски П., Шостэк К. Ньютонның гравитациясы мен жалпы салыстырмалылық теориясынан туындайтын гравитациялық толқындар (LIGO) кезіндегі гравитация толқыны 39

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

Маусымбаева А.Д., Байсагов Я.Ж., Портнов В.С., Юров В.М., Гученко С.А., Амангелді-қызы А. Шұбаркөл кен орны көмірлеріндегі темір оксидін анықтау 57

Танашева Н.К., Миньков Л.Л., Тлеубергенова А.Ж., Саденова К.К. Математикалық модельдеу негізінде сулы-көмірлі отынның жағу технологиясын есептеу 63

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

Зинченко С., Носов П., Матейчук В., Маменко П., Попович И., Грошева О. Көптеген мақсаттары бар автоматты айырылу жүйесін синтездеу, соның ішінде маневрлар 69

Нүсіпбеков Б.Р., Хасенов А.К., Карабекова Д.Ж., Нүсіпбеков Ұ.Б., Стоев М., Болатбекова М.М. Сулы-көмірлі отын үшін көмірді электримпульсті әдісімен ұсақтау 80

Мустафин Е.С., Омаров Х.Б., Шаймерденова К.М., Омеркулов А.Т. Бастапқы байланыстырушы затты қолдана отырып, көмір кесектерін алу 85

ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

Кудусов А.С., Копбалина Қ.Б., Камбарова Ж.Т., Кудусова И.А. Білім беру мекемелері үшін ақпараттық-білім беру ортасын Google Apps сервис пакетінің негізінде құрастыру 89

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР 97

2019 жылғы «Қарағанды университетінің хабаршысында» жарияланған мақалалардың көрсеткіші. «Физика» сериясы 99

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Мейрамбай А., Ержанов К.К. Решение деформированной метрики Шварцшильда методами уравнения Янга-Бакстера 8

Мустафин А. Динамика двух лазеров, связанных взаимной модуляцией добротности 15

Карипбаев Ж., Мусаханов Д., Лисицын В., Алпысова Г., Голковский М., Лисицына Л., Тулегенова А., Акылбеков А., Даулетбекова А., Балабеков К., Козловский А., Усеинов А. Синтез, исследование структуры ИАГ и ИАГГ люминофоров в поле радиации 24

Шанина З.К., Разина О.В. Модифицированные модели свободной бозонной струны и их решения 30

Шостэк Р., Гуральски П., Шостэк К. Гравитационные волны в гравитации Ньютона и критика гравитационных волн, вытекающих из общей теории относительности (LIGO) 39

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Маусымбаева А.Д., Байсагов Я.Ж., Портнов В.С., Юров В.М., Гученко С.А., Амангелдыкызы А. Определение оксида железа в углях месторождения Шубарколь 57

Танашева Н.К., Миньков Л.Л., Тлеубергенова А.Ж., Саденова К.К. Расчет технологии сжигания водоугольного топлива на основе математического моделирования 63

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Зинченко С., Носов П., Матейчук В., Маменко П., Попович И., Грошева О. Синтез системы автоматического расхождения со многими целями, включая маневрирующие 69

Нусупбеков Б.Р., Хасенов А.К., Карабекова Д.Ж., Нусупбеков У.Б., Стоев М., Болатбекова М.М. Измельчение угля электроимпульсным способом для водоугольного топлива 80

Мустафин Е.С., Омаров Х.Б., Шаймерденова К.М., Омеркулов А.Т. Получение угольных брикетов с применением оригинального связующего вещества 85

МЕТОДИКА ФИЗИКИ

Кудусов А.С., Копбалина К.Б., Камбарова Ж.Т., Кудусова И.А. Создание информационно-образовательной среды для образовательных учреждений на основе сервисного пакета Google Apps 89

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 97

Указатель статей, опубликованных в «Вестнике Карагандинского университета» в 2019 году. Серия «Физика» 99

CONTENTS

PHYSICS OF THE CONDENSED MATTER

Meirambay A., Yerzhanov K.K. Solution of the deformed Schwarzschild metric by the Yang-Baxter equation 8

Mustafin A. Dynamics of two lasers coupled via mutual cavity-loss modulation 15

Karipbaev Zh., Musakhanov D., Lisitsyn V., Alpyssova G., Golkovskii M., Lisitsyna L., Tulegenova A., Akylbekov A., Dauletbekova A., Balabekov K., Kozlovskii A., Usseinov A. Synthesis, the study of the structure of YAG and YAGG phosphors in the radiation field 24

Shanina Z.K., Razina O.V. Modified models of a free boson string and their solutions 30

Szostek R., Góralski P., Szostek K. Gravitational waves in Newton's gravitation and criticism of gravitational waves resulting from the General Theory of Relativity (LIGO) 39

THERMOPHYSICS AND THEORETICAL THERMOENGINEERING

Mausymbayeva A.D., Baisagov Ya.Zh., Portnov V.S., Yurov V.M., Guchenko S.A., Amangeldikyzy A. Measuring the iron oxide in Shubarkol deposit coal 57

Tanasheva N.K., Minkov L.L., Tleubergenova A.Zh., Sadenova K.K. Calculation of coal-water fuel combustion technology based on mathematical modeling 63

TECHNICAL PHYSICS

Zinchenko S., Nosov P., Mateichuk V., Mamenko P., Popovych I., Grosheva O. Automatic collision avoidance system with many targets, including maneuvering ones 69

Nussupbekov B.R., Khassenov A.K., Karabekova D.Zh., Nussupbekov U.B., Stoev M., Bolatbekova M.M. Coal pulverization by electric pulse method for water-coal fuel 80

Mustafin E.S., Omarov Kh.B., Shaimerdenova K.M., Omerkulov A.T. Production of coal briquettes using the original binder 85

METHODOLOGY OF PHYSICS

Kudussov A.S., Kopbalina K.B., Kambarova Zh.T., Kudussova I.A. Development of the information educational environment for educational institutions based on Google Apps services 89

INFORMATION ABOUT AUTHORS 97

Index of articles published in the «Bulletin of the Karaganda University» in 2019 y. «Physics» Series 99

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
PHYSICS OF THE CONDENSED MATTER

DOI: 10.31489/2019Ph4/8-14

UDC 53.012+52.336

A. Meirambay, K.K. Yerzhanov

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan
(E-mail: aidana2909@mail.ru)

Solution of the deformed Schwarzschild metric by the Yang-Baxter equation

In this article, an open-closed string map formulated by Seiberg & Whitten was used to solve problems of generalized supergravity, including the deformed Schwarzschild metric. For this task, found analytical supergravity solution (deformed metric and NSNS (Neveu – Schwarz) two-form $B_{\mu\nu}$-field). The solution was obtained from antisymmetric bivector constructed from antisymmetric products of Killing vectors used as components of the equation of motion. In the problem under consideration, the equations of motion are the CYBE (classical Yang-Baxter equation), whose general solution can be obtained using the r-matrix. As a result, for the deformed metric, the Hamilton — Jacobi equation is obtained, the particle motion on the plane is studied, with $\theta = \pi/2$. So, we obtained several analytical solutions for the function $r(\varphi)$, $\varphi(r)$. Since these results are very voluminous for representations, we present the schedule the test particle from the function $r(\varphi)$, which shows the centrally- symmetric motion of the particle in the Schwarchild field. As a continuation of this work, it is possible to obtain a numerical solution for a function $r(t)$, that has a complex integral for the analytical solution of this problem. The theoretical meaning of the work is that CYBE derives from the equation of motion of the theory of gravity, thereby reducing the problem of determining the r-matrix, which is a CYBE solution for generalized supergravity.

Keywords: Classical Yang-Baxter equation, Hamilton-Jacobi equation, open-closed string map, supergravity, Killing vectors, B-field, NS sector, TsT transform, antisymmetric bivector.

Introduction

Yang-Baxter string sigma — models provide a systematic approach of deforming the geometry of coset classes, like $AdS_p \times S^p$ while maintaining the integrability of the σ-model. It was demonstrated that the Yang-Baxter deformation in the target space for any geometry can be considered as an open-closed map of the string. Considering the geometry as a bivector and an isometry group, which is determined by the linear combination of antisymmetric products of Killing vectors, is possible to get the equations of motion generalized supergravity, which is equivalent to the classical Yang-Baxter equation (CYBE) [1].

Integrable deformations of σ-models [2, 3] is possible to apply to string σ-model and AdS/CFT geometries [4, 5]. So were investigated noncommutative [6–8] and marginal deformations [9, 10] of AdS/CFT geometries: as a part of a larger family of integrable deformations of $AdS_p \times S^p$ geometries in which the deformation is specified using the *r*-matrix for solving the CYBE.

In this work, we will try using the open-closed string map [11] as a simple, effective method for solution.

Let's take «open string data», which produced «closed string data» as a new metric *g* and *B*-field after inverting single matrix. Dilaton is determined by *T*-duality invariant and Killing vector *I* is a the divergence of antisymmetric bivector $\Theta^{\mu\nu}$ [12]:

$$\nabla_\mu \Theta^{\mu\nu} = I^\nu .$$

Building the open-closed string map of Seiberg & Witten [13], which were write as:

$$(g+B)_{\mu\nu} = (G^{\mu\nu} + \Theta^{\mu\nu})^{-1}.$$

Here $(g,B),(G,\Theta)$ are respectively closed string and open string fields. The metrics g,G are symmetric and B,Θ are antisymmetric counterparts.

Connection of the deformed solution ($g_{\mu\nu}, B_{\mu\nu}, \varphi$) with the original solution ($G_{\mu\nu}, \Theta^{\mu\nu}, \Phi$) of NS sector has the form [14]:

$$\begin{aligned} g_{\mu\nu} &= (G^{-1} - \Theta\cdot G\cdot\Theta)^{-1}_{\mu\nu}; \\ B_{\mu\nu} &= -(G^{-1}-\Theta)^{-1}\cdot\Theta\cdot(G^{-1}+\Theta)^{-1}; \\ \varphi &= \Phi - \frac{1}{2}\ln(\det(1+G\cdot\Theta)). \end{aligned} \tag{1}$$

In the above $\cdot$ denotes matrix multiplication and G and Θ are to be viewed as two matrices. The indices on Θ are lowered and raised by the metric G.

r-matrix solutions to the CYBE take the form [14]

$$r = \frac{1}{2} r^{ij} T_i \wedge T_j,$$

where T_i are elements of the Lie algebra, $T_i \in g$. Here the bi-Killing structure of Θ is the r-matrix written in the basis of Killing vectors.

For the object of the study we take the Schwarzschild black hole metric

$$ds^2 = -\left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2 + \frac{dr^2}{1-\frac{2m}{r}} + r^2\left(d\varphi^2 + \sin^2\varphi d\theta^2\right),$$

it is convenient to write the metric in matrix in the form

$$G = \begin{vmatrix} -a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K^2 r^2 \end{vmatrix}.$$

We choose Θ to an antisymmetric product of Killing vectors:

$$\begin{aligned} \Theta^{t\phi} &= -e\cos\theta + \lambda\sin\theta; \\ \Theta^{t\theta} &= \delta + \cot\phi(e\sin\theta + \lambda\cos\theta); \\ \Theta^{\phi\theta} &= \alpha\cos\theta - \beta\cot\phi + \gamma\sin\theta; \end{aligned}$$

rewrite in matrix form

$$\Theta = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -D & \delta + Z\cdot M \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ D & 0 & 0 & N \\ -\delta - Z\cdot M & 0 & -N & 0 \end{vmatrix}.$$

Made such replacements to simplify the calculation

$$\begin{aligned} a &= 1 - \frac{2m}{r}; \\ K &= \sin\varphi; \\ D &= e\cdot\cos\theta - \lambda\cdot\sin\theta; \\ Z &= \cot\varphi; \\ M &= e\cdot\sin\theta + \lambda\cdot\cos\theta; \\ N &= \alpha\cdot\cos\theta - \beta\cdot\cot\varphi + \gamma\cdot\sin\theta. \end{aligned} \tag{2}$$

Using formula (1) we find the supergravity solutions (deformed metric, B-field)

$$ds^2 = \frac{1}{a\Omega}\Big[(K^2N^2r^4a^2 + a^2)dt^2 + dr^2 + \Big(K^2M^2Z^2a^2r^4 + 2K^2MZa^2\delta r^4 +$$
$$+K^2a^2\delta^2r^4 - r^2a\Big)d\varphi^2 + (D^2K^2a^2r^4 - r^2K^2a)d\chi^2 - (K^2MNZa^2r^4 + K^2Na^2\delta r^4)(dtd\varphi + d\varphi dt) - \quad (3)$$
$$-Dr^4Na^2K^2(dtd\theta + d\theta dt) + (DK^2MZa^2r^4 + DK^2a^2\delta r^4)(d\varphi d\theta + d\theta d\varphi)\Big],$$

the components of the metric tensor is more convenient to write as a matrix

$$g = \begin{vmatrix} \frac{a(K^2N^2r^4+1)}{\Omega} & 0 & -\frac{a(MZ+\delta)K^2r^4N}{\Omega} & -\frac{Dr^4NaK^2}{\Omega} \\ 0 & 1/a & 0 & 0 \\ -\frac{a(MZ+\delta)K^2r^4N}{\Omega} & 0 & \frac{(K^2M^2Z^2ar^2 + 2K^2MZa\delta r^2 + K^2a\delta^2r^2 - 1)r^2}{\Omega} & \frac{r^4Da(MZ+\delta)K^2}{\Omega} \\ -\frac{Dr^4NaK^2}{\Omega} & 0 & \frac{r^4Da(MZ+\delta)K^2}{\Omega} & \frac{(D^2ar^2-1)r^2K^2}{\Omega} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

where

$$\Omega = K^2M^2Z^2ar^2 + 2K^2MZa\delta r^2 - K^2N^2r^4 + K^2a\delta^2r^2 + D^2ar^2 - 1. \quad (5)$$

$$B_{\mu\nu} = \frac{r^2aD}{\Omega}dt \wedge d\varphi + \frac{r^4K^2N}{\Omega}d\varphi \wedge d\theta + \frac{r^2aK^2(MZ+\delta)}{\Omega}d\theta \wedge dt; \quad (6)$$

$$B = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \frac{r^2aD}{\Omega} & -\frac{r^2aK^2(MZ+\delta)}{\Omega} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r^2aD}{\Omega} & 0 & 0 & \frac{r^4K^2N}{\Omega} \\ \frac{r^2aK^2(MZ+\delta)}{\Omega} & 0 & -\frac{r^4K^2N}{\Omega} & 0 \end{vmatrix}.$$

To determine the trajectory of a particle, use the Hamilton-Jacobi equation [15]

$$g^{ik}\frac{ds}{dx^i}\cdot\frac{ds}{dx^k} - m^2c^2 = 0. \quad (7)$$

With the metric tensor (4), eq. (7) takes the following form

$$g^{tt}\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 + g^{rr}\left(\frac{ds}{dr}\right)^2 + g^{\varphi\varphi}\left(\frac{ds}{d\phi}\right)^2 + g^{\theta\theta}\left(\frac{ds}{d\theta}\right)^2 +$$
$$+g^{t\varphi}\frac{ds}{dt}\frac{ds}{d\varphi} + g^{\phi t}\frac{ds}{d\varphi}\frac{ds}{dt} + g^{t\theta}\frac{ds}{dt}\frac{ds}{d\theta} + g^{\theta t}\frac{ds}{d\theta}\frac{ds}{dt} + g^{\varphi\theta}\frac{ds}{d\varphi}\frac{ds}{d\theta} + g^{\theta\varphi}\frac{ds}{d\theta}\frac{ds}{d\varphi} - m^2c^2 = 0, \quad (8)$$

where $g^{t\phi} = g^{\phi t}, g^{t\theta} = g^{\theta t}, g^{\phi\theta} = g^{\theta\phi}$.

By the general rules, the solution of the Hamilton-Jacobi equation s is sought in the form [16]

$$s = -\varepsilon t + M\varphi + s_r(r), \quad (9)$$

where ε — energy and M — angular momentum are constant.

Substituting eq. (9) into eq. (8) we found

$$\frac{d(s_r(r))}{dr} = \frac{\sqrt{m^2c^2 - (\frac{\varepsilon}{c})^2 g^{tt} + \frac{2M\varepsilon}{c}g^{t\varphi} - M^2g^{\varphi\varphi}}}{g^{rr}}. \quad (10)$$

Lowering the indices of the components of the metric tensor, the eq. (10) is written

$$s_r(r) = \int\sqrt{\left(m^2c^2 - \frac{\varepsilon^2}{c^2g_{tt}} + \frac{2M\varepsilon}{cg_{\varphi t}} - \frac{M^2}{g_{\varphi\varphi}}\right)g_{rr}}\,dr, \quad (11)$$

there we use the formula lowering and raising the indices of the metric tensor $g_{jk} = \frac{\delta_k^i}{g^{ij}}$:

$$g_{tt} = \frac{1}{g^{tt}},\ g_{t\varphi} = \frac{1}{g^{\varphi t}},\ g_{\varphi\varphi} = \frac{1}{g^{\varphi\varphi}},\ g_{rr} = \frac{1}{g^{rr}}. \tag{12}$$

Using expression $\frac{ds}{dM} = const$, from eq. (9) we can obtain $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = const - \frac{d(s_r(r))}{dM}, \tag{13}$$

substituting eq. (11) to (13) we will result in the following eq.

$$\Delta\varphi = const - \int \frac{\left(\frac{\varepsilon}{cg_{\varphi t}} - \frac{M}{g_{\varphi\varphi}}\right)\sqrt{g_{rr}}}{\sqrt{m^2c^2 - \frac{\varepsilon^2}{c^2 g_{tt}} + \frac{2M\varepsilon}{cg_{\varphi t}} - \frac{M^2}{g_{\varphi\varphi}}}} dr. \tag{14}$$

Since the integral in equation (14) is difficult to solve we take the derivative with respect to r from both sides of the eq.

$$\frac{d\varphi}{dr} = -\frac{\left(\frac{\varepsilon}{cg_{\varphi t}} - \frac{M}{g_{\varphi\varphi}}\right)\sqrt{g_{rr}}}{\sqrt{m^2c^2 - \frac{\varepsilon^2}{c^2 g_{tt}} + \frac{2M\varepsilon}{cg_{\varphi t}} - \frac{M^2}{g_{\varphi\varphi}}}} = 0; \tag{15}$$

that numerator of equation (15) can be reduced to zero

$$-\left(\frac{\varepsilon}{cg_{\varphi t}} - \frac{M}{g_{\varphi\varphi}}\right)\sqrt{g_{rr}} = 0. \tag{16}$$

To simplify the problem, we consider the case when the motion occurs in one plane, that is, we can take it $\theta = \frac{\pi}{2}$, since the field is central, then the replacements in eq. (2) will take this form

$$\begin{gathered} a = 1 - \frac{2m}{r}; \\ K = \sin\varphi; \\ D = -\lambda; \\ Z = \cot\varphi; \\ M = e; \\ N = -\beta \cdot \cot\varphi + \gamma. \end{gathered} \tag{17}$$

Substituting these expressions (17) into components $g_{\varphi\varphi}, g_{\varphi t}, g_{rr}$, getting two equations (18), (19)

$$\frac{\varepsilon}{c(1-2m/r)(r^4\sin^2\varphi(\gamma-\beta\cot\varphi)^2+1)} + \\ + \frac{M}{(e^2r^2\sin^2\varphi\cot^2\varphi(1-2m/r) + 2e\delta r^2\sin^2\varphi\cot\varphi(1-2m/r) + \delta^2r^2\sin^2\varphi(1-2m/r)-1)r^2} = 0, \tag{18}$$

from this eq. (18) we get: $r(\varphi)$ have 2 solutions, $\varphi(r)$ have 5 solutions.

$$g_{rr} \cdot \Omega = r^2e^2\sin^2\varphi\cot^2\varphi + 2e\delta\sin^2\varphi\cot\varphi r^2 + \delta^2\sin^2\varphi r^2 + \lambda^2r^2 - \frac{1+\sin^2\varphi(\gamma-\beta\cot\varphi)^2r^4}{(1-2m/r)} = 0, \tag{19}$$

from this eq. (19) we get: $r(\varphi)$ have 5 solutions, $\varphi(r)$ have 8 solutions.

So we got some non-zero solutions that are complex and lengthy to write. We can demonstrate one of the result graphically in Figure.

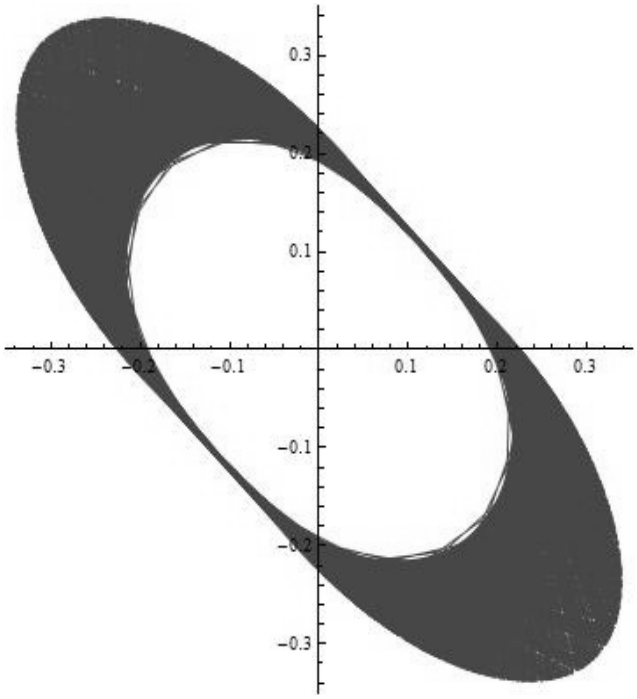


Figure. Movement of test particle in deformed Schwarzschild field, when $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, e, m, \varepsilon, M, c = 1$. The graph is built from a function $r(\varphi)$

Conclusion

Let us review what has been achieved. We consider $AdS_2 \times S^2$ and Schwarzschild spacetimes and found supergravity solutions for it, using an open-closed string map formulated by Seiberg & Whitten.The solution is determined by a bivector, constructed from antisymmetric products of Killing vectors used as components of the equation of motion. The main point of the work is that CYBE emerges from the equations of motions of a gravity theory, thereby simplifying the problem of determining the r-matrix solution to the CYBE.

As a result, for the deformed metric, the Hamilton – Jacobi equation is obtained, the particle motion on the plane is studied, with $\theta = \frac{\pi}{2}$. We obtained some analytic exact solutions for the functions $r(\varphi)$ and $\varphi(r)$, which are very long to write, therefore, we will provide only a graph of one of the solution. From the graph of a test particle of function $r(\varphi)$ is concluded: particle moving in a centrally symmetric Schwarzschild field are obtained. It is also easy to yet a solution $r(t)$, which contains an integral, difficult for an analytical solution.

Originally integrability was finded in string models on $AdS_p \times S^q$ (which described are β-deformation). There are also integrable string theories that known as η, λ-deformations, which are considered models on $AdS_p \times S^p$. In the case of η, λ-deformations, the CFT (conformal field theories) construction gives the NS-NS fields. For deformation our model wording for NS-sector, respectively. Following CFT we must construction classical R-matrix for the selected model. The R-matrix is classical solution of CYBE.

Our work is based on the consideration of the integrability of model deformation (in our case, Schwarzschild black hole) geometry $AdS_2 \times S^2$, where the deformation is expressed through the solutions of the R-matrix CYBE. When the model is deformed, symmetries are preserved, which is typical for CYBE.

The Hamilton–Jacobi solutions obtained from deformed metric (3) generated through the open-closed string map give us the particle trajectory in the Schwarzschild black hole in geometry $AdS_2 \times S^2$.

As the form of the particle trajectory is symmetrically different from the results of calculations of the standard Schwarzschild metric. It can be seen from figure 1 that the particle trajectory obtained from the de-

formed metric will look like a folding ellipsoid spiral, while the standard Schwarzschild metric gives the circle spiral.

For our case, it is deformed (squeezed) more than twice. The diameter perpendicular to it is compressed, approaching the shape of the circle with time.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, Grant No. 0118RK00935.

References

1 Bakhmatov, I.I., Kelekci, Ö., Ó Colgáin, E., & Sheikh-Jabbari, M.M. (2018). Classical Yang-Baxter Equation from Supergravity. *Phys. Rev. D.*, *98, 2.*

2 Klimcik, C. (2003). Yang-Baxter sigma models and dS/AdS T duality. *Jour. of High Ener. Physics, 2002, 051.*

3 Klimcik, C. (2009). On integrability of the Yang-Baxter sigma-model. *J. Math. Phys., 50, 4.*

4 Delduc, F., Magro, M., & Vicedo, B. (2014). An integrable deformation of the $AdS_5 \times S^5$ superstring action. *Phys. Rev. Lett., 112, 5* [arXiv:1309.5850 [hep-th]].

5 Kawaguchi, I., Matsumoto, T., & Yoshida, K. (2014). Jordanian deformations of the $AdS_5 \times S^5$ superstring. *JHEP 1404, 153* [arXiv:1401.4855 [hep-th]].

6 Hashimoto, A., & Itzhaki, N. (1999). Noncommutative Yang-Mills and the AdS/CFT correspondence. *Phys. Lett., 465, 1–4*, 142–147.

7 Maldacena, J.M., & Russo, J.G. (1999). Large N limit of noncommutative gauge theories. *JHEP, 09, 025* [hep-th/9908134].

8 Alishahiha, M., Oz, Y., & Sheikh-Jabbari, M.M. (1999). Supergravity and large N noncommutative field theories. *JHEP, 11, 007* [hep-th/9909215].

9 Lunin, O., & Maldacena, J.M. (2005). Deforming field theories withU(1) x U(1) global symmetry and their gravity duals. *JHEP, 05, 033* [hep-th/0502086].

10 Frolov, S. (2005). Lax pair for strings in Lunin-Maldacena background. *JHEP, 05, 069* [hep-th/0503201].

11 Seiberg, N., & Witten, E. (1999). String Theory and Noncommutative Geometry. *JHEP, 09, 1999* [hep-th/9908142].

12 Araujo, E., Ó Colgáin, E., Sakamoto, J., Sheikh-Jabbari, M.M., & Yoshida, K.I. (2017). Generalized supergravity. *The Europ. Phys. Jour. C.* arXiv: 1708.03163 [hep-th].

13 Wulff, L., & Tseytlin, A.A. (2016). Kappa-symmetry of superstring sigma model and generalized 10d supergravity equations. *J. of High Ener. Phys. (JHEP), 1606, 174* [arXiv:1605.04884 [hep-th]].

14 Bakhmatov, I., Ó Colgáin, E., Sheikh-Jabbari, M.M., &Yavartanoo, H. (2018). Yang-Baxter Deformations Beyond Coset Spaces. *Jour. of High Ener. Phys., 10,* 1007 / JHEP06(2018)161.

15 Kozhanov, T.S., & Yerzhanov, K.K. (2001). Dynamics Of Star Clusters And The Milky Way. *Astronomical Society Of The Pacific Conference*, *228*, 497–499.

16 Shaikhova, G.N., Yesmakhanova, K., Bekova, G., & Ybyraiymova, S. (2017). Conservation laws of the Hirota-Maxwell-Bloch system and its reductions. *Journal of Physics: Conference Series, 936*, 012098 (1–6).

А. Мейрамбай, К.К. Ержанов

Янг-Бакстер теңдеуінің әдістері арқылы алынған Шварцшильд деформацияланған метрикасының шешімдері

Мақалада жалпыланған супергравитация есептері үшін, соның ішінде Шварцшильд деформацияланған метрикасы үшін Сейнберг және Уиттонмен жасалған ашық-жабық ішектік карта пайдаланылды. Бұл есеп үшін аналитикалық супергравитациялық шешім алынды (деформацияланған метрика және NSNS (Neveu–Schwarz) екіформалы $B_{\mu\nu}$-өріс). Қозғалыс теңдеуінің компоненттері ретінде қолданылған, Киллинг векторларының антисимметриялық көбейтіндісінен құрастырылған антисимметриялық бивектор пайдаланылды. Қарастырылып отырған есепте қозғалыс теңдеуінің жалпы шешімі r-матрицы арқылы алынатын классикалық Янг-Бакстер теңдеуі (КЯБТ) болып табылады. Қорытындылай келгенде, деформацияланған метрика үшін Гамильтон-Якоби теңдеуі алынған, $\theta = \pi/2$ жазықтығында бөлшек қозғалысы зерттелген. Сонымен қатар $r(\varphi)$, $\varphi(r)$ функциялардың бірнеше аналитикалық шешімдері берілген. Бұл мәліметтер өте көлемді болғандықтан, Шварцшильд өрісінде бөлшектің орталық-симметриялы қозғалысын көрсететін $r(\varphi)$ функциясынан алынған сынақ бөлшектің графигі ғана көрсетілді. Осы жұмыстың жалғасы ретінде есепті аналитикалық шешудің күрделі интегралына ие $r(t)$ функциясы үшін сандық шешімді алуға болады. Жұмыстың теориялық мәні классикалық Янг-Бакстер теңдеуі гравитация теориясының қозғалыс теңдеуінен шығып, КЯБТ шешімі үшін жалпыланған супергравитация болып табылатын, r-матрицаны анықтау міндетін азайтатынында.

Кілт сөздер: классикалық Янг-Бакстер теңдеуі, Гамильтон-Якоби теңдеуі, ашық-тұйық ішектік карта, супергравитация, Киллинг векторлары, B-өрісі, NS-сектор, TsT түрлендіру, антисимметриялық бивектор.

А.Мейрамбай, К.К. Ержанов

Решение деформированной метрики Шварцшильда методами уравнения Янга-Бакстера

В статье для решения задач обобщенной супергравитации, в том числе деформированной метрики Шварцшильда была использована открытая-закрытая струнная карта, сформулированная Сейнбергом и Уиттоном. Для этой задачи было получено аналитическое супергравитационное решение (деформированная метрика и NSNS (Neveu–Schwarz) двухформное $B_{\mu\nu}$-поле) с использованием антисимметричного бивектора, построенного из антисимметричных произведений векторов Киллинга, использованных как компоненты уравнения движения. В рассматриваемой задаче уравнение движения является классическим уравнением Янга-Бакстера (КУЯБ), чье общее решение можно получить с помощью r-матрицы. В итоге, для деформированной метрики получено уравнение Гамильтона–Якоби, исследовано движение частицы на плоскости при $\theta = \pi/2$. Кроме того, даны несколько аналитических решений для функций $r(\varphi)$, $\varphi(r)$. Так как эти данные очень объемны для представлений, продемонстрирован только график пробной частицы от функции $r(\varphi)$, который показывает центрально-симметричное движение частицы в шварцшильдовском поле. Как продолжение этой работы возможно получить численное решение для функции $r(t)$, которое имеет сложный интеграл для аналитического решения задачи. Теоретический смысл работы заключается в том, что классическое уравнение Янга-Бакстера вытекает из уравнения движения теории гравитации, тем самым уменьшая задачу определения r-матрицы, которая является решением КУЯБ для обобщенной супергравитации.

Ключевые слова: классическое уравнение Янга-Бакстера, уравнение Гамильтона-Якоби, открытая-закрытая струнная карта, супергравитация, векторы Киллинга, B-поле, NS-сектор, TsT-преобразования, антисимметричный бивектор.

DOI: 10.31489/2019Ph4/15-23

УДК 530.182:621.373.826

А. Мустафин

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
(E-mail: butsuri123@gmail.com)

Динамика двух лазеров, связанных взаимной модуляцией добротности

В приближении скоростных уравнений построена математическая модель синхронизации двух одномодовых полупроводниковых лазеров. Модель представляет собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений для концентраций электронов и плотностей фотонов в обоих лазерах. Особенность модели состоит в характере связи между лазерами — она устроена так, что удельные потери каждого лазера пропорциональны интенсивности излучения другого. Помимо того, в уравнениях учитываются нелинейные (квадратичные) потери излучения. Система исследована методами теории бифуркаций и многих масштабов. Показано, что модель проявляет различное поведение при сильной и слабой связи между лазерами. При сильной связи в системе нет колебаний, и в то же время возможны бистабильность и гистерезис. При слабой связи в системе возможно возникновение предельного цикла и пичковых релаксационных колебаний. Выявлено, что синхронные колебания плотности фотонов в лазерах происходят в антифазе. Сделан вывод о возможности применения предложенной схемы синхронизации для получения длиннопериодических осцилляций.

Ключевые слова: связанные лазеры, скоростные уравнения, синхронизация, оптическая бистабильность, релаксационные колебания.

Введение

В последние годы исследования по синхронизации полупроводниковых лазеров привлекают к себе большое внимание как из-за удобства использования лазера в качестве модельной нелинейной колебательной системы, так и из-за потенциальных технических приложений явления синхронизации в телекоммуникациях, электронике и вычислительной технике [1–4].

В большинстве схем синхронизации применяется перекрестная оптоэлектронная связь [5], либо взаимная связь торцом к торцу [6]. В первой схеме излучение каждого лазера преобразуется фотодетектором в электрический сигнал и после усиления используется для модуляции тока накачки другого лазера. Во второй схеме излучение каждого лазера после должного ослабления вводится в другой лазер. При изучении обоих типов связи в определенных условиях, среди которых наиболее важна временная задержка, был обнаружен целый ряд интересных нелинейных эффектов, таких как колебания в виде регулярных пульсаций, квазипериодическое движение и хаос.

В тоже время недостаточно внимания уделяется другому возможному механизму связи, основанного на взаимной модуляции добротности. Технически такую связь можно осуществить с помощью внутрирезонаторного модулятора добротности, управляемого электрическими, магнитными или акустическими импульсами. Например, в [7] теоретически показано возникновение колебательной неустойчивости стационарного состояния двух лазеров Фабри–Перо, связанных указанным образом. Представляется, что разработка методов синхронизации на основе взаимного регулирования добротности может оказаться перспективным направлением исследований.

В предлагаемой работе теоретически изучается система из двух одинаковых лазеров, связанных так, что потери в резонаторе каждого прибора пропорциональны интенсивности излучения другого. Рассмотрение ведется асимптотическим методом многих масштабов в рамках аппарата скоростных уравнений для концентрации электронов и плотности фотонов. При этом, не ограничиваясь традиционным квазигармоническим приближением вблизи бифуркации Андронова–Хопфа, нам удается построить предельный цикл связанной системы далеко за порогом самовозбуждения, в режиме развитых нелинейных колебаний большой амплитуды.

Модель

В качестве отправной точки берутся уравнения одномодового лазера класса B (например, [8; 231]), дополненные членами, ответственными за само- и взаимное насыщение:

$$\begin{aligned}
\dot{n}_1 &= J_1/(qd) - g(n_1 - n_0)p_1 - n_1/\tau_e;\\
\dot{n}_2 &= J_2/(qd) - g(n_2 - n_0)p_2 - n_2/\tau_e;\\
\dot{p}_1 &= (g(n_1 - n_0) - 1/\tau_p - Dp_1 - h_2 p_2)p_1;\\
\dot{p}_2 &= (g(n_2 - n_0) - 1/\tau_p - Dp_2 - h_1 p_1)p_2.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь n_i и p_i — соответственно концентрация электронов и плотность фотонов в резонаторе i-го лазера ($i = 1,2$); J_i — плотность тока накачки i-го лазера; d — ширина активной области резонатора; q — элементарный заряд; n_0 — концентрация электронов при просветлении; τ_e — время жизни носителей заряда в зоне проводимости до спонтанной рекомбинации; τ_p — время жизни фотонов внутри резонатора; D — коэффициент квадратичных потерь; h_j — коэффициент взаимной модуляции добротности, характеризующий «угнетающее» влияние j-го лазера на i-й ($j \neq i$); $g = \Gamma ac/n_g$, где Γ — фактор оптического ограничения (доля интенсивности излучения, приходящаяся на объем активной области); c — скорость света в вакууме; n_g — групповой показатель преломления; a — коэффициент усиления материала; точки сверху означают дифференцирование по времени t.

В уравнениях (1), представляющих собой модель с сосредоточенными параметрами, пространственные неоднородности не учитываются: концентрации электронов и плотности фотонов усреднены по длине резонатора.

Типичные значения параметров для полупроводникового лазера, согласно [8; 238], таковы: $J = 5\cdot 10^3$ А/см^2, $d = 2\cdot 10^{-5}$ см, $\Gamma = 0,3$, $n_g = 4$, $a = 2,5\cdot 10^{-16}$ см^2, $g = 5,625\cdot 10^{-7}$ см^3/с, $n_0 = 1\cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, $\tau_e = 2,2\cdot 10^{-9}$ с, $\tau_p = 1,6\cdot 10^{-12}$ с.

Учет нелинейных (квадратичных) потерь во второй паре уравнений (1) обеспечивает конечность плотности фотонов даже при очень медленной относительной динамике инверсной заселенности (т.е. при практически постоянных n_1, n_2). Технически квадратичные потери могут быть реализованы помещением в резонатор (наряду с модулятором добротности) нелинейного элемента. В качестве последнего может выступать полупроводниковый кристалл с двухфотонным поглощением на частоте излучения. Также можно использовать и метод внутрирезонаторной генерации второй гармоники на нелинейном кристалле. При этом вторая гармоника (квадратично зависящая от поля основного излучения) свободно выходит из резонатора, а основное излучение остается в нем. Как мы видим, конкретное значение коэффициента квадратичных потерь никак не влияет на выводы модели, и важен лишь факт, что он отличен от нуля. Теоретическая оценка D дается ниже.

Коэффициенты связи h_1, h_2 — свободные параметры.

Переходя к безразмерным переменным и параметрам по формулам $u_i = g\tau_p(n_i - n_0) - 1$, $v_i = g\tau_e p_i$, $\tau = t/\tau_e$, $\gamma_i = g\tau_p(J_i\tau_e/(qd) - n_0) - 1$, $\delta = D\tau_p/(g\tau_e)$, $\kappa_j = h_j\tau_p/(g\tau_e)$ $\varepsilon = \tau_p/\tau_e$, систему (1) можно переписать в виде

$$\begin{aligned}
\dot{u}_1 &= \gamma_1 - (u_1 + 1)v_1 - u_1;\\
\dot{u}_2 &= \gamma_2 - (u_2 + 1)v_2 - u_2;\\
\varepsilon\dot{v}_1 &= (u_1 - \delta v_1 - \kappa_2 v_2)v_1;\\
\varepsilon\dot{v}_2 &= (u_2 - \delta v_2 - \kappa_1 v_1)v_2.
\end{aligned} \tag{2}$$

Нужно заметить, что переменная v_i, будучи пропорциональной своему размерному прототипу p_i, непосредственно представляет нормированную плотность фотонов. Переменная же u_i в прямом смысле не есть относительная концентрация носителей. Она, по существу, является аффинным преобразованием n_i, введенным в целях математического удобства. Тем не менее в дальнейшем для краткости мы будем называть u_i концентрацией электронов.

Результаты

При $\kappa_1, \kappa_2 = 0$ лазеры независимы друг от друга. В каждом устанавливается единственно возможное устойчивое стационарное состояние

$$\bar{u} = ((1+\delta(4\gamma+2+\delta))^{1/2} - 1 - \delta)/2 = \gamma\delta + O(\delta^2);$$
$$\bar{v} = ((1+\delta(4\gamma+2+\delta))^{1/2} - 1 - \delta)/(2\delta) = \gamma - \gamma(\gamma+1)\delta + O(\delta^2) \quad (3)$$

с ненулевой интенсивностью излучения. При $\delta = o(\varepsilon^{1/2})$ стационарное состояние (3) — фокус, а при бóльших δ — узел.

Со времен появления первых лазеров известно, что стационарный режим генерации в приборах класса B устанавливается через затухающие пичковые колебания. Также сравнительно давно замечено, что внутрирезонаторные нелинейные поглотители, потери в которых растут с увеличением интенсивности излучения, способствуют сглаживанию или устранению переходных пичковых колебаний [9, 10]. В терминах уравнений (2) это означает переход стационарного состояния от фокуса к узлу при увеличении δ от нуля до некоторого критического значения. Поскольку $\varepsilon = 0.73\cdot 10^{-3}$, то можно ожидать, что затухающие колебания интенсивности могут наблюдаться для $\delta \lesssim 2.7\cdot 10^{-2}$, и это соответствует размерной величине коэффициента квадратичных потерь $D \lesssim 0.77\cdot 10^{-5}$ см^3/с. В дальнейшем для определенности мы будем предполагать, что при отсутствии связи устойчивое стационарное состояние каждого из лазеров имеет тип фокуса, хотя, повторим, это непринципиально.

Исследуемая модель проявляет качественно различное поведение при сильной ($\kappa_1, \kappa_2 > 1$) и слабой ($\kappa_1, \kappa_2 < 1$) связи. Система (2) допускает четыре физически возможных стационарных состояния. В нулевом порядке по δ имеем

$$\begin{aligned}
F:&\quad \bar{u}_1 = \gamma_1, \bar{u}_2 = \gamma_2, \bar{v}_1 = 0, \bar{v}_2 = 0;\\
F_1:&\quad \bar{u}_1 = 0, \bar{u}_2 = \gamma_2, \bar{v}_1 = \gamma_1, \bar{v}_2 = 0;\\
F_2:&\quad \bar{u}_1 = \gamma_1, \bar{u}_2 = 0, \bar{v}_1 = 0, \bar{v}_2 = \gamma_2;\\
F_{12}:&\quad \bar{u}_1 = (\kappa_1\gamma_1 - \kappa_2\gamma_2 - \kappa_1\kappa_2 + 1 \pm R)/(2(\kappa_1 - 1));\\
&\quad \bar{u}_2 = (-\kappa_1\gamma_1 + \kappa_2\gamma_2 - \kappa_1\kappa_2 + 1 \pm R)/(2(\kappa_2 - 1));\\
&\quad \bar{v}_1 = \bar{u}_2/\kappa_1, \bar{v}_2 = \bar{u}_1/\kappa_2;\\
&\quad R = ((\kappa_1\gamma_1 - \kappa_2\gamma_2 - \kappa_1\kappa_2 + 1)^2 + 4\kappa_2(\kappa_1 - 1)(\kappa_1\gamma_1 - \gamma_2))^{1/2}.
\end{aligned} \quad (4)$$

В формулах (4) неподвижные точки обозначаются символом $F_{12} = (\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{v}_1, \bar{v}_2)$, где каждый индекс при F указывает на соответствующий лазер в режиме генерации. Отсутствие какого-либо индекса означает, что данный лазер не излучает. Стационарное состояние F всегда неустойчиво. Несимметричные стационарные состояния F_1 и F_2 соответственно устойчивы при $\gamma_2/\gamma_1 < \kappa_1$ и $\gamma_1/\gamma_2 < \kappa_2$. При сильной связи симметричное состояние F_{12} существует для $1/\kappa_2 < \gamma_2/\gamma_1 < \kappa_1$, но всегда неустойчиво. При слабой связи F_{12} существует для $\kappa_1 < \gamma_2/\gamma_1 < 1/\kappa_2$ и сохраняет устойчивость, если $\kappa_1, \kappa_2 = o(\varepsilon^{1/2})$. Ввиду малости ε последнее условие практически всегда нарушено в широком интервале не слишком малых (физически разумных) коэффициентов связи.

При сильной связи в исследуемой системе возможны бистабильность и гистерезис. Пусть для определенности накачка γ_2 лазера 2 поддерживается на некотором постоянном уровне γ_2^*, а накачка γ_1 лазера 1 монотонно увеличивается от какой-то величины, меньшей γ_2^*/κ_1. Вначале устойчиво только стационарное состояние F_2, в котором лазер 2 излучает, а лазер 1 не излучает. По достижении параметром γ_1 величины γ_2^*/κ_1 наряду с F_2 приобретает устойчивость состояние F_1, но оно пока не реализуемо. Бистабильность сохраняется всюду в интервале $\gamma_2^*/\kappa_1 < \gamma_1 < \kappa_2\gamma_2^*$. Наконец, когда γ_1 становится больше $\kappa_2\gamma_2^*$, стационарное состояние F_2 теряет устойчивость, и система скачком переходит к стационарному режиму F_1. Лазер 2 гаснет, а лазер 1 зажигается. Если теперь уменьшать накачку первого лазера, то система будет оставаться в стационарном состоянии F_1, покуда γ_1 не станет меньше нижнего критического уровня γ_2^*/κ_1, за которым существует только стационарное состояние F_2. Иными словами, переключение от лазера 2 к лазеру 1 и обратно происходит при разных величинах параметра накачки γ_1. Гистерезис обусловлен бистабильностью несимметричных стационарных

состояний F_1, F_2 и неустойчивостью симметричного состояния F_{12} в параметрической области $\gamma_2^* / \kappa_1 < \gamma_1 < \kappa_2 \gamma_2^*$.

При исчезающе слабой связи в системе (2) устойчиво лишь симметричное стационарное состояние F_{12}. По достижении силой связи некоторого критического значения спектр собственных чисел F_{12} состоит из двух чисто мнимых и двух комплексно-сопряженных величин с отрицательной действительной частью. Таким образом, при дальнейшем увеличении связи устойчивость F_{12} нарушается по типу растущих колебаний; происходит бифуркация Андронова–Хопфа с рождением предельного цикла. Пока κ_1, κ_2 остаются порядка $\varepsilon^{1/2}$, цикл мал по амплитуде и отвечает квазигармоническим колебаниям. С практической точки зрения, диапазон таких слабых связей узок и менее интересен в сравнении с гораздо более заметной областью не слишком малых κ_1, κ_2 порядка единицы, соответствующей хорошо развитым нелинейным колебаниям.

Факт, что $\varepsilon \ll 1$ делает систему (2) сингулярно возмущенной. Медленными переменными являются концентрации электронов u_1, u_2, быстрыми — плотности фотонов v_1, v_2. Стандартной практикой исследования подобных систем служит адиабатическое исключение быстрых переменных по методу многих масштабов (например, [11]). Для расщепления полной системы (2) на быструю и медленную подсистемы введем «быстрое» время $\theta = \tau / \varepsilon$. Заменив в (2) τ на $\theta\varepsilon$ и положив $\varepsilon = 0$, получаем

$$\begin{aligned} u_1' &= u_2' = 0; \\ v_1' &= (u_1 - \delta v_1 - \kappa_2 v_2) v_1; \\ v_2' &= (u_2 - \delta v_2 - \kappa_1 v_1) v_2, \end{aligned} \tag{5}$$

где штрихи означают дифференцирование по θ. Это быстрая подсистема, в которой u_1 и u_2 заменены их начальными значениями и рассматриваются как параметры. Она дает внутреннее решение, пригодное для $\tau = O(\varepsilon)$.

Полагая в (2) $\varepsilon = 0$, получаем медленную подсистему

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \gamma_1 - (u_1 + 1) v_1 - u_1; \\ \dot{u}_2 &= \gamma_2 - (u_2 + 1) v_2 - u_2; \\ 0 &= (u_1 - \delta v_1 - \kappa_2 v_2) v_1; \\ 0 &= (u_2 - \delta v_2 - \kappa_1 v_1) v_2, \end{aligned} \tag{6}$$

которая порождает внешнее решение, корректное для $\tau = O(1)$. В сингулярном пределе $\varepsilon \to 0$ первая пара уравнений системы (6) определяет медленный поток на поверхности (медленном многообразии), задаваемой второй парой уравнений (6), являющихся алгебраическими. По теореме Фенихеля-Тихонова [11; 53], внешнее решение справедливо для тех u_1 и u_2, при которых квазистационарные состояния быстрой подсистемы (5) устойчивы.

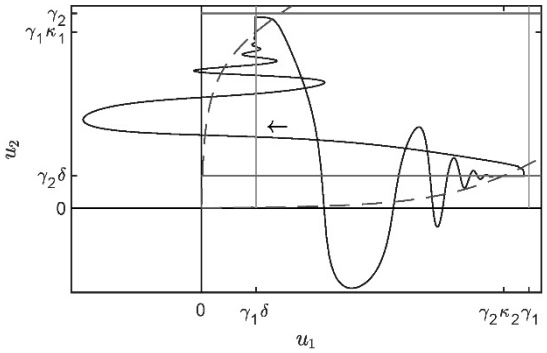
Мы предполагаем, что динамика полной системы (2) в четырехмерном фазовом пространстве (u_1, u_2, v_1, v_2) состоит из двух типов движений: быстрой посадки на медленное многообразие и медленного скольжения по нему до точки срыва (где внешнее решение теряет справедливость). После этого изображающая точка может скачком перейти на другую устойчивую ветвь медленного многообразия и продолжить по ней движение.

Таким образом, следует найти все квазистационарные состояния быстрой подсистемы (5), отобразить границы их устойчивости на медленной фазовой плоскости (u_1, u_2) и исследовать динамику системы (6) с помощью кусочно-непрерывных функций.

Быстрая подсистема (5) имеет четыре квазистационарных состояния — тривиальное, два несимметричных и одно симметричное (медленные переменные u_1, u_2 считаются замороженными):

$$\begin{aligned} Q &: \quad \tilde{v}_1 = 0, \tilde{v}_2 = 0; \\ Q_1 &: \quad \tilde{v}_1 = u_1 / \delta, \tilde{v}_2 = 0; \\ Q_2 &: \quad \tilde{v}_1 = 0, \tilde{v}_2 = u_2 / \delta; \\ Q_{12} &: \quad \tilde{v}_1 = (\kappa_2 u_2 - \delta u_1) / (\kappa_1 \kappa_2 - \delta^2), \tilde{v}_2 = (\kappa_1 u_1 - \delta u_2) / (\kappa_1 \kappa_2 - \delta^2). \end{aligned} \tag{7}$$

Существование и устойчивость квазистационарных состояний (7) определяется положением изображающей точки на плоскости медленных переменных (u_1, u_2), изображённой на рисунке 1. Для наглядности оси координат рисунка подвергнуты масштабному преобразованию $u_i \to \operatorname{arcsh}(u_i / \gamma_i \delta)$. Q, Q_1 и Q_2 существуют при любых $u_1, u_2 \geqslant 0$. Q — всегда неустойчивый узел; Q_1 и Q_2 — устойчивые узлы соответственно при $\delta u_2 < \kappa_1 u_1$ и $\delta u_1 < \kappa_2 u_2$, в противном случае это седла. Для не слишком слабой связи $\kappa_1 \kappa_2 > \delta^2$ квазистационарное состояние Q_{12} существует и неустойчиво по типу седла для всех u_1 и u_2 удовлетворяющих условию $\delta u_1 / \kappa_2 < u_2 < u_1 \kappa_1 / \delta$, т.е. внутри раствора угла, образованного линиями $\delta u_1 = \kappa_2 u_2$ и $\kappa_1 u_1 = \delta u_2$. Ниже верхней штриховой линии $\kappa_1 u_1 = \delta u_2$ находится область излучения лазера 1, выше нижней штриховой линии $\kappa_2 u_2 = \delta u_1$ — лазера 2. Область сокращается по мере ослабления силы связи.



Параметры расчета: $\varepsilon = 0.73 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_1 = 1.2$; $\gamma_2 = 1$; $\kappa_1 = 0.5$; $\kappa_2 = 0.8$; $\delta = 0.01$

Рисунок 1. Фазовая плоскость медленных переменных u_1, u_2 при слабой связи и проекция на неё предельного цикла системы (2). Стрелкой указано направление движения изображающей точки

Пусть вначале Q_1 устойчиво, а Q_2 — нет. Излучает только лазер 1. Это соответствует положению точки на плоскости медленных переменных (u_1, u_2) где-то ниже линии $\delta u_1 = \kappa_2 u_2$. Пока $u_1 \gg \gamma_1 \delta$, динамика концентраций электронов (рассматриваемых как бифуркационные параметры для плотностей фотонов) описывается двумя независимыми уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \gamma_1 - ((u_1 + 1)/\delta + 1)u_1; \\ \dot{u}_2 &= \gamma_2 - u_2, \end{aligned} \tag{8}$$

которые представляют собой версию медленной подсистемы (6) для $v_1 = u_1 / \delta$ и $v_2 = 0$. Система (8) имеет устойчивое стационарное состояние

$$\begin{aligned} \hat{u}_1^{(1)} &= ((1 + (4\gamma_1 + 2 + \delta)\delta)^{1/2} - 1 - \delta)/2 = \gamma_1 \delta + O(\delta^2); \\ \hat{u}_2^{(1)} &= \gamma_2, \end{aligned} \tag{9}$$

которое лежит приблизительно на пересечении прямых $u_1 = \gamma_1 \delta$ и $u_2 = \gamma_2$. Направляясь к нему, траектория пересекает линию $\delta u_1 = \kappa_2 u_2$ и входит в область бистабильности Q_1 и Q_2. Однако излучает попрежнему только лазер 1.

Ввиду малости δ переменная u_1 меняется быстрее, чем u_2. Поэтому изображающая точка подойдет к вертикальной линии $u_1 = \hat{u}_1^{(1)} \approx \gamma_1 \delta$ намного раньше, чем к горизонтальной линии $u_2 = \hat{u}_2^{(1)} = \gamma_2$.

Заметим, что, согласно формулам (3), $\hat{u}_1^{(1)}$ — это стационарная инверсная заселенность в свободном лазере 1. В непосредственной близости к фокальной точке разделение переменных на медленные и быстрые для лазера 1 теряет смысл, и в силу этого первое уравнение системы (8) с адиабатически исключенной переменной v_1 дольше неадекватно. Вместо него следует написать нередуцированную систему уравнений свободного лазера 1, описывающую затухающие колебания вблизи устойчивого фокуса:

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \gamma_1 - (u_1 + 1)v_1 - u_1; \\ \varepsilon\dot{v}_1 &= (u_1 - \delta v_1)v_1. \end{aligned} \tag{10}$$

На фазовой плоскости медленных переменных u_1 и u_2 эти колебания происходят в горизонтальном направлении и наложены на независимое вертикальное движение изображающей точки вдоль нуль-изоклины $\dot{u}_1 = 0$ (уравнение которой суть $u_1 = \hat{u}_1^{(1)} \approx \gamma_1\delta$) медленной подсистемы (6) по направлению к точке (9).

На пути к стационарному состоянию (9) траектория должна пересечь линию $\kappa_1 u_1 = \delta u_2$. Как только это случится, узел Q_1 быстрой подсистемы (5) будет поглощен седлом Q_{12}. Единственным устойчивым квазистационарным состоянием останется Q_2. Лазер 1 погаснет, а вместо него начнет излучать лазер 2.

Теперь, взяв за начальные условия $u_1 = \gamma_1\delta$ и $u_2 = \gamma_1\kappa_1$, мы должны снова вернуться к медленной подсистеме (6), движение которой будет происходить уже по другой устойчивой ветви медленного многообразия. На той ветви все события развиваются совершенно аналогично уже описанным выше. Переменная u_2 сначала сравнительно быстро монотонно уменьшается со скоростью порядка $1/\delta$, стремясь к значению $\hat{u}_2^{(2)} = \gamma_2\delta + O(\delta^2)$, а потом совершает около $\gamma_2\delta$ затухающие колебания. Переменная u_1 относительно медленно увеличивается по направлению к $\hat{u}_1^{(2)} = \gamma_1$, пока не достигнет уровня $\gamma_2\kappa_2$. Там лазеры 1 и 2 вновь поменяются ролями и начнется новый цикл незатухающих колебаний.

Обсуждение

Таким образом, система уравнений (2), моделирующая связанные лазеры, при не слишком слабой связи совершает релаксационные автоколебания. Колебания интенсивности излучения лазеров происходят строго в противофазе. На рисунке 2 показаны временны́е развертки плотности фотонов и концентрации электронов для обоих лазеров. Колебания инверсной заселенности имеют пилообразную форму. Их размах остается конечным и, что важно, не зависит от параметра δ.

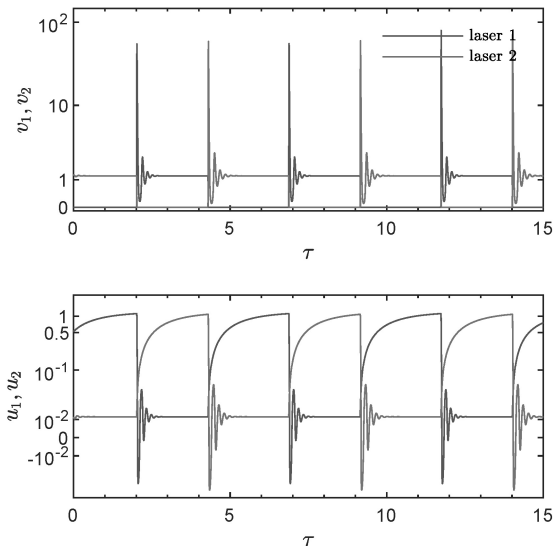


Рисунок 2. Антифазные колебания плотности фотонов (верхний график) и концентрации электронов (нижний график) двух связанных лазеров

Времена движения по каждой из двух ветвей медленного многообразия, задаваемого парой алгебраических уравнений системы (6), вносят основной вклад в период колебаний T. Эти времена определяются динамикой медленных переменных u_1, u_2 и в нулевом порядке по ε и δ могут быть найдены интегрированием медленных уравнений движения (6) с соответствующими граничными условиями $(0, \gamma_2\kappa_2)$ и $(0, \gamma_1\kappa_1)$. Тем самым для периода колебаний получается простая оценка:

$$T \approx \ln(\kappa_2\gamma_2/\gamma_1 - 1) + \ln(\kappa_1\gamma_1/\gamma_2 - 1). \quad (11)$$

Интересно, что, согласно (11), период зависит только от отношения накачек, но не от каждой из них по отдельности, и совсем не зависит от конкретной величины δ.

Плотности фотонов v_1 и v_2 периодически изменяются между практически полным отсутствием излучения и постоянными уровнями γ_1 и γ_2. Передний фронт каждого прямоугольного импульса света состоит из выраженного пичка, за которым следуют быстрозатухающие высокочастотные колебания, соответствующие собственным переходным колебаниям излучения свободного лазера. Высота пичка, согласно формулам (7) при $\delta \to 0$ становится бесконечной.

В пределах одного периода колебаний интенсивности света выделяются следующие фазы:

1) v_1 исчезающе мало, в то время как v_2 примерно равно стационарному значению γ_2 для свободного лазера. u_1 увеличивается благодаря накачке, пока не будут компенсированы потери в резонаторе лазера 1;

2) по достижении достаточной инверсной заселенности создаются условия для излучения лазера 1. Ввиду быстрой динамики фотонов возникает яркая короткая вспышка. Резко возросшая интенсивность света в лазере 1 формирует управляющий сигнал для пропорционального снижения добротности резонатора лазера 2, который в ответ гаснет;

3) путем затухающих колебаний v_1 и u_1 сравнительно быстро достигают постоянных значений, характерных для свободного лазера 1. При этом v_2 практически равно нулю, а u_2 медленно увеличивается подобно u_1 в фазе 1;

4) u_2 достигает необходимого уровня для появления излучения в лазере 2. Резонатор лазера 1 получает управляющий сигнал о соответственном уменьшении добротности, из-за чего излучение в лазере 1 пропадает. В лазере 2 идет установление постоянных уровней v_2 и u_2 через быстрозатухающие колебания. Последовательность повторяется.

Можно заметить, что в любой момент времени в связанной системе один из лазеров находится в потухшем состоянии, а другой при этом ведет себя как свободный. Следующая особенность динамики выражается в том, как инверсные заселенности управляют включением и выключением генерации по закону: «Всё или ничего». Когда u_1, например, поднимается выше некоторого порогового уровня (определяемого величиной потерь в лазере 1), лазер 1 начинает излучать, заставляя лазер 2 погаснуть. Поэтому моменты появления и исчезновения излучения определяются циклическим гистерезисом концентраций электронов.

Как уже упоминалось, наличие запаздывания в традиционных схемах синхронизации лазеров является необходимым условием появления колебаний. Противофазные колебания в нашей модели не требуют такой задержки, хотя введение ее, несомненно, может быть предметом отдельного исследования.

Наиболее интригующей особенностью рассмотренной модели связанных лазеров является то, что каждый из лазеров, взятый в отдельности, работает в непрерывном режиме постоянной интенсивности, без пульсаций. Однако во взаимодействии, после наложения перекрестной связи между лазерами в форме билинейных потерь, результирующая система демонстрирует автоколебания. В этом отношении наша модель представляет общефизический интерес. Дело в том, что классическая теория синхронизации предполагает, что даже в несвязанном состоянии каждая отдельная подсистема совершает незатухающие колебания. Однако возможны случаи, когда локальная связь между элементами системы не просто меняет характер колебаний, устанавливая общую частоту или постоянную разность фаз, но и служит причиной появления колебаний в системе из индивидуально покоящихся элементов. Такие колебания получили название «пробужденных» (awakened) [12].

Впервые на возможность «пробужденных» автоколебаний указал С. Смейл [13], построив абстрактную модель взаимодействия двух биологических клеток, каждая из которых содержит набор из четырех метаболитов, реагирующих по законам химической кинетики. Отдельно взятая клетка «мертва» в том смысле, что концентрации метаболитов пребывают в стационарном состоянии. Однако после включения линейной обменной связи система «оживает», проявляя автоколебательное поведение. Под влиянием пионерской работы Смейла в дальнейшем были предложены реалистические модели возникновения синхронных колебаний в системах связанных неосциллирующих электриче-

ски-активных клеток [14, 15]. Наша модель представляет собой физическую систему с аналогичным феноменом.

Комментируя свой пример, Смейл заметил, что «труднее уменьшить число веществ в задаче до двух или даже до трех» [13; 26]. В отличие от модели Смейла, связь между затухающими осцилляторами в нашей системе нелинейна, и это делает «пробужденные» синхронные колебания возможными уже для двух фазовых переменных.

Заключение

В формализме скоростных уравнений нами построена модель двух полупроводниковых лазеров, перекрестно связанных так, что каждый из них может регулировать потери в резонаторе другого. Показано, что при умеренно слабой связи в системе устанавливается синхронный автоколебательный режим, в котором лазеры излучают попеременно, в противофазе. Период синхронных колебаний не зависит от силы связи, а определяется накачками и может быть сделан произвольно большим. При сильной связи между лазерами система бистабильна, и в ней может наблюдаться гистерезис.

References

1 Erneux, T., & Glorieux, P. (2010). *Laser Dynamics*. New York, NY: Cambridge University Press, 361 p.

2 Uchida, A. (2012). *Optical communication with chaotic lasers*. Weinheim: Wiley-VCH, 640 p.

3 Soriano, M.C., et al. (2013). Complex photonics: dynamics and applications of delay-coupled semiconductors lasers. *Reviews of Modern Physics, 85, 1*, 421–470.

4 Kreinberg, S., et al. (2019). Mutual coupling and synchronization of optically coupled quantum-dot micropillar lasers at ultra-low light levels. *Nature Communications, 10, 1*. Article ID 1039.

5 Kim, M.-Y., et al. (2005). Scaling behavior of laser population dynamics with time-delayed coupling: theory and experiment. *Physical Review Letters, 94,* 8. Article ID 088101.

6 Javaloyes, J., Mandel, P., & Pieroux, D. (2003). Dynamical properties of lasers coupled face to face. *Physical Review E., 67, 3*, Article ID 036201.

7 Nguyen, B.A., & Mandel, P. (1999). Stability of two loss-coupled lasers. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 1, 3*, 320–324.

8 Agrawal, G.P., & Dutta, N.K. (2001). *Semiconductor lasers.* (2nd ed.) Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 616 p.

9 Kennedy, C.J., & Barry, J.D. (1974). Stability of an intracavity frequency-doubled Nd: YAG laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics, 10, 8*, 596–599.

10 Jeys, T.H. (1991). Suppression of laser spiking by intracavity second harmonic generation. *Applied Optics, 30, 9*, 1011–1013.

11 Kuehn, C. (2015). *Multiple Time Scale Dynamics*. New York, NY: Springer, 815 p.

12 Szatmari, I., & Chua, L.O. (2008). Awakening dynamics via passive coupling and synchronization mechanism in oscillatory cellular neural/nonlinear networks. *International Journal of Circuit Theory and Applications, 36, 5–6*, 525–553.

13 Smale, S. (1974). A mathematical model of two cells via Turing's equation. *Some Mathematical Questions in Biology V* (ed. by Cowan J.D.) Providence, RI: American Mathematical Society, P. 15–26.

14 Loewenstein, Y., Yarom, Y., & Sompolinsky, H. (2001). The generation of oscillations in networks of electrically coupled cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 98, 14*, 8095–8100.

15 Gomez-Marin, A., Garcia-Ojalvo, J., & Sancho, J.M. (2007). Self-sustained spatiotemporal oscillations induced by membrane-bulk coupling. *Physical Review Letters, 98, 16*. Article ID 168303.

А. Мұстафин

Модуляция сапалығына байланысты екі лазердің динамикасы

Жылдамдық теңдеулерін жақындатқанда екі бірмодалы жартылай өткізгіш лазерді синхрондаудың математикалық моделі құрылған. Модель екі лазердеде электрондар концентрациясы мен фотондардың тығыздығына арналған сызықты емес қарапайым дифференциалдық теңдеулер жүйесі болып табылады. Бұл модельдің ерекшелігі лазерлер арасындағы байланыс сипатында — ол әрбір лазердің меншікті шығыны екіншісінің сәулелену қарқындылығына пропорционал болатындай етіп жасалған. Бұдан басқа, теңдеулерде сәулеленудің сызықтық емес (квадраттық) шығындары ескеріледі. Жүйе бифуркация теориясы және көптеген масштабтар әдістерімен зерттелді. Модель лазерлер арасындағы күшті және әлсіз байланыс кезінде әртүрлі сипатта. Күшті байланыс кезінде жүйеде тербелістер жоқ, сонымен қатар гистерезис пен бистабильділік болуы мүмкін. Жүйенің әлсіз байланысы кезінде шекті цикл және релаксациялық тербелістер пайда болуы мүмкін. Лазерлердегі фотондар

тығыздығының синхронды тербелістері антифазада орын алады. Ұзын периодикалық осцилляцияларды алу үшін ұсынылған синхрондау сұлбасын қолдану мүмкіндігі туралы қорытынды жасалды.

Кілт сөздер: байланысты лазерлер, жылдамдық теңдеулері, синхрондау, оптикалық бистабильділік, релаксациялық тербелістер.

A. Mustafin

Dynamics of two lasers coupled via mutual cavity-loss modulation

A mathematical model for synchronization of two single-mode semiconductor lasers is built within the framework of the rate equations approximation. The model has the form of a system of nonlinear ordinary differential equations for electron concentrations and photon densities in both lasers. The lasers are coupled in such a way that the cavity losses of each device are proportional to the light intensity emitted by the other. Besides, the equations take into account the nonlinear (quadratic) losses. The system is analyzed by the methods of bifurcation theory and multiple scale techniques. It is shown that the model exhibits different behavior at strong and weak coupling between the lasers. At strong coupling, there is no oscillation in the system, though the phenomena of bistability and hysteresis are possible. At weak coupling, a stable limit cycle and spiky relaxation oscillations may emerge. It is found that synchronous oscillations of the photon density in lasers occur in antiphase. The proposed synchronization scheme could be useful in obtaining long-period pulsations.

Keywords: coupled lasers, rate equations, synchronization, optical bistability, relaxation oscillations.

DOI:10.31489/2019Ph4/24-29

UDC 29.19.04, 29.19.21

Zh. Karipbaev[1], D. Musakhanov[1, 2], V. Lisitsyn[2], G. Alpyssova[1], M. Golkovskii[3], L. Lisitsyna[4], A. Tulegenova[5], A. Akylbekov[1], A. Dauletbekova[1], K. Balabekov[1], A. Kozlovskii[6], A. Usseinov[1]

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan;
[2]Tomsk Politechnical University, Russia;
[3]Scientific Research Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia;
[4]Tomsk State University, Russia;
[5]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;
[6]Institute of Nuclear Physics, Nur-Sultan, Kazakhstan
(E-mail: zf1@mail.ru)

Synthesis, the study of the structure of YAG and YAGG phosphors in the radiation field

In the present work, an attempt is made to synthesize a phosphor using powerful hard radiation fluxes. The surface, elemental composition, structure, and luminescent characteristics of the obtained YAG:Ce ceramics were studied. Ceramics have a heterogeneous structure. The main phase of the obtained ceramics is YAG, which ranges from 72 to 91 % of the total volume of samples. The remaining volume of the samples consists of the Al_2O_3 and CeO_2 phases. The synthesized ceramics has the characteristic properties of YAG:Ce, YAGG:Ce phosphors. The surface condition and elemental surface composition of the synthesized ceramic sample were studied using a scanning electron microscope. The images showed that there are particles with a well-defined faceting, which indicates the formation of microcrystals. X-ray diffraction analysis of the synthesized ceramic samples was carried out on a diffractometer. X-ray diffraction analysis showed that the resulting ceramic has a high degree of crystallinity. The quantitative phase dependence was determined in the TOPAS-4.2 program. The results of measuring the luminescence spectra measured upon excitation of the specimen split surface are presented. The maximum luminescence of YAG:Ce ceramics accounts for 555 nm, the half-width of the band is 0.45 eV. In YAGG:Ce ceramics, the luminescence maximum at 555 nm, the half-width of the band is 0.48 eV.

Keywords: white LEDs, yttrium-aluminum garnet, phosphor, ceramics, synthesis in the radiation field.

1 Introduction

White light-emitting diodes (LEDs) are considered a good lighting devices due to their unsurpassed qualities, such as energy saving and long service life [1, 2]. In the most common LEDs, the blue radiation of the chip is converted into yellow by the phosphor. The combination of blue chip radiation and yellow phosphor gives white light. As phosphors, microcrystalline powders of yttrium-aluminum garnet (YAG:Ce), activated with cerium, are most often used [2–4].

YAG:Ce^{3+} phosphor emits in the range of 500–700 nm, the luminescence maximum is 550 nm [5]. The quantum efficiency of YAG:Ce^{3+} phosphor radiation can reach 85 % [6].

YAG:Ce phosphor is most often synthesized from metal oxides under extreme conditions: thorough mixing of the initial powders, high temperatures during sintering, crushing to the desired size, annealing at high temperatures. The reproducibility of the synthesis with this technology is clearly insufficient. Therefore, other methods are being developed: sol-gel method [7], combustion method [8], coprecipitation [9] and others. But all the methods of synthesis still end with high-temperature annealing. In the practice of industrial synthesis is dominated the method of solid-state reaction as the cheapest.

In recent years, radiation methods for modifying, synthesizing films and even ceramics have been developed [10, 11]. In this paper, it was attempted phosphor synthesis using powerful hard radiation fluxes. The surface, elemental composition, structure and luminescent characteristics of obtained YAG:Ce ceramics were studied.

2 Objects and research methods

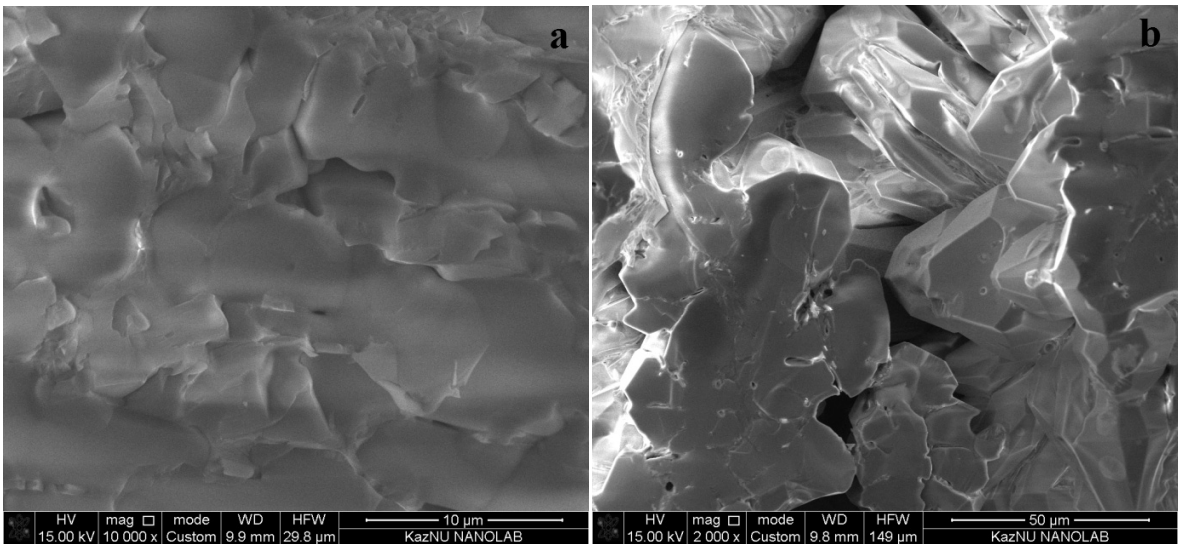
YAG:Ce and YAGG:Ce ceramics samples were synthesized in the radiation field. For the synthesis, a mixture from a powders mixture of Al_2O_3, Y_2O_3, Gd_2O_3, and Ce_2O_3 oxides brands ch.c was prepared. The ratio of oxides in the charge was equal to stoichiometric. With cerium dopping for activation and gadolinium

for modification, the ratio of the initial compositions was adjusted. It was supposed that the activator and modifier ions enter the lattice by replacing yttrium ions. The oxide powders had particles form of irregular shape with dimensions of about 1 micron and less. In a liquid medium, the particles are trying to combine into complexes. The charge was poured into a copper melting pot with a layer 5 mm. A flux of electrons with an energy of 1.4 MeV from the ELV-6 accelerator with an average power of 23 kW/cm^2 was directed to the melting pot with the charge. The beam section of a Gaussian shape at half-height was 0.7 cm^2. The beam scanned on the surface of the melting pot at a speed of 1 cm/s. All surface processing of the melting pot was 25 s. As a result of processing, ceramic samples were formed in the melting pot in the form of droplets with sizes up to 0.5×1.0×2.0 cm. The samples had a high hardness close to sapphire. The split plane had a characteristic for ceramics form with a rough surface. YAG:Ce ceramics samples had a light yellow color like a YAG:Ce and dark yellow-YAGG:Ce.

The state of the surface and the elemental composition of synthesized ceramics samples surface were studied using Hitachi TM-scanning electron microscope (SEM) 3030 with the Bruker XFlash MIN SVE energy dispersive analysis system at an accelerating voltage of 15 kV. X-ray diffraction analysis of synthesized ceramic samples was performed on a D8 ADVANCE ECO diffractometer with an X-ray tube with a copper anode and a graphite monochromator. Diffraction patterns were recorded in the range of angles (20–110°) 2θ with a step of 0.02 2θ. Quantitative phase dependence was determined in the TOPAS-4.2 program. The half-width of the measured reflections was used to determine the sizes of crystallites and microstresses in the sample. The ratio of the integral intensity of reflections to the total intensity of x-rays was used to evaluate the degree of crystallinity of the sample.

3 SEM images and elemental analysis of phosphors

The morphology, elemental composition, structure ofobtained samples were investigated. In the chips SEM images it can be seen that the ceramic samples are soldered to each other particles with sizes of ~ 5...50 microns (Fig. 1). Most particles have a melt appearance. There are particles with a well-defined cut, which indicates about microcrystals formation.



a — YAG:Ce; *b* — YAGG:Ce

Figure 1. The morphology of synthesized ceramics in a radiation field

The elemental composition of obtained YAG:Ce, YAGG: Ce samples differ from initial composition in charge. The proportion of aluminum ions exceeded the charge during the charge formation relative to Y, Ce, Gd. Therefore, the resulting ceramics has a non-stoichiometric composition (Tables 1, 2).

Table 1

The elemental composition of the surface of obtained samples of ceramics

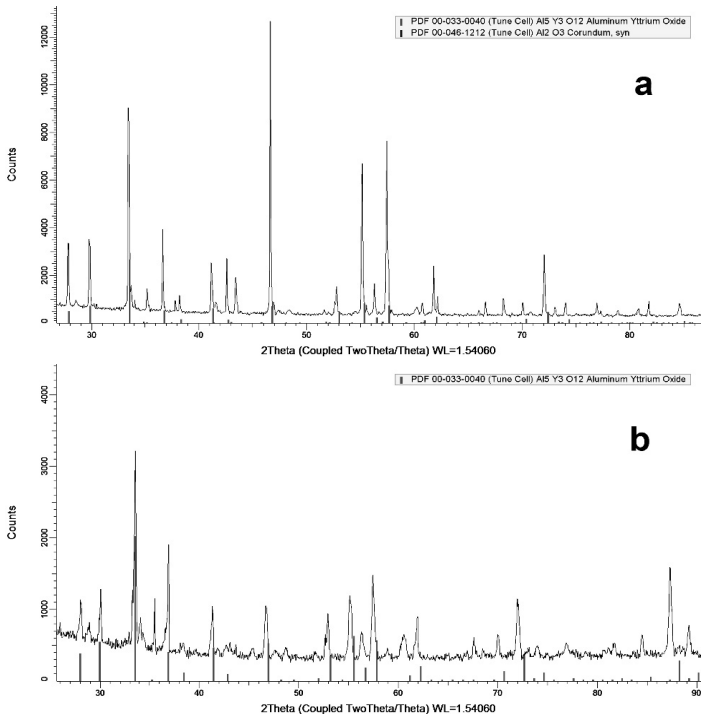
Atom (at.%)	Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (34,1 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт)	Al_2O_3 (59,5 %) + Y_2O_3(35,7 %) + Ce_2O_3(4,8 %) (22 КВт)	Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (22,7 %) + Gd_2O_3 (11,4 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт)	Al_2O_3 (59,5 %) + Y_2O_3 (23,8 %) + Gd_2O_3 (11,9 %) + Ce_2O_3 (4,8 %) (25 КВт)
O	65.84	62.74	69.58	57.51
Al	26.16	33.02	28.72	36.36
Y	7.23	3.66	0.93	4.15
Ce	0.77	0.53	0.63	0.71
Gd	–	0.06	0.15	1.26

Table 2

The elemental composition of the crushed phosphor

Atom (at.%)	Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (34,1 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт)	Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (22,7 %) + Gd_2O_3 (11,4 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт)	Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (34,1 %) + Ce_2O_3(9,1 %) (25 КВт)
O	57.39	52.81	66.32
Al	33.26	37.76	25.65
Y	7.55	7.29	7.49
Ce	1.8	1.35	0.54
Gd	–	0.8	–

X-ray structural analysis showed that the resulting ceramics has a high degree of crystallinity, about 80 % (Fig. 2). The basis of YAG ceramics is made up of crystals with a size of 47 nm, YAGG — 81 nm. The existence of a separate phase of corundum was found in ceramics. The lattice parameters of YAG, YAGG, and Al_2O_3 are close to those known for crystals: *a*, *b*, ≈12.023 in YAG, 12.055 in YAGG, 4.75 in Al_2O_3 (Table 3).



a — Al_2O_3 (59,5 %) + Y_2O_3(35,7 %) + Ce_2O_3 (4,8 %);
b — Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (22,7 %) + Gd_2O_3 (11,4 %) + Ce_2O_3 (9,1 %)

Figure 2. Diffractograms of the investigated samples

Table 3

Results of X-ray diffraction analysis of synthesized ceramics

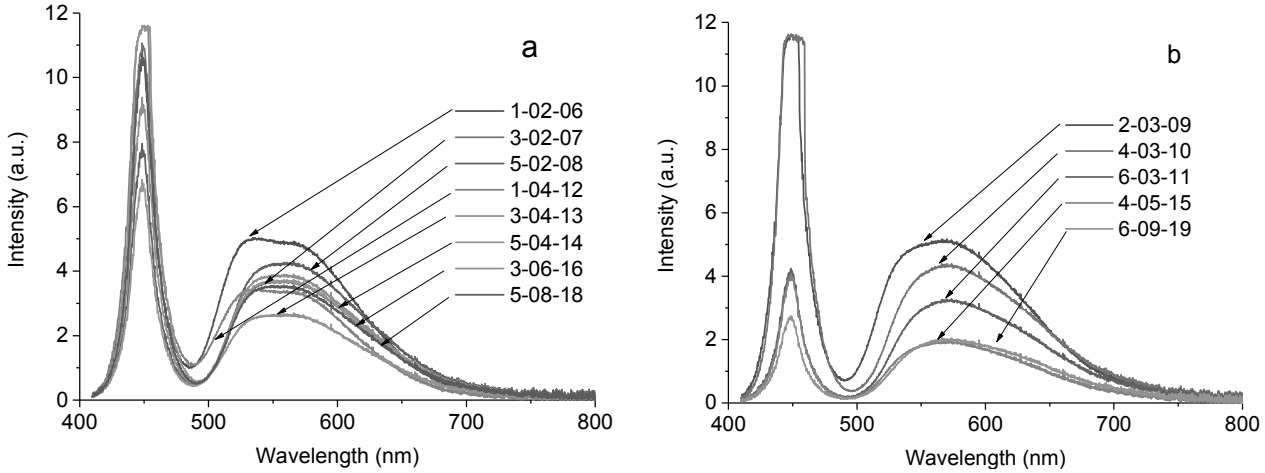
Initialcomposition	Phase	Lattice parameters, Å	Crystallite size, nm	Crystalline degree, %	Phase contain, %
Al_2O_3 (59,5 %) + Y_2O_3 (35,7 %) + Ce_2O_3 (4,8 %) (22 КВт, 12.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 11.98300	64.5	91.0	71.7
	Al_2O_3 — Rhombo.H.axes — R-3c(167)	a = 4.74657, c = 13.01621	61.5		28.3
Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (34,1 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт, 11.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 11.96366	48.3	91.1	82.4
	Al_2O_3 — Rhombo.H.axes — R-3c(167)	a = 4.80604, c = 13.04118	44.7		14.9
	CeO_2 — Cubic Fm-3m(225)	a = 5.53065	51.7		2.6
Al_2O_3 (59,5 %) + Y_2O_3 (23,8 %) + Gd_2O_3 (11,9 %) + Ce_2O_3 (4,8 %) (25 КВт, 11.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 11.95920	28.7	88.1	83.0
	Al_2O_3 — Rhombo.H.axes — R-3c(167)	a = 4.72784, c = 12.93445	42.9		17.0
Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (34,1 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт, 11.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 12.01313	46.1	86.3	91.2
	Al_2O_3 — Rhombo.H.axes — R-3c(167)	a = 4.76400, c = 12.99785	44.4		8.8
Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (34,1 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт, 12.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 11.94255	47.4	92.4	82.3
	Al_2O_3 — Rhombo.H.axes — R-3c(167)	a = 4.79379, c = 13.11022	44.7		2.0
	CeO_2 — Cubic Fm-3m(225)	a = 5.52306	50.6		15.7
Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (22,7 %) + Gd_2O_3 (11,4 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22 КВт, 11.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 11.96328	71.5	89.8	73.6
	Al_2O_3 — Rhombo.H.axes — R-3c(167)	a = 4.79285, c = 13.07166	98.2		1.7
	CeO_2 — Cubic Fm-3m(225)	a = 5.50465	81.7		24.6
Al_2O_3 (56,8 %) + Y_2O_3 (22,7 %) + Gd_2O_3 (11,4 %) + Ce_2O_3 (9,1 %) (22КВт, 12.04.2018)	$Al_2Y_3O_{12}$ — Cubic Ia-3d(230)	a = 11.91594	48.5	86.3	100

Thus, obtained ceramics is a system of small crystallites, which can be combined into microcrystals up to 50 μm, has a dominant YAG (or YAGG) phase, the composition is close to the corresponding this phase, but non-stoichiometric.

4 Photoluminescence when excited by a blue LED

The synthesized YAG ceramics samples intensively luminesce when excited by radiation of a chip at 460 nm in the range of 500–700 nm, like a YAG:Ce and YAGG:Ce phosphors [9, 12–14].

Figure 3 (*a*, *b*) shows the results of measuring the luminescence spectra measured when excited the sample splitting surface. The whole area of split well luminesces, however, the brightness distribution over the surface is non-uniform. The luminescence maximum of YAG:Ce ceramics falls on 555 nm, the band half-width is 0.45 eV. In YAGG:Ce ceramics, the luminescence maximum at 555 nm, the band half-width is 0.48 eV. The shift of the band in YAGG:Ce ceramics relative to the strip in YAG:Ce is a characteristic feature of phosphors containing Gd^{3+} ions as modifiers. The half-widths of the luminescence bands in the synthesized ceramic samples are within the limits of the corresponding phosphors and ceramics [15] based on YAG:Ce, measured in [13, 16].



a — YAG:Ce; *b* — YAGG:Ce

Figure 3. Luminescence spectra of ceramics when excited at 460 nm

5 Discussion

YAG:Ce ceramics first synthesized in the field of powerful flux of radiation. Ceramics has a heterogeneous structure. The main phase of obtained ceramics is YAG, which makes up from 72 to 91 % of the total volume of the samples. The remaining volume of samples consists of phases Al_2O_3 and CeO_2. Synthesized ceramics has characteristics like a YAG:Ce, YAGG:Cephosphors.

Thus, the synthesis of luminescent YAG:Ce, YAGG:Ce ceramics in a radiation field is possible. The advantages of this method are obvious. The synthesis time is 1 second. The efficiency of synthesis compared to the commonly used thermal is determined by ionization processes, but not by thermal ones. With used irradiation modes, during the exposure to the radiation flux, the charge absorbs 6.10^{23} eV/cm^3 in the charge, ~ $6\ldots10^{22}$ cm^{-3} electronic excitations (ions, excitons, electron-hole pairs) are creating. Consequently, the formation of structural phases occurs from a set of charge elements with a high degree of ionization, that is, from a state close to the plasma state. This provides good mixing of the elements of the composition, can be obtained ceramics with a composition close to stoichiometric. The radiation field, the distribution of the absorbed energy in the charge can be well controlled. Consequently, synthesis in the radiation field can provide high reproducibility of obtained materials.

References

1 Kong, D.S., Kim, M.J., Song, H.J., Cho, I.S., Jeong, S., & Shin, et al. (2016). Fine tuning of emission property of white light-emitting diodes by quantum-dot-coating on YAG:Ce nanophosphors. *Appl. Surf. Sci, 379*, 467–473.

2 Nakamura, S., Mukai, T., & Senoh, M. (1994). Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes. *J. Appl. Phys., 76(8189)*, 1687–1689.

3 Xia, Z., & Meijerink, A. (2017). Ce^{3+}-Doped garnet phosphors: composition modification, luminescence properties and applications. *Chem. Soc. Rev., 46*, 275–299.

4 Lee, S., & Seo, S.Y. (2002). Optimization of yttrium aluminum gamet: Ce^{3+} phosphors for white light-emitting diodes by combinatorial chemistry method. *J. Electrochem. Soc., 149*, 85–88.

5 Jacobs, R.R., Krupke, W.F., & Weber, M.J. (1978). Measurement of excited-state-absorption loss for Ce^{3+} in $Y_3Al_5O_{12}$ and implications for tunable 5d→4f rare-earth lasers. *Applied Physics Letters, 33(5)*, 410–415.

6 Ming, L., Ding, Z., Cui P, & Li, Zhe Z. (2016). Low temperature molten salt synthesis of YAG:Ce spherical powder and its thermally stable luminescent properties after post-annealing treatment. *Materials Science in Semiconductor Processing, 44*, 101–107.

7 Kareiva, A. (2011). Aqueous Sol-Gel Synthesis Methods for the Preparation of Garnet Crystal Structure Compounds. *Materials science, 17, 4*, 428–437.

8 Fu, Y.-P. (2006). Preparation of $Y_3Al_5O_{12}$:Ce powders by microwave induced combustion process and their luminescent properties. *J. Alloys Compd.*, 181–185.

9 Hyun Song, Y., Eun Kyung, J., Byung Woo, J., Mong Kwon, J., Kim, E.Y., & Lee, C.W., et al. (2017). Design of laser-driven high-efficiency Al_2O_3/YAG:Ce^{3+} ceramic converter for automotive lighting: Fabrication, luminous emittance, and tunable color space. *Dyes and Pigments, 139*, 688–692.

10 Yi-Chen, Ch., & Yung-Tang, N. (2017). Microstructure and photoluminescence properties of laser sintered YAG:Ce phosphor ceramics. *Journal of the European Ceramic Society,* 223–227.

11 Yung-Tang, N., Yi-Chen, Ch., & I-Chi, Ch. (2018). Microstructure, phase transformation and photoluminescence of YAG:Ce ceramics by CO_2 laser sintering. *Journal of Alloys and Compounds, 797*, 110–116.

12 Zehua, L., & Shuxing, L., et.al. (2018). Composite ceramic with high saturation input powder in solid-state laser lighting: Microstructure, properties, and luminous emittances. *ScienceDirect Ceramics International, 44*, 20232–20238.

13 Hongling, S., & Chen, Z., et al. (2014). Luminescence properties of YAG:Ce, Gd phosphors synthesized under vacuum condition and their white LED performances. *Optical Materials Express, 4(4)*, 649–655.

14 Xianqiang, Ch., Haiming, Q., Ye, Zh., Jun, J., & Haochuan, J. (2015). Highly transparent ZrO_2-doped $(Ce, Gd)_3Al_3Ga_2O_{12}$ ceramics prepared via oxygen sintering. *Journal of the European Ceramic Society, 35*, 3879–3883.

15 Zehua, L., & Li, S. et al. (2019). The effect of the porosity on the Al_2O_3–YAG:Ce phosphor ceramic: Microstructure, luminescent efficiency, and luminous stability in laser-driven lighting. *Journal of Alloys and Compounds, 785*, 125–130.

16 Dusan, B., & Krstic, V. (2018). The effect of SiC addition on photoluminescence of YAG:Ce phosphor for white LED. *Journal of the European Ceramic Society, 38*, 5519–5524.

Ж. Карипбаев, Д. Мусаханов, В. Лисицын, Г. Алпысова,
М. Голковский, Л. Лисицына, А. Тулегенова, А. Акылбеков,
А. Даулетбекова, К. Балабеков, А. Козловский, А. Усеинов

Радиация өрісіндегі ИАГ және ИАГГ люминофорларының құрылымын зерттеу және синтездеу

Мақалада қатты радиацияның күшті ағындарын пайдаланып, люминофорды синтездеуге әрекет жасалды. Алынған YAG:Ce керамиканың беткі құрылымы, элементттік құрамы және люминесценттік қасиеттері зерттелді. Керамика гетерогенді құрылымға ие. Алынған керамиканың негізгі фазасы YAG болып табылады, ол үлгілердің жалпы көлемінің 72–91 % құрайды. Үлгілердің қалған көлемі Al_2O_3 және CeO_2 фазаларынан тұрады. Синтезделген керамика YAG:Ce, YAGG:Ce люминофорларының сипаттамаларына тән. Сканерлі электронды микроскоптың көмегімен синтезделген керамика беті мен бетінің күйі зерттелді. Зерттеу нәтижесінде микрокристалдардың пайда болуын көрсететін нақты анықталған бөлшектер бар екендігі көрсетілді. Синтезделген керамикалық үлгілердің рентгендік талдауы дифрактометрде жүргізілді. ТОПАС-4.2 бағдарламасында сандық фаза тәуелділігі анықталды. Үлгілердің беттік бөліну кезіндегі люминесценттік спектрлерінің өлшеу нәтижелері келтірілген. YAG:Ce керамикасының максималды люминесценциясы: 555 нм құрайды, жолақтың жарты ені — 0,45 эВ. YAGG:Ce керамикасында люминесценцияның максималды мәні 555 нм, жолақтың жарты ені — 0,48 эВ.

Кілт сөздер: ақ жарық диодтары, иттрий-алюминий гранат, люминофор, керамика, радиация өрісіндегі синтез.

Ж. Карипбаев, Д. Мусаханов, В. Лисицын, Г. Алпысова,
М. Голковский, Л. Лисицына, А. Тулегенова, А. Акылбеков,
А. Даулетбекова, К. Балабеков, А. Козловский, А. Усеинов

Синтез, исследование структуры ИАГ и ИАГГ люминофоров в поле радиации

В статье предпринята попытка синтеза люминофора с использованием мощных потоков жесткой радиации. Проведены исследования поверхности, элементного состава, структуры и люминесцентные характеристики полученной YAG:Ce керамики. Керамика имеет гетерогенную структуру. Основной фазой полученной керамики является ИАГ, которая составляет от 72 до 91 % от всего объема образцов. Остальной объем образцов составляют фазы Al_2O_3 и CeO_2. Синтезированная керамика имеет характерные для ИАГ:Ce, ИАГГ:Ce люминофоров свойства. Состояние поверхности и элементный состав поверхности образца синтезированной керамики были изучены с использованием сканирующего электронного микроскопа. Снимки показали, что встречаются частицы с хорошо выраженной огранкой, это свидетельствует о формировании микрокристаллов. Рентгеноструктурный анализ синтезированных образцов керамики проводили на дифрактометре. Рентгеноструктурный анализ показал, что полученная керамика имеет высокую степень кристалличности. Количественная фазовая зависимость определялась в программе TOPAS-4.2. Приведены результаты измерения спектров люминесценции, измеренных при возбуждении поверхности раскола образцов. Максимум люминесценции ИАГ:Ce керамики приходится на 555 нм, полуширина полосы равна 0,45 эВ. В ИАГГ:Ce керамике максимум люминесценции на 555 нм, полуширина полосы равна 0,48 эВ.

Ключевые слова: белые светодиоды, иттрий-алюминиевый гранат, люминофор, керамика, синтез в поле радиации.

DOI: 10.31489/2019Ph4/30-38

UDC 524.832

Z.K. Shanina, O.V. Razina

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan
(E-mail: shaninazk@gmail.com)

Modified models of a free boson string and their solutions

In this paper we consider the modified models of a free boson string and examine their dynamics. Modified models of the boson string are investigated from the point of view of the second order formalism (the Polyakov action). The motion of the free string propagates in Minkowski space-time. The internal geometry of the free boson string is described by the metric $h_{\alpha\beta}$ having the signature of Minkowski. The classical string trajectory is described by the function X^{μ}. The introduction of the function K and the potential $V(X^{\mu})$ into the action of the boson string allows us to find new approaches to solving the problem of the boson string dynamics. For these modified models of the boson string the equations of motion are found. The equations of motion are obtained by varying the action with respect to X^{μ}. The energy-momentum tensor for considered models of the free boson string is calculated. Constraint conditions are obtained for all types of modified boson string models. It is proved that constraint conditions are satisfied for each considered modified model of the boson string. Solutions of the equations of motion for each modified boson string model are also considered and obtained. String's world sheet has been built for these solutions. It is shown that all solutions for these models satisfy the equations of motion and the constraint conditions.

Keywords: bozon string, action, equation of motion, energy-momentum tenzor, constraint conditions.

1 Introduction

Despite its successes, the Standard model of elementary particles must be built into a broader theory that would include gravity as well as strong and electroweak interactions. Currently, there is only one likely candidate for such a theory: string theory, which emerged in the 1960s as a not-so-successful model of hadrons and only later emerged as a possible theory of all interactions [1].

String theory touches on the deepest questions of the universe and is the most developed modern attempt to answer questions about the nature of fundamental interactions.

String models appeared in physics in the sixties and seventies of the XX century in attempts to describe the mechanism of strong interactions [2]. Strings are one-dimensional extended objects with a length of the order of 10^{-35} m, which is not a subject to observation at present. Their dynamics is considered on a two-dimensional surface — a world sheet — in the background manifold (n-dimensional space-time) and described geometrically. Bosonic models have meaning of twenty-six dimensions and their fluctuations are bosons, and fermion and superstring — in ten dimensions [3].

The boson string theory is a fundamental theory and most important concepts of string theory can be explained within this theory. Boson string models are considered and studied in [4, 5]. Generalized models of boson strings with potential and non-canonical kinetic term were considered in [6, 7].

Despite the numerous studies available in the field of boson string theory, this theory is not fully studied and requires further development. The need to study different models of boson strings is motivated by the study of the unification of all the interactions in nature. The study of bosonic string theory can be considered equivalent to the study of two-dimensional gravity associated with scalars.

The article described the bosonic string model and equations of motion; calculated tensor of energy-momentum for these models; the solution for the bosonic string. Conclusions are drawn.

2. Models of bosonic string

The action for the freely moving string can be constructed similarly to the action of a point particle. In the simplest case, the action is described by its d-dimensional Minkowski coordinates $X^{\mu}(\sigma,\tau)$. The parameters σ and τ set the points on the world sheet that the string sweeps when it moves; σ is the coordinate along the space-like direction and τ is along the time-like direction [8].

Let's introduce the metric $h_{\alpha\beta}$ and the inverse metric $h^{\alpha\beta}$ $(\alpha,\beta = 0,1)$ on the world sheet. The action has the form

$$S = -\frac{T}{2}\int d\tau \int d\sigma \sqrt{-h}K, \tag{1}$$

where $h = det(h_{\alpha\beta})$, T is the constant factor equal to string tension, K is the some function of its arguments. Consider several models for different K.

2.1. Model $K = F(Y)$

$$K = F(Y);$$

$$Y = h^{\alpha\beta}\partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X_\mu = h^{00}[\partial_0 X^\mu \partial_0 X_\mu] + h^{11}[\partial_1 X^\mu \partial_1 X_\mu] = h^{00}\dot{X}^{\mu 2} + h^{11}X'^{\mu 2}, \tag{2}$$

where the dot means the derivative with respect to τ and the prime — derivative with respect to σ.

Components of metric taken the form

$$h_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

We rewrite the action (1) as

$$S = -\frac{T}{2}\int d\tau \int d\sigma \sqrt{-h}F(Y). \tag{4}$$

In order to obtain the equations of motion of the boson string, we find the variation of action (4) with respect to X^μ

$$\delta S = -\frac{T}{2}\int d\tau \int d\sigma \sqrt{-h}\delta F(Y) = \frac{T}{2}\int d\tau \int d\sigma \sqrt{-h}F_Y[h^{00}\ddot{X}^\mu + h^{11}X''^\mu]\delta X^\mu.$$

Applying (3) we write down the equation of motion

$$F_Y(\ddot{X}^\mu - X''^\mu) = 0. \tag{5}$$

The energy-momentum tensor of two-dimensional field theory is written as

$$T_{\alpha\beta} = -\frac{2}{T}\frac{1}{\sqrt{-h}}\frac{\delta S}{\delta h^{\alpha\beta}} = 0. \tag{6}$$

In order to find the energy-momentum tensor, we vary action (4) with respect to $h^{\alpha\beta}$. We find the energy-momentum tensor for the considered model

$$\delta S_{h^{\alpha\beta}} = -\frac{1}{2}T\int\int d\tau d\sigma\left[\delta\sqrt{-h}F(Y) + \sqrt{-h}\delta F(Y)\right]. \tag{7}$$

The following formulas are useful for varying the action

$$\delta h = -hh_{\alpha\beta}\delta h^{\alpha\beta}, \tag{8}$$

it follows that

$$\delta\sqrt{-h} = -\frac{1}{2}\sqrt{-h}h_{\alpha\beta}\delta h^{\alpha\beta} \tag{9}$$

and

$$\delta F = F_Y \delta Y = F_Y Y_{h^{\alpha\beta}}\delta h^{\alpha\beta}. \tag{10}$$

Therefore (7) will take the form

$$\delta S_{h^{\alpha\beta}} = -\frac{1}{2}T\int\int d\tau d\sigma\sqrt{-h}\left[-\frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F + F_Y Y_{h^{\alpha\beta}}\right]\delta h^{\alpha\beta}. \tag{11}$$

Substituting (11) into (6) we obtain the energy-momentum tensor

$$T_{\alpha\beta} = F_Y Y_{h^{\alpha\beta}} - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F = F_Y\partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X_\mu - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F.$$

Since the metric on the world sheet has been calibrated, the vanishing of the energy-momentum tensor, i.e. $T_{\alpha\beta} = 0$, based on the equation of motion of the world sheet metric, should be introduced as additional constraint conditions

$$T_{\alpha\beta} = F_Y\partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X_\mu - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F = 0. \tag{12}$$

Taking into account (2) and (3) we write constraint conditions (12)

$$T_{00} = F_Y \dot{X}^2 - \frac{1}{2}F = 0; \tag{13}$$

$$T_{11} = F_Y X'^2 + \frac{1}{2}F = 0; \tag{14}$$

$$T_{01} = T_{10} = F_Y \dot{X}X' = 0. \tag{15}$$

From (13)–(15) follow that constraint conditions

$$\dot{X}^2 + X'^2 = 0;$$

$$\dot{X}X' = 0.$$

In relativistic string theory, these conditions are called orthonormal calibration.

Equation of motion (5) can have several solutions. Let's consider some models of these solutions.

2.1.1. Model $X^\mu = A_\mu \cos(\tau + \sigma)$.

$$\begin{aligned} \dot{X}^\mu &= -A_\mu \sin(\tau+\sigma); \\ \ddot{X}^\mu &= -A_\mu \cos(\tau+\sigma) = -X^\mu. \\ X'^\mu &= -A_\mu \sin(\tau+\sigma); \\ X''^\mu &= -A_\mu \cos(\tau+\sigma) = -X^\mu. \end{aligned}$$

Constraint conditions for this model

1)
$$\dot{X}^2 + X'^2 = 2A_\mu^2 \sin^2(\tau+\sigma) = 0;$$
$$A_\mu \neq 0 \Rightarrow \sin^2(\tau+\sigma) = 0;$$
$$\tau + \sigma = \pi n, n \in Z.$$

2)
$$\dot{X} \cdot X' = A_\mu^2 \sin^2(\tau+\sigma) = 0;$$
$$\tau + \sigma = \pi n, n \in Z.$$

Substitute the solutions into the equations of motion (5)

$$F_Y[-A_\mu \cos(\tau+\sigma) + A_\mu \cos(\tau+\sigma)] = 0.$$

2.1.2. Model $X^\mu = A_\mu \cos(\tau - \sigma)$.

$$\begin{aligned} \dot{X}^\mu &= -A_\mu \sin(\tau-\sigma); \\ \ddot{X}^\mu &= -A_\mu \cos(\tau-\sigma) = -X^\mu. \\ X'^\mu &= A_\mu \sin(\tau-\sigma); \\ X''^\mu &= -A_\mu \cos(\tau-\sigma) = -X^\mu. \end{aligned}$$

We write constraint conditions for this model

1)
$$\dot{X}^2 + X'^2 = 2A_\mu^2 \sin^2(\tau-\sigma) = 0;$$
$$A_\mu \neq 0 \Rightarrow \sin^2(\tau-\sigma) = 0;$$
$$\tau - \sigma = \pi n, n \in Z.$$

2)
$$\dot{X} \cdot X' = -A_\mu^2 \sin^2(\tau-\sigma) = 0;$$
$$\tau - \sigma = \pi n, n \in Z.$$

This model satisfies the equation of motion (5)

$$F_Y[-A_\mu \cos(\tau-\sigma) + A_\mu \cos(\tau-\sigma)] = 0.$$

2.1.3. Model $X^\mu = A_\mu \cos[B_\mu(\tau - \sigma)]$.

$$\begin{aligned} \dot{X}^\mu &= -A_\mu B_\mu \sin[B_\mu(\tau-\sigma)]; \\ \ddot{X}^\mu &= -A_\mu B_\mu^2 \cos[B_\mu(\tau-\sigma)]. \end{aligned}$$

$$X'^{\mu} = A_{\mu}B_{\mu}\sin[B_{\mu}(\tau-\sigma)];$$
$$X''^{\mu} = -A_{\mu}B_{\mu}^2\cos[B_{\mu}(\tau-\sigma)].$$

Constraint conditions for the model 2.1.3 take a form

1)
$$\dot{X}^2 + X'^2 = 2A_{\mu}^2B_{\mu}^2\sin^2[B_{\mu}(\tau-\sigma)] = 0;$$
$$\sin^2[B_{\mu}(\tau-\sigma)] = 0;$$
$$\tau-\sigma = \frac{\pi n}{B_{\mu}}, n \in Z.$$

2)
$$\dot{X}\cdot X' = -A_{\mu}^2B_{\mu}^2\sin^2[B_{\mu}(\tau-\sigma)] = 0;$$
$$\tau-\sigma = \frac{\pi n}{B_{\mu}}, n \in Z.$$

We substitute this model also into the equation of motion (5)

$$F_Y[-A_{\mu}B_{\mu}^2\cos(\tau-\sigma) + A_{\mu}B_{\mu}^2\cos(\tau-\sigma)] = 0.$$

From the three examples, it can be seen that all considered models are solutions of the equation of motion (5).

2.2. Model $K = F(Y)\cdot V(X^{\mu})$.

We write the action (1) as

$$S = -\frac{T}{2}\int d\tau\int d\sigma\sqrt{-h}F(Y)\cdot V(X^{\mu}). \tag{16}$$

To obtain the equations of motion of the boson string, we find the variation of action (16) with respect to X^{μ}

$$\delta S = -\frac{T}{2}\int d\tau\int d\sigma\sqrt{-h}\delta(F(Y)\cdot V(X^{\mu})) =$$
$$= -\frac{T}{2}\int d\tau\int d\sigma\sqrt{-h}[-2F_Y\cdot V(h^{00}\ddot{X}^{\mu} + h^{11}X''^{\mu}) + F\cdot V_{X^{\mu}}]\delta X^{\mu}.$$

Applying (3) we write down the equation of motion

$$F_Y V(\ddot{X}^{\mu} - X''^{\mu}) - \frac{1}{2}FV_{X^{\mu}} = 0. \tag{17}$$

We find the variation of action by $h^{\alpha\beta}$

$$\delta S_{h^{\alpha\beta}} = -\frac{1}{2}T\int\int d\tau d\sigma V(X^{\mu})\left[\delta\sqrt{-h}F(Y) + \sqrt{-h}\delta F(Y)\right]. \tag{18}$$

Using (8)–(10) write the action

$$\delta S_{h^{\alpha\beta}} = -\frac{1}{2}T\int\int d\tau d\sigma V(X^{\mu})\sqrt{-h}\left[-\frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F + F_Y Z_{h^{\alpha\beta}}\right]\delta h^{\alpha\beta}. \tag{19}$$

Substituting (19) into (6) we obtain the energy-momentum tensor

$$T_{\alpha\beta} = V[F_Y Z_{h^{\alpha\beta}} - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F] = V[F_Y\partial_{\alpha}X^{\mu}\partial_{\beta}X_{\mu} - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F].$$

The equation of motion (17) must be supplemented by the constraint conditions $T_{\alpha\beta} = 0$.

$$T_{\alpha\beta} = V[F_Y\partial_{\alpha}X^{\mu}\partial_{\beta}X_{\mu} - \frac{1}{2}h_{\alpha\beta}F] = 0. \tag{20}$$

Taking into account (2) and (3) we write the constraint conditions (20)

$$T_{00} = V(F_Y\dot{X}^2 - \frac{1}{2}F) = 0; \tag{21}$$

$$T_{11} = V(F_Y X'^2 + \frac{1}{2}F) = 0; \tag{22}$$

$$T_{01} = T_{10} = F_Y V\dot{X}X' = 0. \tag{23}$$

From (21)-(23) follow constraint conditions

$$\dot{X}^2 + X'^2 = 0;$$
$$\dot{X}X' = 0.$$

We consider some solution models of the equation of motion (17).

2.2.1. Model $X^\mu = A_\mu \cos(\tau + \sigma)$.

$$\begin{aligned} \dot{X}^\mu &= -A_\mu \sin(\tau+\sigma); \\ \ddot{X}^\mu &= -A_\mu \cos(\tau+\sigma) = -X^\mu. \\ X'^\mu &= -A_\mu \sin(\tau+\sigma); \\ X''^\mu &= -A_\mu \cos(\tau+\sigma) = -X^\mu. \end{aligned}$$

The constraint conditions for the given model are

1)
$$\dot{X}^2 + X'^2 = 2A_\mu^2 \sin^2(\tau+\sigma) = 0;$$
$$A_\mu \neq 0 \Rightarrow \sin^2(\tau+\sigma) = 0;$$
$$\tau + \sigma = \pi n, n \in Z.$$

2)
$$\dot{X} \cdot X' = A_\mu^2 \sin^2(\tau+\sigma) = 0;$$
$$\tau + \sigma = \pi n, n \in Z.$$

Substitute given model in the equation of motion (17)

$$F_Y V[-A_\mu \cos(\tau+\sigma) + A_\mu \cos(\tau+\sigma)] - \frac{1}{2} F V_{X^\mu} = 0;$$
$$F V_{X^\mu} = 0.$$
$$F \neq 0, V_{X^\mu} = 0, V = const.$$

In space, the string can move as you like and in its motion in space-time sweeps the surface, called the world sheet of the string, which is a two-dimensional surface with spatial σ and temporal τ coordinates. Moving in *d*-dimensional space-time, the string oscillates. In order for these oscillations not to contradict quantum mechanics and special relativity theory, the number of space-time dimensions for the boson string must be 26.

Figure 1 shows the distribution of the boson string world sheet in coordinates τ and σ for model 2.2.1.

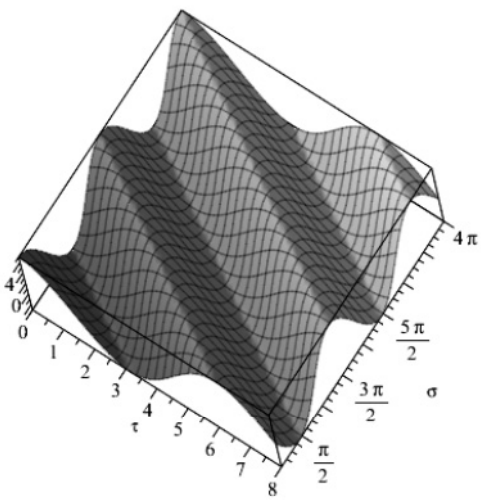


Figure 1. The world sheet of a modified bosonic strings for the solution $X^\mu = A_\mu \cos(\tau+\sigma)$ at $A_\mu = 4$

If the string is closed, then among other oscillations in the spectrum of its motion will be a particle with zero mass and spin 2, the so-called graviton — which is the carrier of the gravitational interaction.

In curved spacetime, a closed string experiences curvature as it moves. In this case, in order not to violate the laws of quantum theory, curved spacetime must be a solution to Einstein's equations.

2.2.2. Model $X^{\mu} = A_{\mu}\cos(\tau-\sigma)$.

$$\begin{aligned}
\dot{X}^{\mu} &= -A_{\mu}\sin(\tau-\sigma);\\
\ddot{X}^{\mu} &= -A_{\mu}\cos(\tau-\sigma) = -X^{\mu}.\\
X'^{\mu} &= A_{\mu}\sin(\tau-\sigma);\\
X''^{\mu} &= -A_{\mu}\cos(\tau-\sigma) = -X^{\mu}.
\end{aligned}$$

Constraint conditions for the model 2.2.2 can be written as

1) $$\dot{X}^2 + X'^2 = 2A_{\mu}^2\sin^2(\tau-\sigma) = 0;$$

$$A_{\mu} \neq 0 \Rightarrow \sin^2(\tau-\sigma) = 0;$$

$$\tau-\sigma = \pi n, n \in Z.$$

2) $$\dot{X}\cdot X' = -A_{\mu}^2\sin^2(\tau-\sigma) = 0;$$

$$\tau-\sigma = \pi n, n \in Z.$$

Substitute this model in the equation of motion (17)

$$F_Y V[-A_{\mu}\cos(\tau-\sigma) + A_{\mu}\cos(\tau-\sigma)] - \frac{1}{2}FV_{X^{\mu}} = 0;$$

$$FV_{X^{\mu}} = 0.$$

$$F \neq 0, V_{X^{\mu}} = 0, V = const.$$

Figure 2 shows the distribution of the boson string world sheet in coordinates τ and σ for model 2.2.2.

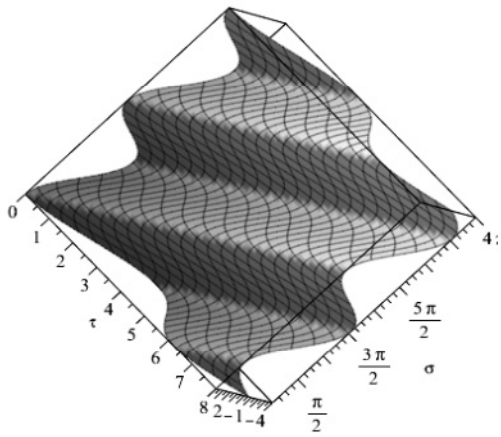


Figure 2. The world sheet of a modified bosonic strings for the solution $X^{\mu} = A_{\mu}\cos(\tau-\sigma)$ at $A_{\mu} = 4$

2.2.3. Model $X^{\mu} = A_{\mu}\cos[B_{\mu}(\tau-\sigma)]$.

$$\begin{aligned}
\dot{X}^{\mu} &= -A_{\mu}B_{\mu}\sin[B_{\mu}(\tau-\sigma)];\\
\ddot{X}^{\mu} &= -A_{\mu}B_{\mu}^2\cos[B_{\mu}(\tau-\sigma)].\\
X'^{\mu} &= A_{\mu}B_{\mu}\sin[B_{\mu}(\tau-\sigma)];\\
X''^{\mu} &= -A_{\mu}B_{\mu}^2\cos[B_{\mu}(\tau-\sigma)].
\end{aligned}$$

The constraint conditions for this model

1) $$\dot{X}^2 + X'^2 = 2A_{\mu}^2B_{\mu}^2\sin^2[B_{\mu}(\tau-\sigma] = 0;$$

$$\sin^2[B_{\mu}(\tau-\sigma)] = 0;$$

$$\tau-\sigma = \frac{\pi n}{B_{\mu}}, n \in Z.$$

2)
$$\dot{X}\cdot X' = -A_\mu^2 B_\mu^2 \sin^2[B_\mu(\tau-\sigma)] = 0;$$
$$\tau-\sigma = \frac{\pi n}{B_\mu}, n\in Z.$$

Substitute solutions in the equation of motion (17)

$$F_Y V\left[-A_\mu B_\mu^2 \cos[B_\mu(\tau-\sigma)] + A_\mu B_\mu^2 \cos[B_\mu(\tau-\sigma)]\right] - \frac{1}{2} F V_{X^\mu} = 0;$$
$$F V_{X^\mu} = 0.$$
$$F \neq 0, V_{X^\mu} = 0, V = const.$$

Figure 3 shows the distribution of the boson string world sheet in coordinates τ and σ for model 2.2.3.

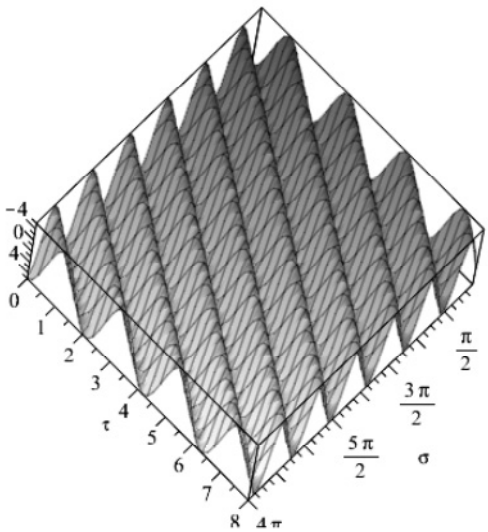


Figure 3. The world sheet of a modified bosonic strings for the solution $X^\mu = A_\mu \cos[B_\mu(\tau-\sigma)]$ at $A_\mu = 5, B_\mu = 3$

All considered models are solutions of the equation of motion (20).

3. Conclusion

In the article the dynamics of the bosonic string for various modified string models was studied. Considered actions for given bosonic models of strings and the equations of motion are obtained by varying the action with respect to X^μ; calculated tensor of energy-momentum for these models, obtained the constrait conductions; solutions obtained for the modified models of bosonic strings. Built world sheets of bosonic strings for some solutions. It is checked that the constrait conditions for all considered models are satisfied.

The same classical string theory may have different quantum versions of their models. Some of them may have a non-physical dimension of space-time and tachyon states. Others may be formulated in ordinary four-dimensional spacetime and have no tachyon states. Theoretical physicists are interested in both groups of quantum string models. The appearance of relativistic strings in four-dimensional space-time is currently considered in cosmology as the most likely candidate for explaining the process of appearance of inhomogeneities in the distribution of matter in the early universe, which caused the appearance of galaxies. Therefore, the study of various models describing the dynamics of the boson string, will make a choice in favor of the most adequate models.

The work was financially supported by the scientific and technical program (F. 0811, № 0118RK00935) MES RK.

References

1 Polchinski J. String theory. Vol. 1 / J. Polchinski. — Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

2 Neveu A. Factorizable dual model of pions / A. Neveu, J.N. Schwarz // Nuclear Physics B. — 1971. — Vol. 31. — P. 86–112.

3 Тодер Г.Б. Обобщенное каноническое квантование теории бозонных струн в фоновых полях: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.02 / Г.Б. Тодер. — Томск, 1998. — 105 с.

4 Барбашов Б.М. Редукция в модели релятивистской струны для произвольной размерности пространства Минковского / Б.М. Барбашов, В.В. Нестеренко, А.М. Червяков // Теоретическая и математическая физика. — 1984. — Т. 59, № 2. — С. 209–219.

5 Balbinot R. Improved model of bosonic string / R. Balbinot, A. Barletta, G. Venturi // Physical Review D. — 1987. — Vol. 36, No. 8. — P. 2589–2590.

6 Разина О.В. Модели бозонных струн с неканоническим кинетическим членом / О.В. Разина, К.К. Ержанов // Вестн. Евразийск. нац. ун-та им. Л.Н. Гумилева. Сер. естеств.-техн. наук. — 2011. — Т. 85, № 6. — С. 87–92.

7 Разина О.В. Модифицированная модель бозонной струны с явной координатной зависимостью / О.В. Разина, Н.С. Серикбаев // Вестн. Евразийск. нац. ун-та им. Л.Н. Гумилева. Сер. естеств.-техн. наук. — 2011. — Т. 85, № 6. — С. 98–103.

8 Бринк Л. Принципы теории струн / Л. Бринк, М. Энно. — М.: Мир, 1991.

З.К. Шанина, О.В. Разина

Еркін бозондық ішектің модификацияланған модельдері және олардың шешімдері

Мақалада еркін бозондық ішектің модификацияланған модельдері қарастырылды және олардың динамикасы зерттелді. Бозондық ішектің модификацияланған модельдері екінші реттік формализм (Поляков) тұрғысынан зерттелген. Еркін ішектің қозғалысы Минковский кеңістік-уақытында таралады. Еркін бозондық ішектің ішкі геометриясы Минковский сигнатурасына ие $h_{\alpha\beta}$ метрикамен сипатталды. Ішектің классикалық траекториясы X^{μ} функциямен ұсынылған. Бозондық ішектің әсеріне K функциясы мен $V(X^{\mu})$ потенциалды енгізу бозондық ішек динамикасының мәселелерін шешуде жаңа тәсілдер табуға мүмкіндік береді. Бозондық ішектің берілген модификацияланған модельдері үшін қозғалыс теңдеулері табылды, олар X^{μ} әсеріне қатысты вариациялау әдісі бойынша алынды. Еркін бозондық ішектің қарастырылатын модельдері үшін энергия-импульс тензоры есептелді. Бозондық ішек модельдерінің барлық түрлері үшін байланыс шарттары алынды. Әрбір қарастырылатын модель үшін байланыс шарттарының орындалатындығы дәлелденді. Сонымен қатар, бозондық ішектің модификацияланған модельдері үшін қозғалыс теңдеулерінің шешімдері қарастырылды және алынды. Берілген шешімдер үшін ішектің әлемдік парағы құрылды. Берілген модельдер үшін барлық шешімдер қозғалыс теңдеулерін және байланыс шарттарын қанағаттандыратындығы көрсетілді.

Кілт сөздер: бозондық ішек, әсер, қозғалыс теңдеуі, энергия-импульс тензоры, байланыс шарттары.

З.К. Шанина, О.В. Разина

Модифицированные модели свободной бозонной струны и их решения

В статье рассмотрены модифицированные модели свободной бозонной струны и исследована их динамика. Модифицированные модели бозонной струны изучены с точки зрения формализма второго порядка (действие Полякова). Движение свободной струны распространяется в пространстве-времени Минковского. Внутренняя геометрия свободной бозонной струны описывается метрикой $h_{\alpha\beta}$, имеющей сигнатуру Минковского. Классическая траектория струны представлена функцией X^{μ}. Введение в действие бозонной струны функции K и потенциала $V(X^{\mu})$ позволяет найти новые подходы к решению проблемы динамики бозонной струны. Для данных модифицированных моделей бозонной струны найдены уравнения движения, которые получены методом варьирования действия относительно X^{μ}. Вычислен тензор энергии-импульса для рассматриваемых моделей свободной бозонной струны. Получены условия связей для всех видов модифицированных моделей бозонной струны. Доказано, что условия связей выполняются для каждой рассматриваемой модифицированной модели бозонной струны. Также изучены полученные решения уравнений движения для каждой модифицированной модели бозонной струны. Построен мировой лист струны для данных решений. Показано, что все решения для данных моделей удовлетворяют уравнениям движения и условиям связей.

Ключевые слова: бозонная струна, действие, уравнение движения, тензор энергии-импульса, условия связей.

References

1 Polchinski, J. (2005). *String theory.* (Vol. 1). Cambridge: Cambridge University Press.

2 Neveu, A., & Schwarz, J.N. (1971). Factorizable dual model of pions. *Nuclear Physics B, 31,* 86–112.

3 Toder, G.B. (1998). Obobshchennoe kanonicheskoe kvantovanie teorii bozonnykh strun v fonovykh poliakh [Generalized canonical quantization of the bosonic string theory in background fields]. *Candidate's thesis.* Tomsk [in Russian].

4 Barbashov, B.M., Nesterenko, V.V., & Chervyakov A.M. (1984). Reduktsiia v modeli reliativistskoi struny dlia proizvolnoi razmernosti prostranstva Minkovskoho [Reduction in the model of a relativistic string for arbitrary dimension of Minkowski space]. *Teoreticheskaia i matematicheskaia fizika — Theoretical and mathematical physics, 59, 2,* 209–219 [in Russian].

5 Balbinot, R., Barletta, A., & Venturi, G. (1987). Improved model of bosonic string. *Physical Review D, 36, 8,* 2589–2590.

6 Razina, O.V., & Yerzhanov, K.K. (2011). Modeli bozonnykh strun s nekanonicheskim kineticheskim chlenom [Models of bosonic strings with non-canonical kinetic term]. *Vestnik Evraziiskoho natsionalnoho universiteta imeni L.N. Humileva. Seriia estestvenno-tekhnicheskikh nauk — Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. A series of science and technology, 85, 6,* 87–92 [in Russian].

7 Razina, O.V., & Serikbaev, N.S. (2011). Modifitsirovannaia model bozonnoi struny s neiavnoi koordinatnoi zavisimostiu [Modified model of a bosonic string with an explicit coordinate dependence]. *Vestnik Evraziiskoho natsionalnoho universiteta imeni L.N. Humileva. Seriia estestvenno-tekhnicheskikh nauk — Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. A series of science and technology, 85, 6,* 98–103 [in Russian].

8 Brink, L., & Jenno, M. (1991). *Principy teorii strun [Principles of string theory].* Moscow: Mir [in Russian].

DOI: 10.31489/2019Ph4/39-56

UDC 53.08; 53.01

R. Szostek[1], P. Góralski[2], K. Szostek[3]

[1]*Rzeszow University of Technology, Poland;*
[2]*Council of Gravity Research, Unit of Analysis Celestial Mechanics, Poland;*
[3]*AGH University of Science and Technology, Poland*
(E-mail: kamil.szostek97@gmail.com)

Gravitational waves in Newton's gravitation and criticism of gravitational waves resulting from the General Theory of Relativity (LIGO)

The most important conclusion from this article is that from the General Theory of Relativity do not result any gravitational waves, but just ordinary modulation of the gravitational field intensities caused by rotating of bodies. If the LIGO team has measured anything, it is only this modulation, rather than the gravitational wave understood as the carrier of gravity. This discussion shows that using too complicated mathematics in physics leads to erroneous interpretation of results (in this case, perhaps the tensor analysis is guilty). Formally, various things can be calculated, but without knowing what such analysis means, they can be attributed misinterpreted. Since the modulation of gravitational field intensities has been called a gravitational wave in contemporary physics, we have also done so, although it is misleading. In the article it was shown, that from the Newton's law of gravitation resulted an existence of gravitational waves very similar to these, which result from the General Theory of Relativity (GTR). The article shows differences between the course of gravitational waves that result from Newton's gravitation, and the course of gravitational waves that result from the General Theory of Relativity, which measurement was announced by the LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) [1–3]. According to both theories, gravitational waves are cyclical changes of the gravitational field intensities. The article proposes a method of testing a laser interferometer for gravitational wave measurement used in the LIGO Observatory. Criticism of results published by the LIGO team was also presented.

Keywords: gravitational wave, Newton's gravitation, LIGO interferometer.

1 Introduction

In classical mechanics, bodies that move relatively to the observer are the source of gravitational field of variable intensity. If the motion of bodies is cyclic, then they are the source of cyclic changes of the gravitational field intensities, which we will call the gravitational wave. The changes of gravitational field intensities are caused by changing distance of bodies in relation to the observer. In chapters 3 and 4 examples of gravitational waves that result from the Newton's law of gravitation are shown.

In General Theory of Relativity, bodies circulating the shared centre of mass are also sources of gravitational wave, which appears as propagating vibrations of gravitational field (wrinkles of space-time) [4].

Chapter 5 presents the results announced by the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) on the detection of gravitational wave predicted by the General Theory of Relativity.

The gravitational wave resulting from the Newton's law of gravitation has a different course than the gravitational wave registered by the LIGO team. It follows that one of these theories incorrectly describes this phenomenon, or that too many simplifications of complex model were used to study the gravitational wave within the General Theory of Relativity.

The calculations presented in this article do not take into account the time shift resulting from the finite velocity of propagation of the gravitational interactions. If the body moves away from the observer, then the time of reaching gravitational field variables to this observer becomes longer. When the body moves closer, then the time of reaching gravitational field variables is shorter. However, if the velocity of body is low in relation to the velocity of propagation of the gravitational interactions, then this effect is negligible.

In considered cases not only the gravitational field intensity changes, but also the direction of gravity effect. In the article we deal mainly with intensity. Deliberations will concern only such situations, in which the observer is in a plane of rotating bodies.

According to the Newton's law of gravitation, two homogeneous spheres of mass m and M, located at a distance of R, attract each other with force

$$F = G\frac{mM}{R^2}. \tag{1}$$

Due to Newton's second law of motion, the acceleration which a body of mass m gives to a body of mass M is expressed by the following formula

$$a = \frac{F}{M} = G\frac{m}{R^2}. \tag{2}$$

In our calculations, we assume that the gravitational constant has a value of

$$G = 6.67408(31)\cdot 10^{-11}\left[\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{kg}^2}\right]. \tag{3}$$

2 Gravitational wave generated by a system of two rotating bodies

We consider the two bodies circulating the shared centre of mass as shown in Figure 1. The bodies are homogeneous spheres of mass m_1 and m_2. Circles where the bodies circulate in the shared centre of mass have rays of r_1 and r_2. At any given moment the bodies are always on opposite sides of the shared centre of mass. In order for the bodies to be related by gravity in a natural way, we will assume in simulations that

$$r_1 m_1 = r_2 m_2 = I. \tag{4}$$

For presented system the following applies

$$R^2 = (D-x)^2 + y^2; \tag{5}$$

$$r_1^2 = x^2 + y^2; \tag{6}$$

$$x = r_1\cos(\omega t); \tag{7}$$

$$y = r_1\sin(\omega t); \tag{8}$$

$$\omega = 2\pi / T. \tag{9}$$

On this basis, we obtain the following

$$R^2 = D^2 + x^2 + y^2 - 2xD = D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t). \tag{10}$$

Based on (2), the gravity field intensity from mass m_1 has at the detector point the value of

$$a_1 = G\frac{m_1}{R^2}\quad\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}\right]. \tag{11}$$

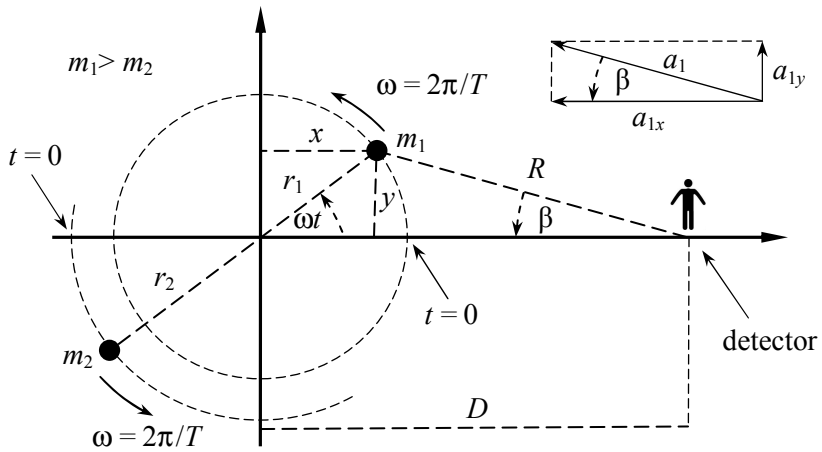


Figure 1. Two bodies of m_1 and m_2 mass rotating in a circle of r_1 and r_2 radius

After taking into account (10), the following results are obtained

$$a_1 = G\frac{m_1}{D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t)}. \tag{12}$$

The components of gravitational field intensity, as shown in Figure 1, have the following values

$$a_{1x} = a_1\cos\beta = a_1\frac{D-x}{R}; \tag{13}$$

$$a_{1y} = a_1\sin\beta = a_1\frac{y}{R}. \tag{14}$$

On the basis of (7), (8), (10) and (12) we obtain the following

$$a_{1x} = G\frac{m_1}{D^2 + r_1^2 - 2Dr\cos(\omega t)}\frac{D - r_1\cos(\omega t)}{\sqrt{D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t)}}; \tag{15}$$

$$a_{1y} = G\frac{m_1}{D^2 + r_1^2 - 2Dr\cos(\omega t)}\frac{r_1\sin(\omega t)}{\sqrt{D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t)}}. \tag{16}$$

On this basis, we obtain the following

$$a_{1x} = Gm_1\frac{D - r_1\cos(\omega t)}{(D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t))^{3/2}}; \tag{17}$$

$$a_{1y} = Gm_1\frac{r_1\sin(\omega t)}{(D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t))^{3/2}}. \tag{18}$$

In case of body with m_2 mass, the above formulae differ only in an angle, which is not ωt, but $\omega t+\pi$. For the body m_2, the relation (12), (17), (18) are in a form of

$$a_2 = G\frac{m_2}{D^2 + r_2^2 - 2Dr_2\cos(\omega t + \pi)} = G\frac{m_2}{D^2 + r_2^2 + 2Dr_2\cos(\omega t)}; \tag{19}$$

$$a_{2x} = Gm_2\frac{D - r_2\cos(\omega t + \pi)}{(D^2 + r_2^2 - 2Dr_2\cos(\omega t + \pi))^{3/2}} = Gm_2\frac{D + r_2\cos(\omega t)}{(D^2 + r_2^2 + 2Dr_2\cos(\omega t))^{3/2}}; \tag{20}$$

$$a_{2y} = Gm_2\frac{r_2\sin(\omega t + \pi)}{(D^2 + r_2^2 - 2Dr_2\cos(\omega t + \pi))^{3/2}} = Gm_2\frac{-r_2\sin(\omega t)}{(D^2 + r_2^2 + 2Dr_2\cos(\omega t))^{3/2}}. \tag{21}$$

The components of gravitational field intensity from two bodies are

$$a_x = a_{1x} + a_{2x} = G\left[\frac{m_1(D - r_1\cos(\omega t))}{(D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t))^{3/2}} + \frac{m_2(D + r_2\cos(\omega t))}{(D^2 + r_2^2 + 2Dr_2\cos(\omega t))^{3/2}}\right]; \tag{22}$$

$$a_y = a_{1y} + a_{2y} = G\sin(\omega t)\left[\frac{r_1 m_1}{(D^2 + r_1^2 - 2Dr_1\cos(\omega t))^{3/2}} - \frac{r_2 m_2}{(D^2 + r_2^2 + 2Dr_2\cos(\omega t))^{3/2}}\right]. \tag{23}$$

The gravitational field intensity from two bodies is

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}. \tag{24}$$

* * *

In some cases we will assume that the distance of circulating bodies may change. Then their distance will decrease linearly in time, according to the relation

$$r_i(t) = r_i(0)\cdot\left(1 - \frac{t}{3T}\right). \tag{25}$$

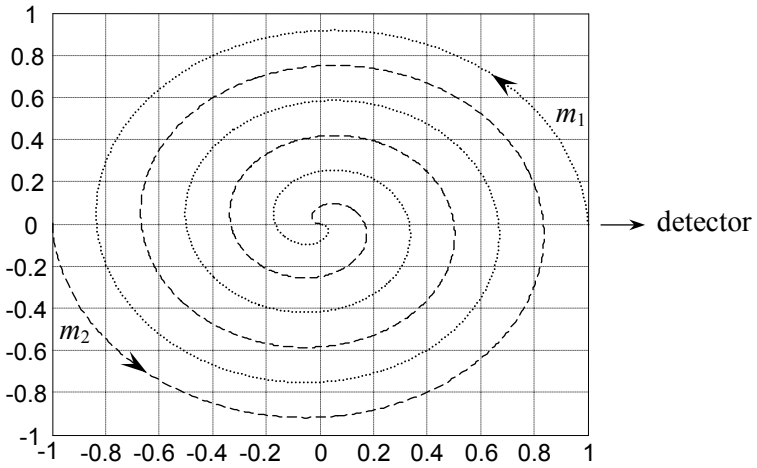


Figure 2. Trajectory of body movement assumed in some simulations, for $r_1(0) = r_2(0) = 1$ m

In this case, the bodies are not naturally related by gravity and their movement is artificially forced. In this case, the bodies fall over each other in a spiral during $3T$ (Fig. 2).

2.1 Two bodies of equal mass

We assume that two rotating bodies have identical mass $m_1 = m_2 = m$.

Figure 3 shows the gravitational field intensity (24) in a distance of $D = 1.5$ m from rotating bodies. As can be seen from the figure for $D \approx r$, the variations in intensity are not sinusoidal.

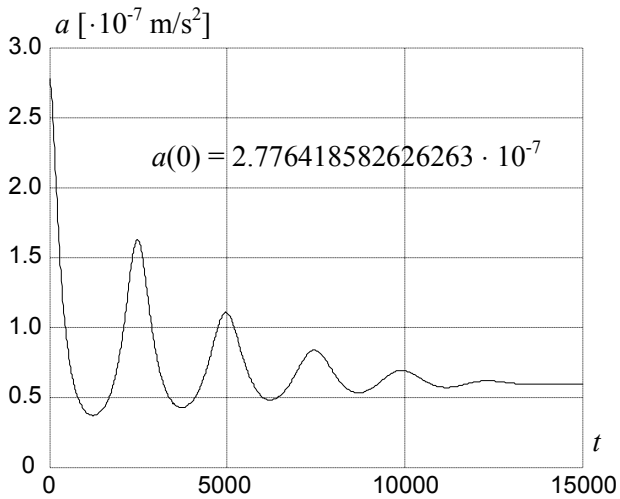


Figure 3. The gravitational field intensity for $D = 1.5$ m, $r(0) = 1$ m, $m_1 = m_2 = 1\,000$ kg, $T = 5\,000$

Figure 4 shows the gravitational field intensity (24) in a distance of $D = 100\,000$ m, which bodies are a source with mass of $m = 10\,000$ kg. For $D >> r$ the intensity changes are similar to sinusoidal.

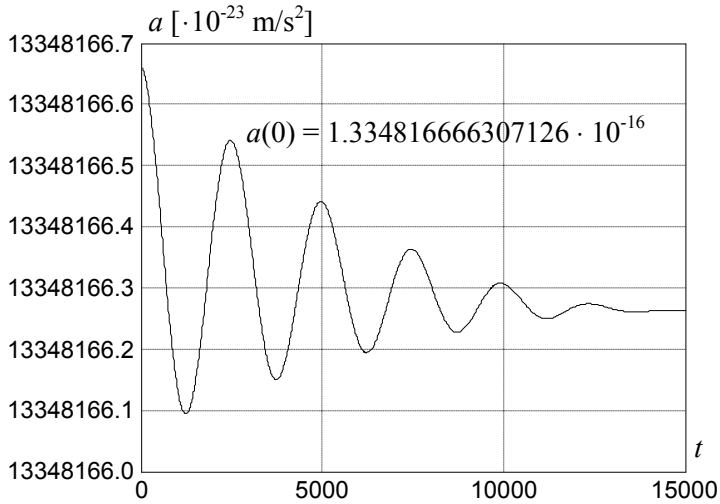


Figure 4. The gravitational field intensity for $D = 100\,000$ m, $r(0) = 10$ m, $m_1 = m_2 = 10\,000$ kg, $T = 5\,000$

The presented analysis shows that when two bodies rotate around each other, they are a source of gravitational field of variable intensity. If the bodies get closer to each other by the spiral, then the amplitude of changes decreases. Local maxima occur twice in one full body rotation.

2.2 Two bodies of different mass

We assume that two rotating bodies have different mass $m_1 > m_2$. Figure 5 shows the gravitational field intensity (24) in a distance of $D = 20$ m from, which bodies are a source with mass of $m_1 = 350$ kg and

m_2 = 250 kg. This time the distance of rotating bodies is constant, i.e. $r_1(t)$ = *constans* = 10 m. After taking into account (4) we receive $r_2(t)$ = *constans* = 14 m.

Figure 5 shows two local maxima at full body rotation. The smaller one occurs when a body of higher mass is closer to the detector than a body of lower mass. The larger one occurs when a body of lower mass is closer to the detector than a body of higher mass. This is because the smaller body circulates around a larger orbit, so it comes closer to the detector (formula (4) applies).

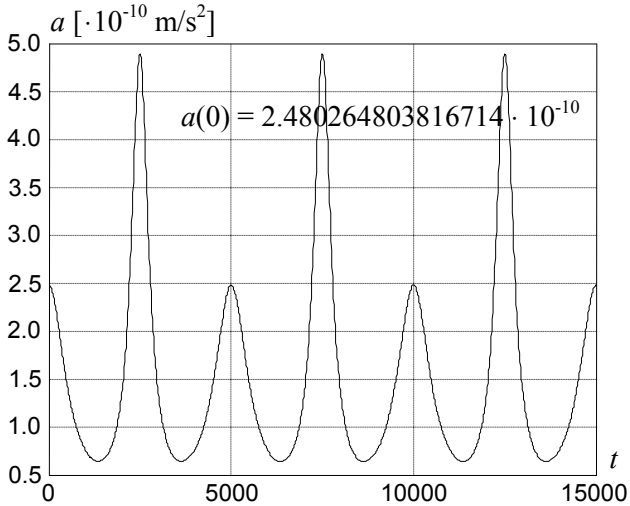


Figure 5. The gravitational field intensity for D = 20 m, $r_1(t)$ = *constans* = 10 m, $r_2(t)$ = *constans* = 14 m, m_1 = 350 kg, m_2 = 250 kg, T = 5 000

When the detector is more distant from the rotating bodies, then the difference between maxima disappears. For example, for the same system of bodies as in Figure 5, the gravitational field intensity seen from a distance of D = 450 m has two, almost identical, maxima at full rotation of bodies (Fig. 6).

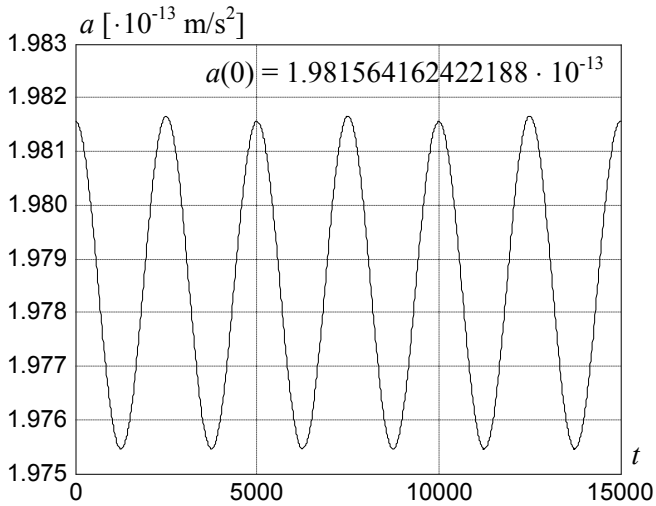


Figure 6. The gravitational field intensity for D = 450 m, $r_1(t)$ = *constans* = 10 m, $r_2(t)$ = *constans* = 14 m, m_1 = 350 kg, m_2 = 250 kg, T = 5 000

2.3 Gravitational wave caused by four moons of Jupiter

In order to determine the gravitational field intensity from the four Galileo moons of Jupiter, we have carried out a numerical simulation (for the data from Table 1). On its basis, the intensity of gravitational field seen from Earth was determined, the source of which are four Galileo moons of Jupiter.

For reasons of simplification, it has been assumed that the orbits of these four moons are in the same plane as the Earth. It was also assumed that at initial moment $t = 0$, the Jupiter and all moons of Jupiter are in conjunction with the Earth, i.e. lie on a section connecting the centre of Earth with the centre of Jupiter. Since the mass of Jupiter is much greater than the mass of moons, for simplicity it was assumed that Jupiter is motionless in relation to the Earth. For this reason, Jupiter does not influence the gravitational field intensity changes from his moons and has not been taken into account in simulation.

Table 1

Sizes accepted in calculations for Jupiter and its four moons

Distance of Jupiter from the Earth	$D = 6{,}3\cdot10^{11}$ m
Mass Io	$m_I = 8{,}9\cdot10^{22}$ kg
Orbit radius Io	$r_I = 4{,}2\cdot10^{8}$ m
Rotation velocity Io	$\omega_I = 2\pi / T_I = 2\pi / (1{,}5\cdot10^{5}\ \mathrm{s}) = 2{,}1\cdot10^{-5}$ 1/s
Europe mass	$m_E = 4{,}8\cdot10^{22}$ kg
Orbit radius of Europe	$r_E = 6{,}7\cdot10^{8}$ m
Rotation velocity of Europe	$\omega_E = 2\pi / T_E = 2\pi / (3{,}1\cdot10^{5}\ \mathrm{s}) = 2{,}0\cdot10^{-5}$ 1/s
Ganymede mass	$m_G = 1{,}5\cdot10^{23}$ kg
Orbit radius of Ganymede	$r_G = 1{,}1\cdot10^{9}$ m
Rotation velocity of Ganymede	$\omega_G = 2\pi / T_G = 2\pi / (6{,}2\cdot10^{5}\ \mathrm{s}) = 1{,}0\cdot10^{-5}$ 1/s
Callista mass	$m_K = 1{,}1\cdot10^{23}$ kg
Orbit radius of Callista	$r_K = 1{,}9\cdot10^{9}$ m
Rotation velocity of Callista	$\omega_K = 2\pi / T_K = 2\pi / (1{,}4\cdot10^{6}\ \mathrm{s}) = 4{,}4\cdot10^{-6}$ 1/s

Results of simulation were presented in Figure 7.

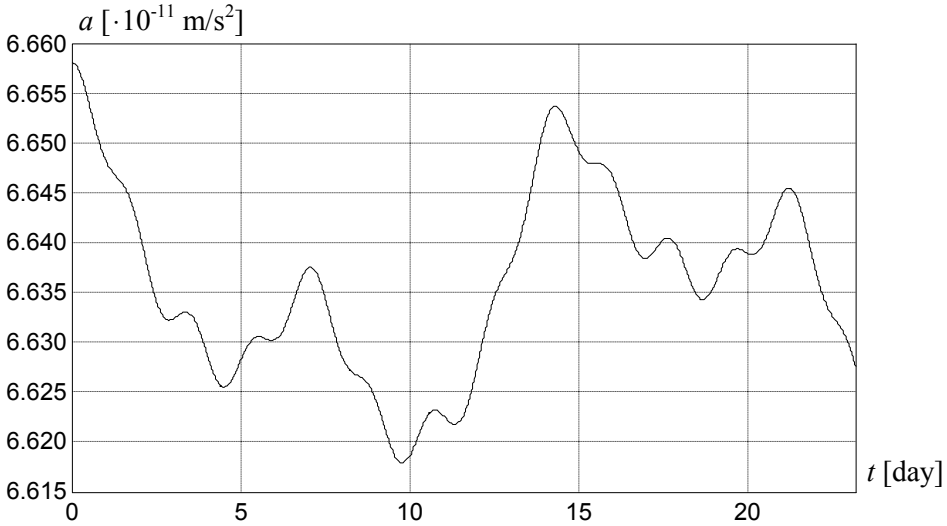


Figure 7. The gravitational field intensity of four Jupiter moons, seen from the Earth (Table 1). The gravitational field intensity from Jupiter is not taken into account

3 Gravitational wave as seen by the rotating observer

We consider the rotating observer as shown in Figure 8. The observer is gravitated by a homogeneous sphere with a mass of m. For presented system, the following occurs

$$R^2 = (d - x)^2 + y^2; \tag{26}$$

$$r^2 = x^2 + y^2; \tag{27}$$

$$x = r\cos(\omega t); \tag{28}$$

$$y = r\sin(\omega t); \tag{29}$$

$$\omega = 2\pi / T. \tag{30}$$

On this basis, we obtain the following

$$R^2 = D^2 + x^2 + y^2 - 2xD = D^2 + r^2 - 2Dr\cos(\omega t). \tag{31}$$

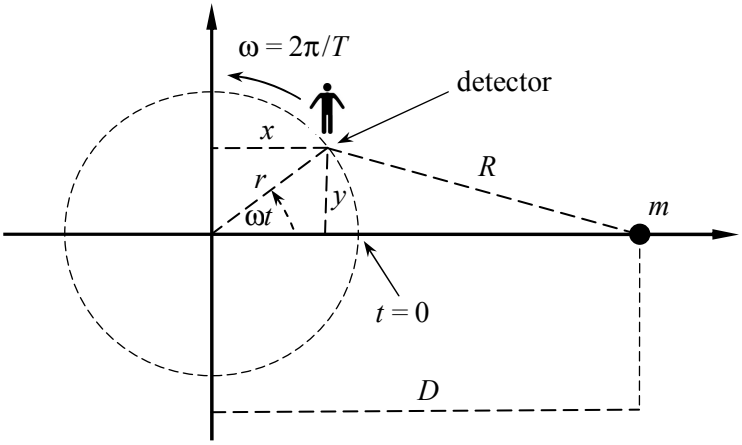


Figure 8. Rotating observer in a circle with a radius of *r*

After placing to (11) we obtain a gravitational field intensity dependency identical to (12), i.e.

$$a = G\frac{m}{D^2 + r^2 - 2Dr\cos(\omega t)}. \tag{32}$$

The case in which the observer rotates is qualitatively different from the case shown in Chapter 2, where the two bodies rotate around each other. In this case, the gravitational wave does not propagate in a space where the source of gravity is motionless. Changes of the gravitational field intensity occur only for a moving observer. But formula (32) will also apply in a symmetrical situation when the observer is motionless and the source of wave circulates along a suitable trajectory. Formula (32) will also apply if the body and observer change places.

3.1 Gravitational wave from the Moon

The situation shown in Figure 8 may be a model of the Earth-Moon system. The observer is located on the surface of Earth in a plane of the Moon orbit. The source of gravity is the Moon. In the Moon system, the observer rotates around the center of *t* Earth. We assume the values shown in Table 2. The observer's rotation period is slightly longer than 24 hours due to the Moon's movement around the Earth.

Table 2

Sizes accepted in calculations for the Moon

Average radius of Earth	r = 6371,0 km = $6{,}4\cdot10^6$ m
Average radius of Moon orbit	D = 384404 km = $3{,}8\cdot10^8$ m
Moon mass	$m = 7{,}3\cdot10^{22}$ kg
Rotation velocity of the observer	$\omega = 2\pi / T = 2\pi$ / (24,84 h) = 2π / (89428 s) = $7{,}02\cdot10^{-5}$ 1/s

The diagram of gravitational wave from the Moon calculated on the basis of (32) is shown in Figure 9. This gravitational wave is the cause of tides and outflows.

The gravitational wave amplitude of the Moon is

$$\frac{a_{K_\max} - a_{K_\min}}{2} = \frac{a_K(0) - a_K(T/2)}{2} = \frac{2.2743\cdot10^{-6}}{2}\ \text{m/s}^2 = 1.1372\cdot10^{-6}\text{m/s}^2. \tag{33}$$

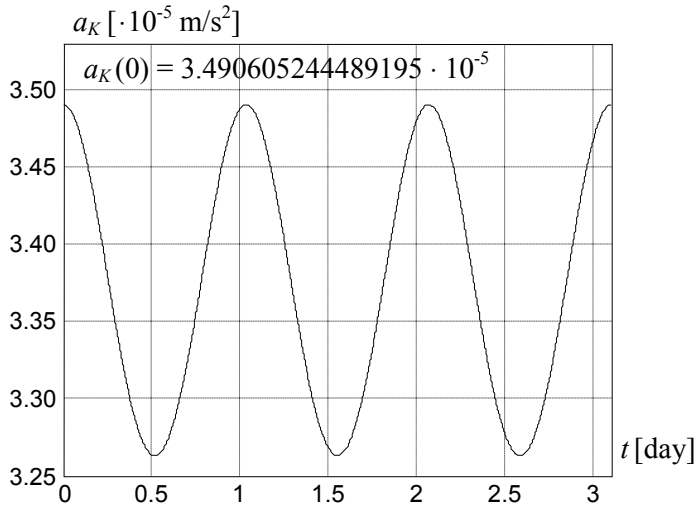


Figure 9. The gravitational field intensity from the Moon (Table 2)

3.2 Gravitational wave from the Sun

The situation shown in Figure 8 may also be a model of the Earth-Sun system. The observer is located on the surface of Earth. The source of gravity is the Sun. In the solar system, the observer rotates around the centre of Earth. We assume the values shown in Table 3.

Table 3

Sizes accepted in calculations for the Sun

Average radius of Earth	r = 6371,0 km = 6,4·10^6 m
Average radius of Earth orbit	D = 149,6·10^6 km = 1,5·10^{11} m
Sun mass	m = 2,0·10^{30} kg
Rotation velocity of the observer	$\omega = 2\pi / T = 2\pi$ / (24 h) = 2π / (86400 s) = 7,27·10^{-5} 1/s

The diagram of gravitational wave from the Sun calculated on the basis of (32) is shown in Figure 10.

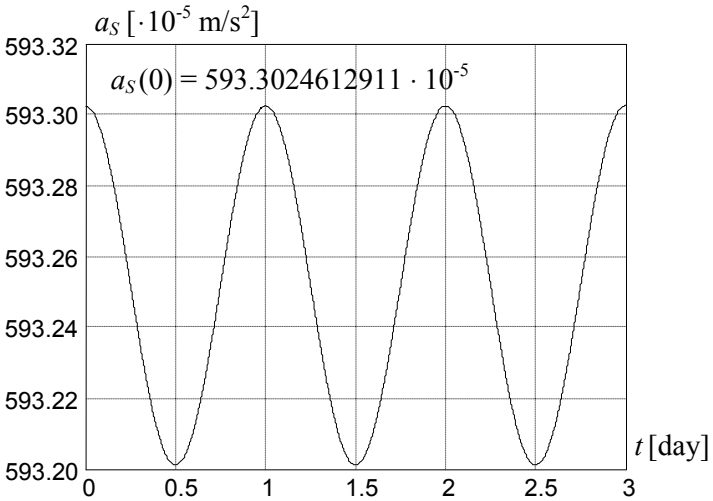


Figure 10. The gravitational field intensity from the Sun (Table 3)

The amplitude of the gravitational wave from the Sun is

$$\frac{a_{S_\max} - a_{S_\min}}{2} = \frac{a_S(0) - a_S(T/2)}{2} = \frac{1.0125 \cdot 10^{-6}}{2} \text{m/s}^2 = 0.5063 \cdot 10^{-6} \text{m/s}^2. \quad (34)$$

The gravitational waves from the Moon and Sun cause tides on the Earth. This means that the phenomenon of gravitational waves is known and observed on the Earth from always. From these observations it appears that the gravitational wave deforms the shape of bodies.

The intensity of the gravitational field a_K from the Moon (Fig. 9) is several hundred times smaller than the intensity of gravitational field a_S originating from the Sun (Fig. 10). However, the Moon is much closer to Earth, and therefore the maximum change of gravitational field intensity from the Moon (33) is 2.25 times greater than the maximum change of gravitational field intensity from the Sun (34). For this reason, the sea tides and outflows caused by the Moon are greater than those caused by the Sun.

4 Absolute changes of the gravitational field intensity (amplitude)

According to the General Theory of Relativity mass influences the geometry of space-time. According to the creators of LIGO detector, this decoder can measure relative changes in the length of two arms of this interferometer [1]. On this basis, changes in gravitational field intensity can be measured indirectly. The LIGO Interferometer cannot measure the absolute value of gravitational field intensity. Its task is to indirectly measure changes in gravitational field intensity.

Such a measurement is not affected by how large the gravitational field is, but by the changes in its value (absolute changes). Therefore, in the following subsections we are going to determine absolute changes of the gravitational field intensity for two previously considered cases.

4.1 Gravitational wave amplitude caused by two rotating bodies

Now we will determine the absolute changes of gravity field intensity for the case discussed in Chapter 0, two bodies related by gravity.

4.1.1 Component y of the gravitational wave

First we will determine the component changes y. On the basis of (23), taking into account condition (4), the following are obtained

$$a_y = G\frac{1}{D^3}\sin(\omega t)\left[\frac{r_1 m_1}{(1+\frac{r_1^2}{D^2}-2\frac{r_1}{D}\cos(\omega t))^{3/2}} - \frac{r_1 m_1}{(1+\frac{r_2^2}{D^2}+2\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))^{3/2}}\right]; \tag{35}$$

$$D >> (r_1+r_2) \quad \Rightarrow \quad a_y \approx G\frac{r_1 m_1}{D^3}\sin(\omega t)\left[\frac{1}{(1-2\frac{r_1}{D}\cos(\omega t))^{3/2}} - \frac{1}{(1+2\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))^{3/2}}\right]. \tag{36}$$

Based on developing into the Taylor series, it is possible to show that

$$x \approx 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{(1-2x)^{3/2}} \approx 1+3x \quad \wedge \quad \frac{1}{(1+2x)^{3/2}} \approx 1-3x. \tag{37}$$

On this basis, formula (36), it is possible to write in approximated form

$$D >> (r_1+r_2) \quad \Rightarrow \quad a_y \approx G\frac{r_1 m_1}{D^3}\sin(\omega t)\left[(1+3\frac{r_1}{D}\cos(\omega t)) - (1-3\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))\right]; \tag{38}$$

$$D >> (r_1+r_2) \quad \Rightarrow \quad a_y \approx 3G\frac{r_1 m_1 (r_1+r_2)}{D^4}\sin(\omega t)\cos(\omega t). \tag{39}$$

On the basis of the designation adopted in (4) and the trigonometric formula we obtain the following

$$D >> (r_1+r_2) \quad \Rightarrow \quad a_y \approx \frac{3}{2}G\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}\sin(2\omega t). \tag{40}$$

It results that the amplitude of component y of the gravitational field intensity is

$$D >> (r_1+r_2) \quad \Rightarrow \quad A_y \approx \frac{3}{2}G\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}. \tag{41}$$

4.1.2 Component x of the gravitational wave

Now we will determine the changes in component x. On the basis of (22) we obtain the following

$$a_x = G\frac{1}{D^2}\left[\ m_1\frac{1-\frac{r_1}{D}\cos(\omega t))}{(1+\frac{r_1^2}{D^2}-2\frac{r_1}{D}\cos(\omega t))^{3/2}}+m_2\frac{1+\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))}{(1+\frac{r_2^2}{D^2}+2\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))^{3/2}}\ \right]; \tag{42}$$

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad a_x\approx G\frac{1}{D^2}\left[\ m_1\frac{1-\frac{r_1}{D}\cos(\omega t))}{(1-2\frac{r_1}{D}\cos(\omega t))^{3/2}}+m_2\frac{1+\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))}{(1+2\frac{r_2}{D}\cos(\omega t))^{3/2}}\ \right]. \tag{43}$$

Based on developing into the Taylor series, it is possible to show that

$$x\approx 0\quad\Rightarrow\quad\frac{1-x}{(1-2x)^{3/2}}\approx 1+2x+\frac{9}{2}x^2\quad\wedge\quad\frac{1+x}{(1+2x)^{3/2}}\approx 1-2x+\frac{9}{2}x^2. \tag{44}$$

On this basis, formula (43), it is possible to write in approximated form

$$\begin{aligned}D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad a_x\approx G\frac{1}{D^2}\Big[\ & m_1[1+2\frac{r_1}{D}\cos(\omega t)+\frac{9}{2}\frac{r_1^2}{D^2}\cos^2(\omega t)]+\\ & +m_2[1-2\frac{r_2}{D}\cos(\omega t)+\frac{9}{2}\frac{r_2^2}{D^2}\cos^2(\omega t)]\ \Big].\end{aligned} \tag{45}$$

On the basis of (4) we obtain

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad a_x\approx G\frac{1}{D^2}\left[\ m_1+m_2+\frac{9}{2}\frac{r_1^2m_1}{D^2}\cos^2(\omega t)+\frac{9}{2}\frac{r_2^2m_2}{D^2}\cos^2(\omega t)\ \right]; \tag{46}$$

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad a_x\approx G\frac{1}{D^2}\left[\ m_1+m_2+\frac{9}{2}\frac{I(r_1+r_2)}{D^2}\cos^2(\omega t)\ \right]. \tag{47}$$

On the basis of the trigonometric formula

$$\cos^2(\omega t)=\frac{1}{2}(\cos(2\omega t)+1) \tag{48}$$

we obtain the following

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad a_x\approx G\frac{m_1+m_2}{D^2}+\frac{9}{4}G\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}(\cos(2\omega t)+1)\,. \tag{49}$$

On the basis of (4), it is possible to show that

$$D>>\sqrt{r_1\cdot r_2}\quad\Rightarrow\quad\frac{m_1+m_2}{D^2}>>\frac{9}{4}\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}\,. \tag{50}$$

I.e. the formula (49), it is possible to write in approximated form

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad a_x\approx G\frac{m_1+m_2}{D^2}+\frac{9}{4}G\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}\cos(2\omega t). \tag{51}$$

Intensity a_x (51) consists of a constant part in time with a value of

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad\bar{a}_x\approx G\frac{1}{D^2}(m_1+m_2) \tag{52}$$

and parts of variable in the time with value of

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad\Delta a_x\approx\frac{9}{4}G\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}\cos(2\omega t). \tag{53}$$

It results that the amplitude of x component of the gravitational field intensity is

$$D>>(r_1+r_2)\quad\Rightarrow\quad A_x\approx\frac{9}{4}G\frac{I(r_1+r_2)}{D^4}\,. \tag{54}$$

4.1.3 Law for the gravitational wave amplitude

The simplified formulae (40), (41) and (52), (53), (54) have been numerically verified and in a satisfactory way are in line with the exact formulae (23) and (22).

According to (52), when two bodies rotate, the resultant gravitational field intensity is inversely proportional to D^2 and proportional to the sum of mass.

Formulas (41) and (54) express changes in components of the gravitational field intensity (amplitudes). They show that the amplitude of gravitational wave generated by two bodies related by gravity is inversely proportional to D^4, proportional to the distance of r_1+r_2 between rotating bodies and proportional to the moment of inertia I (4).

Figure 11 shows components of the gravitational field intensity: time constant component (52), two time variable components (40) and (53). For the observer, component y causes changes of the direction of gravitational field intensity vector. Component x causes changes of the value of gravitational field intensity vector.

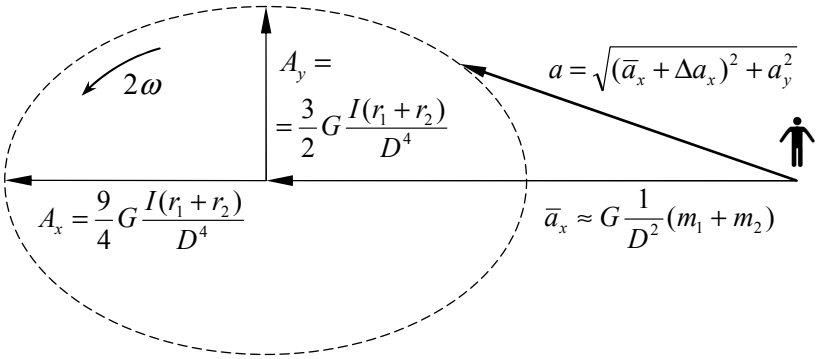


Figure 11. Components of the gravitational field intensity caused two rotating each other bodies related by gravity, when $D >> r_1 + r_2$

Formulas (40) and (53) indicate that the frequency of gravitational wave is twice as high as the frequency with which bodies rotate.

On the basis of above deductions we can formulate the law for gravitational wave amplitude coming from two bodies related by gravity. If the parameters of two rotating each other bodies are determined with the index μ and the parameters of two other rotating each other bodies are determined with the index η, then the following occurs

$$\frac{I_\eta(r_{\eta 1}+r_{\eta 2})}{D_\eta^4} \approx \frac{I_\mu(r_{\mu 1}+r_{\mu 2})}{D_\mu^4} \quad \underset{D_\mu >> r_{\mu 1}+r_{\mu 2}}{\overset{D_\eta >> r_{\eta 1}+r_{\eta 2}}{\Rightarrow}} \quad A_\eta \approx A_\mu . \tag{55}$$

4.2 Gravitational wave amplitude as seen by the rotating observer

Now we will determine the absolute changes of gravity field intensity for the case discussed in Chapter 3. According to the formula (32) we obtain

$$a_{\max}(t) = G\frac{m}{D^2+r^2-2Dr}; \tag{56}$$

$$a_{\min}(t) = G\frac{m}{D^2+r^2+2Dr}. \tag{57}$$

Half of the absolute change (amplitude) is

$$\Delta a = \frac{a_{\max}(t) - a_{\min}(t)}{2}. \tag{58}$$

Taking into account (56) and (57), the following are obtained

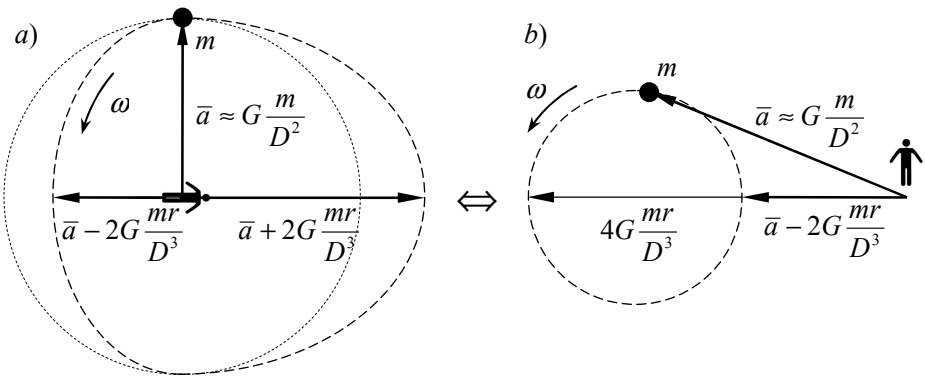
$$\Delta a = \frac{G}{2}\frac{m}{D^2+r^2-2Dr} - \frac{G}{2}\frac{m}{D^2+r^2+2Dr}; \tag{59}$$

$$\Delta a = \frac{G}{2} m \frac{(D^2+r^2+2Dr)-(D^2+r^2-2Dr)}{(D^2+r^2)^2-4D^2r^2}; \tag{60}$$

$$\Delta a = \frac{G}{2} m \frac{4Dr}{D^4+2D^2r^2+r^4-4D^2r^2} = 2Gm\frac{Dr}{D^4-2D^2r^2+r^4}; \tag{61}$$

$$\Delta a = 2G\frac{Dmr}{(D^2-r^2)^2} = 2G\frac{mr}{D^3}\frac{1}{(1-(r/D)^2)^2} \overset{D>r}{>} 2G\frac{mr}{D^3}; \tag{62}$$

$$D >> r \qquad \Rightarrow \qquad \Delta a \cong 2G\frac{mr}{D^3} \sim \frac{mr}{D^3}. \tag{63}$$



a — seen by rotating observer; *b*— caused by a single body rotating around a distant point

Figure 12. Components of gravity field intensity ($D >> r$)

In this case the amplitude of gravitational wave is inversely proportional to the third power of distance between the observer and source, i.e. D^3 (Fig. 12). If $D >> r$, then different bodies will be the source of gravitational wave of a similar amplitude, if the value of mr/D^3 is similar for these bodies.

From both analyzed cases it appears that changes in gravitational field intensity from heavy objects located at large distances from the observer will be similar to changes in gravitational field intensity from light objects located at smaller distances from the observer.

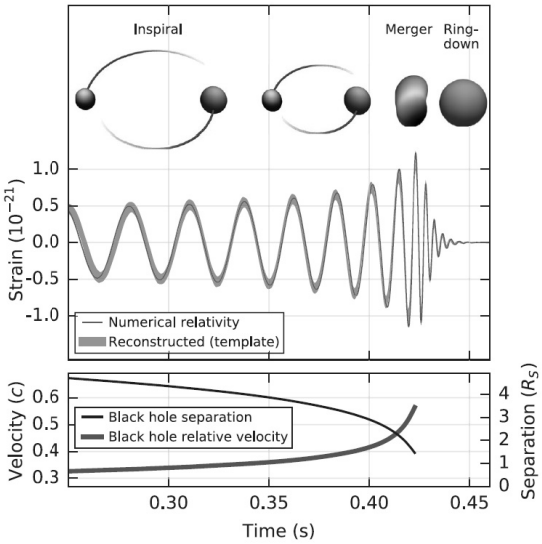
5 LIGO experiment

In 2016, the research team at the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) [1] announced that it had indirectly measured the gravitational wave as predicted by GTR. Measurements were carried out simultaneously at two sites in Hanford and Livingston. Both measured signals were consistent with the course of gravitational wave resulting from GTR. The wave that was measured was to come from two black holes rotating around each other and falling on each other. The mass of black holes were estimated at 36 mass of the Sun ($\approx 7{,}2\cdot 10^{31}$ kg) and 29 mass of the Sun ($\approx 5{,}8\cdot 10^{31}$ kg). When they collided, they were distant of 410 Mpc = 1 337 260 000 light years ($\approx 1{,}27\cdot 10^{25}$ m). Black holes falling down the spiral were, according to predictions of GTR, the source of gravitational wave understood as cyclical changes of the gravitational field intensity.

The LIGO experiment consists in searching for correlations between the signals measured at two Hanford and Livingston centers and the theoretical signal resulting from the GTR model. If these three signals are correlated, then it is concluded that a real signal was measured in the LIGO. Since the gravitational wave propagates at a finite speed of light, the two measured signals can be shifted in time.

Figure 13 shows the first indirect measurement of gravitational wave announced by the LIGO (GW150914). This wave has amplitude, which grows in the last phase of bodies moving close each other. The Figure shows that when black holes come close each other, the amplitude of the gravitational wave increases. The amplitude of gravitational wave disappears only after the collision of bodies.

Figure 14 shows the second measurement of gravitational wave announced by the LIGO (GW151226). As you can see in figure, the signals measured in the LIGO have values below the noise level. Searched gravitational wave had to be recovered with a use of filters made in the form of computer analysis. In this case, there is always a risk that the signal found is a result of used filters and not of actual measurement. In addition, in the noise it is possible to find the correlation with any pre-set signal. The study was conducted by Granger Clive, who discovered the phenomenon of coincidence in macroeconomic time series [5], for which he received the Nobel Prize in Economics in 2003. Therefore, if some stochastic signals were measured in Hanford and Livingston, it is almost certain that in a sufficiently long period of observation two very short signals will be observed, corresponding to searched signal. The correlation of such signals may be entirely incidental and not due to a common cause. With the LIGO, the risk is extremely high, as each collision of black holes is one-off. As a result of collision, the system of rotating black holes is destroyed and the measurement can never be repeated.



Top: amplitude resulting from the numerical model. Bottom: velocity of black holes and their distance given in the Schwarzschild's rays

Figure 13. Gravitational wave diagram given by the LIGO (GW150914). Source [1] and [3]

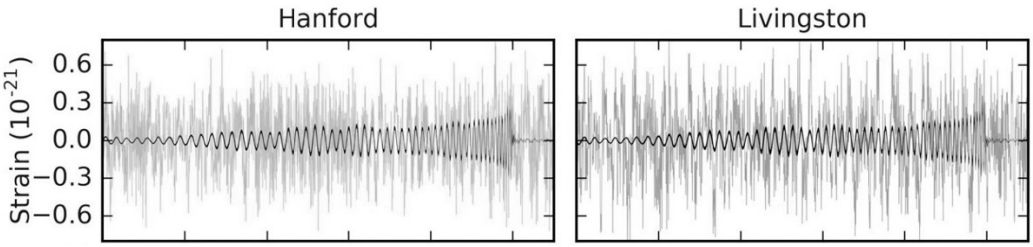


Figure 14. The signal measured in LIGO is at the noise level (GW151226). The diagrams show the signal after filtering with the best fitted course resulting from the model. Source [2]

The above doubts are confirmed by the research published in paper [6]. The authors analyzed the noise available by the LIGO team. They detected that noise from both centers, although it should be independent, is often correlated. In addition, there is a correlation between the noise measured in Hanford and Livingston for the time shift between these noise levels, similar to that between the recorded signals that were supposed to come from black holes.

It is possible to verify whether the phenomenon of coincidence occurs during the measurement of gravitational wave. Check how often the required gravitational wave signal is present in only one interferometer. If the desired signal appears in one interferometer, but at the same time (with acceptable time shift) it does not appear in other, then it is not a gravitational wave measurement, but a random correlation (coincidence). Such situations will indicate that there are random correlations with the desired signal. If random correlations occur in one interferometer, they are of course less frequent in two interferometers at the same time. Such a situation is going to be interpreted incorrectly as a measurement of real gravitational wave. However, if correlations between measured noises with searched signal occur only simultaneously in both interferometers, then correlations are not incidental, but have a common cause. Since the LIGO interferometers conduct directional measurements (the wave from some directions can be measured and from others not), it would be beneficial to have two different interferometers parallel to each other in order to investigate whether there is a phenomenon of coincidence. Then each real wave would be measured in the same way by both interferometers. Unfortunately, the interferometers in Hanford and Livingston are built in such a way that their arms are inclined towards each other. In this case, one can measure the signal and the other cannot, if it is from the correct direction. Such an uneven setting of interferometers cause that it is difficult to demonstrate the compatibility of conducted measurements there with the model is incidental.

The course of gravitational wave presented by the LIGO team differs significantly from the course that results from the Newton's law of gravitation. The comparison refers to two rotating bodies. According to the

LIGO, the amplitude of gravitational wave increases when bodies come close to each other (Fig. 13 and 14). The amplitude of Newton's gravitational wave decreases in proportion to the bodies coming close to each other (Fig. 4).

From the above it results that gravitational wave predicted by GTR has a different cause than the Newton's gravitational wave. The Newton wave is a result of variable, geometric layout of bodies in space. If the wave resulting from GTR had the same cause, it should follow a similar course. It is necessary to remembered that Newton's law of gravitation is one of the most experimentally verified physical laws. Of course, it was experimentally verified for bodies of relatively small mass. The LIGO measurements relate to bodies of much larger mass. If the course of gravitational wave is to be as published by the LIGO team, then for large circulating mass a completely new phenomenon must appear that does not appear in the Newton's law of gravitation. It is very interesting that such a new phenomenon has only been detected on the basis of GTR equations that have been proposed without any prior awareness of the existence of such a phenomenon.

Based on GTR, it was concluded that black holes lost a large part of their weight during the whole process of falling. Their mass was to radiate in a form of gravitational field [1]. After the collision, a black hole was created with a mass of about 63 mass of the Sun, i.e. 3 mass of the Sun less than the total mass of black holes colliding with each other. According to the Newton's law of gravitation, the gravitational force does not consume the body weight that generates it. This seems to be in line with the state of knowledge on the structure of matter. If the bodies lost weight due to generated gravity, then at least some atoms of matter would have to be disintegrated as a result of this process (or ageing consisting in reduction of their weight). Such a phenomenon is in no way investigated or confirmed under laboratory conditions.

According to simulations presented by the LIGO, the black holes that were the source of gravitational wave fell down on each other on a circular spiral in just a fraction of second. It is worth mentioning that such a way of their rotation is different from that which was observed directly in case of dual system PSR B1913+16 consisting of a pulsar and neutron star [7]. This system has been observed for several years. It was estimated that pulsar and neutron star, which rotate around each other at an average distance of about 2.65 rays of the Sun, would fall on each other after only 300 million years.

According to the LIGO, in both announced cases, black holes fell on each other in the spiral. In case of Newton's law of gravitation, two bodies related by gravity do not fall over each other in a spiral. Bodies could fall on each other in a spiral when they lose momentum for some reason, for example when they are moving in a dense medium. We have confirmed this with numerous simulations.

6 Proposal for testing the LIGO Interferometer

Every technical measuring device requires calibration or adjustment, because otherwise it is unknown what it measures. Neither calibration nor adjustment was applied in case of LIGO due to the lack of a controllable source of gravitational wave with known parameters that could be used as a standard. It will only be possible to check what the LIGO actually measures, if such a reference source of gravity wave is available.

The analysis presented in this article shows that it is possible to generate a model gravitational wave, which can be used for adjustment the LIGO. It is possible for that purpose to use e.g. body system as shown in Figure 1. The black holes in GW150914 formed this system before the collision. Figure 13 shows that when black holes had a velocity of $v = 0.35c$, they carried a full turn during $t = 0.05$ s. On this basis it can be assumed that $r_1 \approx 850$ km. On the basis of (54), taking into account equation (4), the following are obtained

$$\frac{4A'_x}{9G} \approx \frac{I(r_1+r_2)}{D^4} = \frac{r_1 m_1\left(r_1 + r_1\dfrac{m_1}{m_2}\right)}{D^4}; \tag{64}$$

$$\frac{4A'_x}{9G} \approx \frac{850000\cdot 7{,}2\cdot 10^{31}\left(850000 + 850000\dfrac{7{,}2\cdot 10^{31}}{5{,}8\cdot 10^{31}}\right)}{(1{,}27\cdot 10^{25})^4} = 4{,}6\cdot 10^{-57}. \tag{65}$$

According to (52), the average gravitational field intensity from black holes of GW150914 was as follows

$$\overline{a}'_x \approx G\frac{m_1+m_2}{D^2} = 6{,}67\cdot 10^{-11}\frac{7{,}2\cdot 10^{31}+5{,}8\cdot 10^{31}}{(1{,}27\cdot 10^{25})^2} = 5{,}4\cdot 10^{-29}. \tag{66}$$

If for the system in Figure 1 we will accept that m_1 = 10 kg, m_2 = 10 kg, r_1 = 10 m, D = 10 000 km, then

$$\frac{4A''_x}{9G} \approx \frac{I(r_1+r_2)}{D^4} = \frac{10\cdot 10\left(10+10\frac{10}{10}\right)}{(10\cdot 10^6)^4} = 2.0\cdot 10^{-25} >> 4.6\cdot 10^{-57}. \quad (67)$$

According to (52), the average gravitational field intensity from considered light bodies is as follows

$$\overline{a}''_x \approx G\frac{m_1+m_2}{D^2} = 6.67\cdot 10^{-11}\frac{10+10}{(10\cdot 10^6)^2} = 1.3\cdot 10^{-23} >> 5.4\cdot 10^{-29}. \quad (68)$$

Based on the law (55) for the gravitational wave amplitude, or directly from (65) and (67), it results that the gravitational wave amplitude generated by two light bodies under consideration is more than 10^{30} orders of magnitude greater than the gravitational wave amplitude generated by black holes GW150914, when r_1 = 850 km. Even if there are some relativistic effects resulting from GTR that are not predicted by Newton's law of gravitation when the black holes come to each other, the difference in these amplitudes is so great that the LIGO system should be able to detect the wave from these light bodies.

The source of artificial gravitational wave shall be sufficiently distant from the LIGO for the wave reaching the LIGO to be virtually flat. The arms of LIGO interferometer are 4 km long, and therefore it seems that the distance of wave source by D = 10 000 km should be sufficient. In order to avoid fraud, a completely different team of people should produce an artificial gravitational wave, accelerating the rotating bodies. The LIGO team shall be able to detect when these bodies are rotating.

The only technical problem in production of artificial gravitational waves is the rotation of bodies with sufficiently high frequency. According to the LIGO data, this system can only measure waves of a frequency greater than 40–150 Hz (in Figure 13 the gravity wave frequency is 40 Hz). This limitation makes it impossible to rotate of any large bodies, but it is possible to rotate bodies of, let say, 1 kg on a radius of r = 1 m.

7 Conclusions

Results announced by the LIGO team are presented as an experimental confirmation of the correctness of the General Theory of Relativity. However, in order for measurements taken by the LIGO to be unquestionable, it is necessary to make adjustments to this device. Only then will it be known whether the LIGO is able to detect gravitational waves and what it actually measures. For this purpose, it is possible to use circulating bodies, even of small mass, discussed in Chapter 6.

The existence of gravity waves results from the Newton's law of gravitation.

According to the Newton's law of gravitation, if the observer moves away from the source of gravity wave, then the gravitational field intensity decreases slower than the gravitational wave amplitude. If the source of wave is a system of two bodies related by gravity, as shown in Figure 1, then the amplitude decreases as D^4. If the source of wave is one body, as shown in Figure 8, then the amplitude decreases as D^3. Cyclical vibrations of the gravitational field intensity occur both in classical mechanics and in the General Theory of Relativity. However, they have different properties. The differences are as follows:

1. According to classical mechanics, when bodies come to each other, the gravitational field amplitude decreases (Figures 3 and 4). According to the General Theory of Relativity, when bodies come to each other, the amplitude of gravitational wave increases (Fig. 13 and 14).

This difference in the course of gravitational wave indicates that, according to GTR, the circulating large mass are accompanied by the phenomenon not occurring in Newton's law of gravitation, which is one of the best verified experimental physical laws. It is very interesting that such a new phenomenon has only been detected on the basis of GTR equations that have been proposed without any prior awareness of the existence of such a phenomenon.

2. In classical mechanics the gravitational interaction is not related to the loss of energy by the body that emits this interaction. According to the General Theory of Relativity, objects emitting gravitational waves lose their mass, carried in a form of gravitational waves [1].

3. According to classical mechanics, bodies cannot fall on each other in the spiral, if they do not lose momentum. They can fall on each other in a spiral, if they move in a dense medium and lose their momentum. Therefore, trajectories similar to the one shown in Figure 2 (wave in Fig. 3 and 4) do not apply to bodies naturally related by gravity in an empty space. According to the results announced by the LIGO, as a part of GTR, bodies can fall on each other in the spiral, because they lose energy when they generate a gravitational wave.

4. Modulation of the gravitational field intensity causes changes in the dimension of bodies. Such a phenomenon is deformation of the shape of Earth during tides and outflows. According to GTR, such a phenomenon should be interpreted as a deformation of the space curve. According to classical mechanics, this is a simple deformation of the dimension of bodies caused by stress.

Measurements conducted in LIGO are on the noise level. This device is to measure relative changes of two lengths, four-kilometer arms at the level of one atom. Meanwhile the entire matter is filled up with various kinds of vibrations. The problem when measuring noise is the phenomenon of coincidence. It turns out that very often there are random correlations in rows of not connected with causality relations. Granger Clive's discovery of this phenomenon was honored with the Nobel Prize for Economics in 2003. The phenomenon of coincidence seriously undermines the credibility of measurements announced by the LIGO team.

It is possible to verify whether the phenomenon of coincidence occurs when measuring the gravitational wave (Chapter 5). You should check how often the searched signal, resulting from the model of GTR field, is present in only one interferometer. If it happens that such a signal occurs only in one interferometer, but at the same time (with acceptable time shift) it does not occur in other interferometer, then the detection of searched signal does not mean discovery of the gravitational wave. If interferometers actually measure the gravitational wave, then it should be recorded simultaneously by all the interferometers (taking into account their angles of inclination). The presence of a signal in only one interferometer will prove that the desired signals are present in measurements at random (random noise) or have a local cause.

Presented analysis shows that «gravitational wave», calculated on the basis of GTR, is not in fact a wave understood as a carrier of gravity. This is a normal modulation (i.e. cyclic change) of the gravitational field intensity caused by the motion of two rotating bodies. This is evidenced by the fact that frequency of the «gravitational wave» resulting from GTR is closely related to the frequency of rotating bodies (for two bodies the frequency of «gravitational wave» is twice as high as the frequency of rotating bodies). In this article we showed that according to the Newton's law of gravitation, rotating bodies also causes modulation of gravity field intensity with a frequency two times the frequency of spinning of bodies (i.e., the same way as in the framework of GTR).

If two light sources (e.g. light bulbs as shown in Figure 15) rotate, they shall also produce modulated intensity lighting. In this case also the frequency of modulation of the light intensity will be closely related to the frequency of rotating bulbs. This modulation of light intensity has nothing to do with the photon's properties. It has nothing to do with the frequency (its color) of light produced by these light bulbs. The frequency that can be assigned to photons (i.e. frequency of light produced by the bulbs) is something completely different and independent of the frequency of modulation of the light intensity, caused by rotating bulbs.

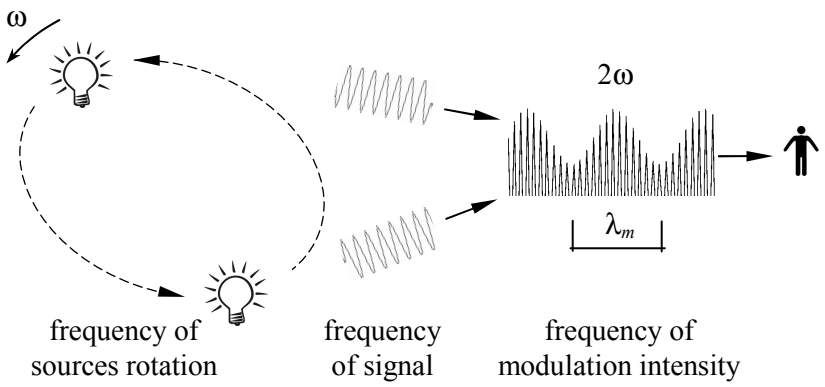


Figure 15. Frequency of light intensity modulation is something else than the frequency of light signal

It is the same as in case of the gravitational field intensity modulated by rotating bodies. Modulation of gravitational field intensity has no connection with the properties of hypothetical graviton. Because the model of field on which GTR is based is mathematically complex, the normal modulation of gravitational field intensity, caused by rotating bodies, was wrongly interpreted as a gravitational wave, understood as a carrier of gravity [1–3].

In this article we called the normal modulation of gravitational field intensity as a gravitational wave, because this was done in case of «gravitational waves» resulting from GTR.

References

1 Abbott, B.P., et al. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters, 116, 6, 061102*, 1–16.

2 Abbott, B.P., et al. (2016). GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence, *Physical Review Letters, 116, 24, 241103*, 1–14.

3 Royal Swedish Academy of Sciences. (2017). The laser interferometer gravitational-wave observatory and the first direct observation of gravitational waves, Stockholm, *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics,* 1–18.

4 Hartle, J.B. (2003). Gravity. An Introduction to Einstein's General Relativity, published by Pearson Education, publishing as Benjamin Cummings.

5 Granger Clive, W.J. (1981). Some Properties of Time Series Data and Their Use in Econometric Model Specification, *Journal of Econometrics, 16*, 121–130,.

6 Creswell, J., Hausegger S., Jackson A.D., Liu Hao, Naselsky P. (2017). On the time lags of the LIGO signals, *arXiv 2017*, 1–28, https://arxiv.org/abs/1706.04191.

7 Taylor, J.H., Weisberg, J.M. (1982). A new test of general relativity — gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16, Astrophysical Journal, 253, 908–920.

Р. Шостэк, П. Гуральски, К. Шостэк

Ньютонның гравитациясы мен жалпы салыстырмалылық теориясынан туындайтын гравитациялық толқындар (LIGO) кезіндегі гравитация толқыны

Осы мақаланың ең маңызды тұжырымы мынада: жалпы салыстырмалылық теориясынан қандай да бір гравитациялық толқындар туындамайды, денелердің айналуынан болған гравитациялық өрістің кернеулігінің қарапайым модуляциясы туындайды. Егер LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) тобы бір нәрсе өлшесе, онда бұл гравитация тасымалдаушы ретінде қабылданатын гравитациялық толқын емес, модуляция болған еді. Бұл талқылау физикада тым күрделі математиканы пайдалану нәтижелердің дұрыс түсіндірілмеуіне әкеп соқтыратынын көрсетеді (бұл жағдайда тензорлық есептеу кінәлі болуы мүмкін). Формальды түрде, әртүрлі заттарды есептеуге болады, бірақ мұндай есептеулердің нені білдіретінін білмей, оларға қате түсінік беруге болады. Қазіргі физикадағы гравитациялық өріс кернеулігінің модуляциясы гравитациялық толқын деп аталғандықтан, біз оны толқын деп атаймыз, бірақ мұндай терминология адастырады. Мақалада Ньютонның тартылыс заңынан гравитациялық толқындардың болуы көрсетілген және олар жалпы салыстырмалылық теориясынан шығатындарға өте ұқсас. Авторлар Ньютонның ауырлық күші мен гравитациялық толқындардың таралуының жалпы салыстырмалылық теориясынан туындайтын гравитациялық толқындардың таралуының арасындағы айырмашылықты көрсетеді, өлшеуді LIGO тобы жариялады. Мақалада LIGO обсерваториясында қолданылатын гравитациялық толқынды үшін лазерлік интерферометрді тестілеу әдісі ұсынылды. Сондай-ақ, мақалада LIGO командасы жариялаған нәтижелер сыны берілген.

Кілт сөздер: гравитациялық толқын, Ньютон гравитациясы, LIGO интерферометрі

Р. Шостэк, П. Гуральски, К. Шостэк

Гравитационные волны в гравитации Ньютона и критика гравитационных волн, вытекающих из общей теории относительности (LIGO)

Самый важный вывод этой статьи состоит в том, что из общей теории относительности не вытекают какие-либо гравитационные волны, а обычная модуляция напряженности гравитационного поля, вызванная вращением тел. Если команда LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) что-то измерила, то это была модуляция, а не гравитационная волна, понимаемая как носитель гравитации. Это обсуждение показывает, что использование слишком сложной математики в физике приводит к неправильной интерпретации результатов (в этом случае, возможно, виновато тензорное исчисление). Формально, можно вычислять различные вещи, но, не зная, что означают такие расчеты, можно назначить им ошибочную интерпретацию. Поскольку модуляция напряженности гравитационного поля в современной физике была названа гравитационной волной, то мы также называем ее волной, хотя такая терминология вводит в заблуждение. В статье показано, что из закона тяготения Ньютона

следует существование гравитационных волн, очень похожих на те, которые следуют из общей теории относительности. Авторами показаны различия между распространением гравитационных волн, следующих из гравитации Ньютона, и гравитационных волн, вытекающих из общей теории относительности, измерение которых было объявлено командой LIGO. Предложен метод тестирования лазерного интерферометра для измерения гравитационной волны, используемого в обсерватории LIGO. Кроме того, представлена критика результатов, опубликованных командой LIGO.

Ключевые слова: гравитационная волна, гравитация Ньютона, интерферометр LIGO.

DOI: 10.31489/2019Ph4/57-62

UDC 669.712.2

A.D. Mausymbayeva[1], Ya.Zh. Baisagov[2], V.S. Portnov[1],
V.M. Yurov[2], S.A. Guchenko[2], A. Amangeldikyzy[1]

[1]Karaganda State Technical University, Kazakhstan;
[2]Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan
(E-mail: aliya_maussym@mail.ru)

Measuring the iron oxide in Shubarkol deposit coal

Comprehensive development of mineral resources is one of the main objectives of a state. An important role for its solution is the import substitution of expensive colombian coals used in the production of industrial silicon, with shubarkol coals having similar characteristics. One of the main geological tasks is to study the distribution of iron oxide in coals, which affects to the technology of ore-thermal production of silicon. Researches have shown that expensive chemical analyzes of iron oxide, with high accuracy, do not allow them to be used promptly when forming a batch of coal at the enterprise. To solve the urgent task of an express assessment of the content of iron oxide in coal we have been developed a method and device that implements the induction principle of measuring the magnetic characteristics of coal. The method is based on the transition of the oxide of two-valence iron into a complex oxide of trivalent during ashing. The discrepancy between the measurement results according to the Kazakhstan state standard GOST 10538–87 and the developed method is within the permissible range of this standard. The device is being used at Shubarkol Komir JSC Company. It received certificate of metrological certification No. 9912 and is authorized as a measurement instrument in the Republic of Kazakhstan.

Keywords: coal, ash, iron oxides, magnetization, induction coils, concentration measurement.

Introduction

Shubarkol Komir JSC company would be interested in supplying its products to RusAl and Tau-Ken Temir LLP as a substitute for Colombian coal for silicon production. To assess this possibility, Centrgeolanalit LLP conducted a study to check the ash content of coal benches and the iron oxide content in coal ash. The findings suggest that:

1. The ash content of coal benches varies from 1.5 % to 4.0 %, and its iron oxide content varies from 0.9 to 1.5 kg/t, which enables to use Shubarkol coal as a substitute for Colombian coal;

2. Seam extension in areas where the iron oxide content is within the required limits is about 500 m in the Western Area, which is 40 % of the extension of mining, whereas in the Central Area it is about 1100 mm, which is 20 %;

3. Since mining is carried out according to the annual plan, mining in areas with low iron oxide content may not coincide with the time of coal shipment to RusAl.

4. Few samples does not give certainty about the iron oxide content over the entire seam extension as this indicator is variable both along strike and at depth.

In this regard, it is difficult to forecast the average iron oxide content in coal during mining and to quickly monitor its grade during production and shipping to consumer, which is associated with high cost of chemical analyzes and their duration. It was concluded that meeting technological requirements for the iron

oxide content in coal within the established limits (up to 1.5 kg/t) for shipment to RusAl and Tau-Ken Temir enterprises is costly and difficult.

Sources of iron oxide in coal

The main minerals in the coals of Shubarkol deposit are vitrinized matter, and to a lesser extent semi-vitrinized and fusainized matter. The reflection index of vitrinite is 0.50–0.62 %. As per Kazakhstan state standard GOST-25543, they relate to stone type, grade D (long flame), subgroup DV (long flame, vitrinite). According to ST RK ISO 11760, coals are subbituminous of low grade A, high vitrinite grade.

As per GOST 11022–95, there had been checked the ash content of coals which varies in individual seams within 4.2–20.1 % with extreme values for individual seams of 1.7–31.0 %. The ash content and mineral composition of raw coal is determined by occurrence of rock interlayers in the seams and is dependent on its impurity degree. The average ash content in the Upper Level coals varies from 8.7 to 8.9 % (Western area), 11.9–12.7 % (Central area) and 10.9–12.1 % (Eastern area).

One of the iron sources in coal are interlayers and lenses of siderite ($FeCO_3$) 62.1 % FeO and 37.99 % CO_2, which are developed mostly in the central part of the overburden rock section.

As an iron oxide carbonate, siderite is formed in reduction conditions, i.e. in conditions of oxygen deficiency and decomposition of organic residues with the formation of carbon dioxide and hydrogen sulfide due to protein substances. The source of ferruginization of weathering crust sandstones and hematite-goethite nodules in the deposit is ferric oxide (Fe_2O_3), which is formed during the siderite oxidation and forms «iron caps» (outliers), consisting of goethite (60–80 %), hematite (20–35 %) with the following chemical composition (%): Fe_2O_3 — 87–88 %, FeO < 0.25; MnO — 0.4–0.6; SiO_2 — 3.4; Al_2O_3 — 0.7; TiO_2 — 0.03; P_2O_5 — 0.2; S_{total} — 0.2.

The coal seams of the Upper and Lower Levels are characterized by interlayers of coal saturated with siderite spherolith, resulting in coals acquiring a granular structure [1].

Quite often, iron pyrite disulfide (II) (FeS_2) is found in the coals of the deposit, filling cracks and present in the form of oolites confined to gelified matter.

The Upper Horizon seams are characterized by an unusual mineral association, oolites in the form of loose formations consisting of a pelitomorphic mixture of pyrite, quartz and an amorphous organic matter represented by a gelified substance.

The average content of iron sulfides in raw coals of the Upper Level is 0.14 %, and 0.2 % in the Lower Level.

In total (excluding hydroxides), there are four natural iron oxides 2-Fe_2O_3 (hematite), Fe_3O_4 (magnetite), γ-Fe_2O_3 (maghemite), $Fe_{1-x}O$ (wustite).

Hematite is an antiferromagnet and has weak ferromagnetism below the Néel point (948 K). In magnetite, all bivalent iron ions are in an octahedral environment, and trivalent ions are divided in half between the octahedral and tetrahedral environment $(Fe^{3+})[Fe^{2+}\ Fe^{3+}]O_4$. The ratio $Fe^{2+}/Fe^{3+}= 0.5$.

The values of magnetic moments are dependent on the number of uncompensated electrons in the 3*d*-electron shell of iron ions, which explains ferromagnetic properties of magnetite. It acquires paramagnetic properties above the Curie temperature $T = 850$ K. With a decrease in temperature in a constant magnetic field, magnetite acquires induced and thermo-remanent magnetization, which occurs during coal ashing (1150 K). Maghemite contains only trivalent iron cations. At temperatures below $T = 840–986$ K, it is a ferromagnet. Hematite, magnetite, maghemite and wustite are practically not found in coal, but magnetite is of interest as a newly formed mineral appearing during the ashing and transition of bivalent iron to trivalent iron.

The carbonaceous type of siderite ($FeCO_3$) can have calcium, cobalt, zinc and manganite minerals. Iron oxide (III) (Fe_2O_3) 86–89 %, water (H_2O) 10–14 % are quickly eroded with transition to limonite. Oxidizing, it transfers to brown iron ore $nFe_2O_3 + nH_2O$ [1].

Goethite produces pseudomorphs in pyrite, marcasite and other sulfides, in siderite, magnetite, hematite and ferruginous silicates.

The oxygen content in coals of the deposit varies from 3 to 5 %, which indicates that they belong to the demethanization zone and the oxidation zone of iron-containing minerals (silicates, sulfides, iron minerals) which is characterized by active water-gas exchange, creating conditions for the release and transfer of oxidation products to coal seams. This is also evidenced by high nitrogen content. According to the hermetic glasses data, at a depth of 40–115 m they exceed 90 %, rising to 95–97 %, and according to core samples in

the depth interval 43–200 m it varies from 38–55 % to 95–97 %. The average methane content is 2.5 %, which confirms the conclusion about coal demethanization accross the entire deposit.

The carbon dioxide content in the Upper Level seams at depths from 40 to 100 m is 60–30 %, whereas to the basin center it decreases to 20–10 %. The hydrogen content at depths of up to 100 m does not exceed 1 %.

The average value of the moisture mass fraction (GOST 8858–76), which was estimated by the maximum moisture capacity (W_{max}%), for the Upper seam is 15.3 with extreme values of 8.0–28.4, while it does not depend on the ash content of coal.

Under such conditions, there occurs oxidation of Fe^{2+} coming into the coal seam from overlying rocks as products of decomposition of iron-containing minerals up to Fe^{3+} by reaction exemplified by iron oxide (II) both with moisture and without it:

$$4FeO + 2nH_2O + O_2 \rightarrow 2(Fe_2O_3\ nH_2O)$$

and at temperatures above 300–500º C (ashing)

$$6FeO + O_2 \rightarrow Fe_3O_4$$

Measurement of the mass fraction of iron oxide in coal ash samples according to GOST 10538–87 is done by photogrammetry with orthofentrolin, whereas measurement of iron content is carried out in ash samples after coal ashing according to GOST 11022–95 at a temperature of (815±10) ºC in an air atmosphere with active interaction with oxygen.

Magnetite (Fe_3O_4) is formed in coals and their ashes, which is a complex oxide that simultaneously contains II and III valence iron. In the presence of constant magnetic field of the Earth, conditions are created for the acquisition of induced magnetization by this oxide, and during thermostatic magnetization ashing the magnetic moment arises, which is determined by the mass fraction of Fe_3O_4.

All this provides the basis for using the induction method for assessing iron oxide in coal.

There are chemical and physical methods (X-ray fluorescence, atomic emission) for determining chemical composition of coal, ash, including iron oxides (III) regulated by GOST: 10538–87, P 55879–2013, P 54237–2010 (ASTMD 6349–2008) [1].

These methods are characterized by long-term measurement process, which is unacceptable when preparing coal as a carbon reducing agent for transportation to the consumer.

Induction method in coal iron oxide test

In this regard, we have developed a device for rapid analysis of the iron oxide (III) concentration in coal by its magnetic susceptibility. Pieces of works [1, 2] on achievements in induction method for measuring the magnetic susceptibility of samples in feed-through coil by changing the introduced complex resistance enabled us to elaborate on the subject and create the device.

To measure extreme low values of magnetic susceptibility with high accuracy, it was necessary to consider many influences. A sample to be magnetically measured is placed to an inductor, while the winding inductance changes in proportion to the magnetic susceptibility of the sample [1, 2].

To measure little changes in inductance, we used a bridge method which uses two identical inductors, with the sample placed into one of them. Identical secondary coils are wound on the coils, with their windings connected in series and in opposite phases for mutual compensation of the signal induced to them in the absence of the measured sample. An equivalent chart of the measuring unit is shown in Figure 1.

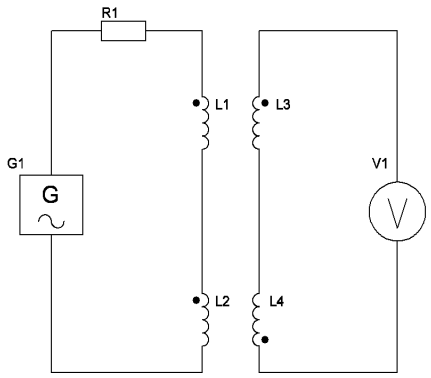


Figure 1. An equivalent chart of the measuring unit

In this circuit, generator G1 excites an alternating sinusoidal electric current in the circuit G1, R1, L1, L2, and resistor R1 displays the total active resistance of the winding wire L1 (measuring) and L2 (compensation).

As per the Kirchhoff's second law:

$$U_{G1} = IR1 + Ij\omega L1 + Ij\omega L2, \quad (1)$$

where ω is angular frequency of alternating current, I is current in the circuit of primary windings. Secondary voltages:

$$U_{L3} = Ij\omega L_1 k \; ; \; U_{L4} = Ij\omega L_2 k \; , \quad (2)$$

where k is transformation ratio.

As a result, a useful error signal will be:

$$\Delta U = Ij\omega L_1 k - Ij\omega L_2 k = Ij\omega k(L_1 - L_2) \; . \quad (3)$$

From formula (3) it follows that the error voltage depends on the difference of inductance of the measuring and compensation (reference) coils, but does not depend on active resistance of the winding, which helps to avoid problems associated with temperature dependence of the coil.

Due to extremely small size of the relative magnitude of the change in coils inductance when introducing the sample, measurement of the useful error signal appears to be a difficult task. Additional difficulty is impossibility of full compensation of the secondary voltage due to misalignment of the voltages both in amplitude and in phase due to influence of inter-turn and inter-winding capacitance. To solve this problem, it was decided to abandon exact compensation of voltages and the use of a zero indicator. Instead, the error signal is digitized using a high-precision analog-to-digital converter. The chart of the error signal processing unit is shown in Figure 2.

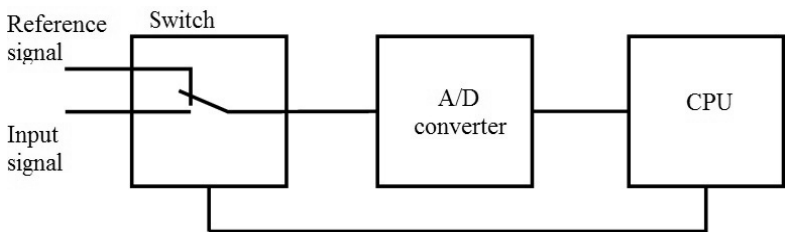


Figure 2. Error signal processing unit

Analysis of tracer amounts of heavy metals using traditional physicochemical methods (atomic absorption, polarography, photometry, etc.) requires preliminary preparation of the sample because metals in most objects are in a bound state. They form fairly strong organic complexes that hinder to accurately reproduce and determine their content. Therefore, it is necessary to deconstruct the organic component of the coal sample in order to identify the target elements in the form of stable inorganic compounds convenient for subsequent analysis [2].

Destruction of organic components is performed by ashing, i.e. burning a sample in a muffle furnace, and wet ashing, which is heating with acid oxidizing agents. Preparation for heavy metal analysis in samples of complex composition by these methods sometimes takes 8–10 hours and about 80–90 % of the total testing time. In most cases, errors of the experimental results are made at this stage [2].

To reduce the time of sample preparation, we used partial ashing process which includes:

– weighing by 10 g of coal and placing in a crucible with a lid;
– crucibles are quickly placed to the zone of stable temperature of the furnace heated to (900±5) ºC, kept for 10 minutes (the temperature that fell when the crucibles were placed to the furnace should again reach (900±5) ºC in no more than 4 min.);
– a support with the crucibles is taken away from the furnace, cooled on a metal or asbestos plate to room temperature;
– the test sample is transferred from the crucible to a sealed polyethylene container, which is placed to a flask for putting into the measuring coil of the device and analyzed in accordance with the developed procedure.

The developed PIKOZ-1 device and the method of induction-based measurement of the iron oxide content in coal are introduced in a coal mine of Shubarkol Komir JSC.

The results of measurements of the iron oxide content in coal according to GOST 10538–87 and using induction-based method are presented in the Table which suggests that the observed discrepancy in results is within acceptable limits (GOST 10538–87). The time of one measurement as per GOST 10538–87 (using chemical method) was 14 hours, and the induction method took 0.5 hours, which reduces the time of coal test for iron oxide content by 48 times. This is a crucial factor when preparing coal before shipment.

Table

Results of measuring iron oxide in coal by analytical and induction methods

Certificate #	Content of Fe_3O_4, (kg/t)		Mass fraction of Fe_3O_4, (%)		Discrepancy (%) abs.
	GOST 10538–87	Induction method	GOST 10538–87	Induction method	
1453	2.08	1.78	0.208	0.178	0.03
1024	0.77	2.05	0.077	0.205	0.13
1021	1.02	2.66	0.102	0.266	0.16
1598	2.33	2.71	0.233	0.271	0.04
1239	4.36	4.23	0.436	0.423	0.01
1539	1.50	1.32	0.150	0.132	0.02
1201	2.33	2.28	0.233	0.288	0.06
1221	2.67	2.70	0.267	0.270	0.01
1454	1.63	1.74	0.163	0.174	0.01
1271	10.77	11.09	1.077	1.109	0.03
1342	8.73	8.64	0.873	0.864	0.01
191	1.47	1.48	0.147	0.148	0.001

The error of analytical measurement according to GOST 10538–57 for iron oxide from 5 to 10 % should be 0.4 % absolute or 7.7 % relative. For a mean iron oxide content of 3.35 % the resulting error is 0.2 % absolute found by analytical and induction methods.

Conclusion

For rapid measuring of the concentration of iron oxide in coal, the PIKOZH-1 method and device have been developed. The device was introduced at Shubarkol Komir JSC, Certificate No. 9912 on metrological certification as a measuring instrument with the right to be used in the Republic of Kazakhstan was received for it. It can be offered to organizations working on supplies of unique coal of the Shubarkol type in order to use it as a carbon reducing agent in the production of silicon and aluminum.

The resulting error in the measurement of iron oxide in coals meets the requirements of the Kazakhstan state standard GOST 10538–57 and is 0.2 % abs.

The work was carried out under the program of the Ministry of Education and Science of Kazakhstan, Grants # 0118PK000063 and No. Ф.0781.

References

1 Кармазин В.В. Определение зольности угольных шламов по измерению их магнитной восприимчивости на основе LC-метода / В.В. Кармазин, В.А. Козлов // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн.). — 2006. — № 10. — С. 24–27.

2 Баженов И.Н. Метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде / И.Н. Баженов, О.О. Басов // Металлургия и обогащение. Записки Горного института. — 2018. —Т. 230. — С. 123–130.

А.Д. Маусымбаева, Я.Ж. Байсагов, В.С. Портнов,
В.М. Юров, С.А. Гученко, А. Амангелдіқызы

Шұбаркөл кен орны көмірлеріндегі темір оксидін анықтау

Пайдалы қазбаларды кешенді игеру мемлекеттің басты міндеттерінің бірі болып табылады. Оны шешуде маңызды рөл өнеркәсіптік кремний өндірісінде қолданылатын қымбат колумбиялық көмірлердің импортын ұқсас сипаттамалары бар Шұбаркөл көмірлеріне алмастыру болып табылады.

Негізгі геологиялық міндеттердің бірі — кремнийдің кен термиялық өндіру технологиясына әсер ететін көмірдегі темір оксидінің таралуын зерттеу. Жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, темір оксидінің қымбат химиялық талдаулары жоғары дәлдікпен, оларды кәсіпорында көмір партиясын қалыптастыру кезінде жедел қолдануға мүмкіндік бермейді. Өзекті мәселені шешу үшін көмірдегі темір оксидінің құрамын жедел бағалауды үшін көмірдің магниттік сипаттамаларын өлшеудің индукциялық принципін жүзеге асыратын әдіс пен аппарат жасалды. Бұл әдіс екі валентті темірдің оксидін ұсақтау кезінде күрделі үшвалентті тотығына айналдыруға негізделген. ГОСТ 10538–87 бойынша өлшеу нәтижелері мен әзірленген әдіс арасындағы сәйкессіздік рұқсат етілген деңгейге сәйкес келеді. Құрылғы «Шұбаркөл Көмір» АҚ кәсіпорнында қолданылады. Қазақстан Республикасындағы өлшеу құралы ретінде метрологиялық Сертификаттау туралы № 9912 куәлік берілді.

Кілт сөздер: көмір, күл, темір оксиді, магниттенгендік, индукциялық катушкалар, концентрацияны өлшеу.

А.Д. Маусымбаева, Я.Ж. Байсагов, В.С. Портнов,
В.М. Юров, С.А. Гученко, А. Амангелдыкызы

Определение оксида железа в углях месторождения Шубарколь

Комплексное освоение минеральных ресурсов является одной из главных задач государства. Важную роль для ее решения имеет импортозамещение дорогостоящих колумбийских углей, используемых при получении технического кремния, шубаркольскими углями, имеющими сходные характеристики. Одной из главных геологических задач является изучение распределения в углях оксида железа, который оказывает влияние на технологию руднотермического получения кремния. Проведенные исследования показали, что дорогостоящие химические анализы на оксид железа, при высокой точности, не позволяют оперативно использовать их при формировании партии угля на предприятии. Для решения актуальной задачи — экспрессной оценки содержаний оксида железа в угле разработаны способ и прибор, реализующие индукционный принцип измерения магнитных характеристик углей. Способ основан на переходе оксида двухвалентного железа в сложный оксид трехвалентного при озолении. Расхождение результатов измерений по ГОСТу 10538–87 и разработанной методике лежит в пределах допустимости. Прибор используется на предприятии АО «Шубарколь Комир». Получен Сертификат № 9912 о метрологической аттестации как средство измерения в Республике Казахстан.

Ключевые слова: угли, зольность, оксиды железа, намагниченность, индукционные катушки, измерение концентраций.

References

1 Karamzin, V.V., & Kozlov, V.A. (2006). Opredelenie zolnosti uholnykh shlamov po izmereniiu ikh mahnitnoi vospriimchivosti na osnove LC-metoda [Determining Ash Content of Coal Sludge by Measuring Magnetic Susceptibility based on LC Method]. *Hornyi iformatsionnyi-analiticheskii biuletten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) — Mining Information Analysis Bulletin (scientific technical journal), 10,* 24–27 [in Russian].

2 Bazhenov, I.N., & Basov, O.O. (2018). Metod induktivnoho kontrolia massovoi doli zheleza v mahnetitovoi rude [Eddy Current Test for the Mass Fraction of Iron in Magnetite Ore]. *Metallurhiia i obohoshchenie. Zapiski Hornoho instituta – Metallurgy and Concentration. Proceedings of the Mining Institute, 230,* 123–130 [in Russian].

DOI: 10.31489/2019Ph4/63-68

UDC 622.7.002.82

N.K. Tanasheva[1], L.L. Minkov[2], A.Zh. Tleubergenova[3], K.K. Sadenova[3]

[1]*Institute of Applied Mathematics, Karaganda, Kazakhstan;*
[2]*Tomsk State University, Russia;*
[3]*Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan*
(E-mail: nazgulya_tans@mail.ru)

Calculation of coal-water fuel combustion technology based on mathematical modeling

Calculation of technology of burning of coal-water fuel (CWF) on the basis of mathematical modeling is presented. Numerical simulation of the process of burning coal-water fuel was carried out in the software package ANSYS Fluent. It is based on the laws of conservation of mass, energy and momentum in a multicomponent medium and the solution of the Navier-Stokes equations, continuity and heat transfer. A mathematical model of the combustion of CWF consists of three phases. For modeling the combustion of pulverized coal-water fuel, using the model of breakup of eddies (Eddy-Dissipation Model) and the parameters of injection of droplets into the furnace were set using the «Discrete Phase Model» function. In ANSYS Fluent, a three-dimensional formulation of the problem is given and the Navier-Stokes and Reynolds-averaged energy equations are solved. To account for turbulence, a two-parameter model «k-ε»is chosen.In the course of numerical simulation, the distribution field patterns of velocity vectors were obtained. When conducting a thorough analysis of the furnace temperature regime, we realized that the optimal combustion temperature of CWF is 700–1200 °C. The relation of the particle residence time in the combustion chamber of the furnace on its diameter is obtained.

Keywords: hydrocarbon fuel, numerical simulation, ANSYS Fluent, the Navier-Stokes equations, the process of burning.

Introduction

The process of fuel combustion in technical devices is a difficult and expensive process, which involves high cost of each experiment and equipment, this is a very complicated process of pre-mathematical studies. To facilitate the process of preliminary research, numerical modeling is currently used [1].

The numerical simulation of the process of burning coal-water fuel was carried out in the software package ANSYS Fluent. It is based on the laws of conservation of mass, energy and momentum in a multicomponent medium and the solution of the Navier-Stokes equations, continuity and heat transfer. The combustion mixture depends on the speed of the reaction and can occur in laminar flow and turbulent flow. The process of burning CWF is the turbulent combustion regime. Chemical reactions and turbulence have a mutual influence, in consequence of which the flame can increase turbulence by accelerating the flow and changing the viscosity, and turbulence in turn changes the structure of the flame intensifying mixing and reaction rates

The process of burning CWF is the combustion of a mixture that consists of water-carbon droplets and coal particles [2]. To describe the combustion of this mixture takes the approach of Euler and Lagrange. According to this approach, the Eulerian component is responsible for the equations of motion, heat transfer and combustion in the gas medium, and the Lagrange approach is responsible for the description of the motion and heat and mass transfer of a single particle. A two-parameter turbulence model «k-ε» is used to account for gas turbulence, which also takes into account the influence of individual particles.

A mathematical model of the combustion of CWF consists of three phases. The first phase is the gas phase, it is described by the following equations:

1. The equation of continuity

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial(pU_i)}{\partial x_i}=J_{evap}+J_{vap}+J_{char}\,. \tag{1}$$

2. Mass balance equation of gas components:

$$\frac{\partial \rho C_{N_2}}{\partial t}+\frac{\partial \rho C_{N_2}U_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{Sc_t}\frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i}\right). \tag{2}$$

3. Equations of mass change of gas components:

$$\frac{\partial \rho C_{O_2}}{\partial t}+\frac{\partial \rho C_{O_2}U_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{Sc_t}\frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i}\right)-\beta_{vol}J_{vol}-\beta_{CO}J_{CO}-J_{char}^{O_2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho C_{vol}}{\partial t}+\frac{\partial \rho C_{vol}U_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{Sc_t}\frac{\partial C_{vol}}{\partial x_i}\right)+\alpha_{vap}J_{vap}-J_{vol}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO}}{\partial t}+\frac{\partial \rho C_{CO}U_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{Sc_t}\frac{\partial C_{CO}}{\partial x_i}\right)+J_{char}^{CO}-J_{CO}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho C_{H_2O}}{\partial t}+\frac{\partial \rho C_{H_2O}U_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{Sc_t}\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x_i}\right)+J_{evap}. \quad (6)$$

4. The equation of motion

$$\frac{\partial \rho U_j}{\partial t}+\frac{\partial \rho U_iU_j}{\partial x_i}=-\frac{\partial p}{\partial x_j}+\rho g_j+F_j+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\mu_T)\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}\left[\rho k+(\mu+\mu_T)\frac{\partial U_k}{\partial x_k}\right]\right], \quad (7)$$

where $j=1,2,3$.

5. The equation of energy

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t}+\frac{\partial \rho U_i cT}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left[\frac{\mu}{\Pr}+\frac{\mu_T}{\Pr_T}\right]c\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)+Q_{vol}J_{vol}+Q_{CO}J_{CO}-\frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i}+\Theta. \quad (8)$$

6. The equation of state

$$\rho=\frac{p}{R_0T\left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}}+\frac{C_{N_2}}{M_{N_2}}+\frac{C_{vol}}{M_{vol}}+\frac{C_{CO}}{M_{CO}}+\frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}}+\frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}}\right]}, \quad (9)$$

where U_i — components of the velocity vector of gas; T,p — the temperature and pressure of the gas; ρ,α — reduced density and volume fraction of gas; $J_{evap},J_{vap},J_{char}$ — the rate of evaporation of the volatiles and combustion of coke oven sludge; μ,μ_t — molecular and turbulent viscosity of gas; F_j,Θ — components of the force and heat exchange of interfacial interaction; $J_{vol},J_{CO},Q_{vol},Q_{CO}$ — the intensity and the thermal effect of gas-phase combustion of volatiles and carbon monoxide.

The second is the disperse phase. It describes the movements of particles. According to the Lagrangian approach, the entire spectrum of CWF particles can be divided into different fractions, the nature of which motion is determined by a single marker particle and transferred to all such fraction particles. The nature of the particle motion is described by the following equations:

1. Equations of motion of a particle of the 1-st group

$$\frac{dU_j^i}{dt}=\gamma_i\left(U_j-U_j^i\right)+g_j, \quad (10)$$

where $j=1,2,3$, $\gamma_i=\frac{3c_{D_i}\left|\vec{W}-\vec{W}^i\right|\rho}{4d_i\rho_p\alpha_g}$ and $c_{D_i}=\begin{cases}\frac{24}{\mathrm{Re}_i}\left(1+0.15\mathrm{Re}_i^{0.687}\right) & \mathrm{Re}_i\le 1000\\ 0.44 & \mathrm{Re}_i>1000\end{cases}$;

$$\mathrm{Re}_i=\frac{\rho\left|\vec{W}-\vec{W}^i\right|d_i}{\mu}, \quad (11)$$

U_j^i — components of the velocity of particles; ρ_p — density of particles; d_i — diameter of particles of i-groups.

2. Equations of heat and mass transfer and combustion particles

$$\frac{dm_i}{dt}=-\dot{M}_i^{evap}-\dot{M}_i^{vap}-\dot{M}_i^{char}; \quad (12)$$

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = Q_{char}\dot{M}_i^{char} + \pi d_i^2 \left[\alpha_{conv}\left(T - T_i\right) + \varepsilon_p \left(H - 4\sigma T_i^4\right)\right] - Q_{vap}\dot{M}_i^{vap} - L_{vap}\dot{M}_i^{evap}, \quad (13)$$

where m_i — mass of a single particle; c_p — heat capacity of a particle; Q_{char} — calorific value of coke; Q_{vap} — the heat required for the release of volatile; L_{vap} — latent heat of vaporization; ε_p — the degree of blackness of the particles; α_{conv} — the coefficient of convective heat transfer of a single particle.

Mass rate of vaporization of the drop: $\dot{M}_i^{evap} = \pi d_i^2 k_c \left[\left(\rho C_{H_2O}\right)_{surf} - \left(\rho C_{H_2O}\right)\right]$, where $k_c = \frac{D_{H_2O}}{d_i}\left(2 + 0.6\,\mathrm{Re}_1^{0.5}\,Sc^{0.33}\right)$ — mass transfer coefficient; D_{H_2O} — the diffusion coefficient of vapor, $\left(\rho C_{H_2O}\right)_{surf}$ — density and concentration of vapor on the surface of a drop or particle.

The mass rate of flow of volatiles (Law of Arrhenius): $\dot{M}_i^{vap} = k_{vap}\exp\left(-E_{vap}/R_0 T_i\right)\cdot f_{vo}\cdot m_{oi}$, where m_{oi} — the initial mass of dry particle; f_{vo} — mass fraction of volatiles in dry coal; E_{vap} — energy of activation.

The burning rate of the coke residue is described by the following equation:

$$\dot{M}_i^{char} = \pi d_{pi}^2 \rho C_{O_2} \frac{K_k K_D}{K_k + K_D}; \quad (14)$$

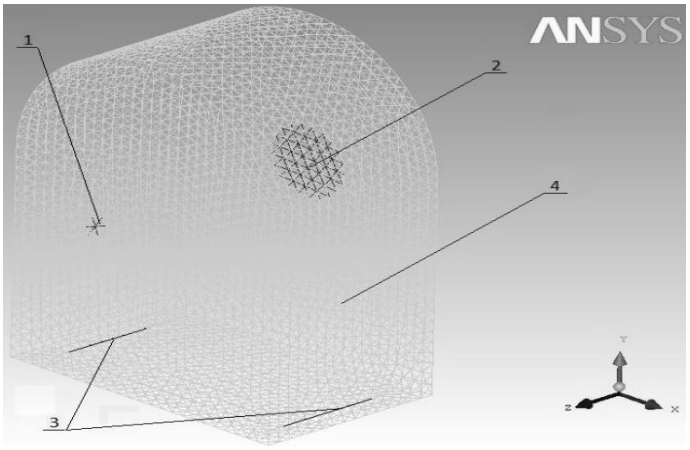
$$K_k = k_{char}\exp\left(-E_{char}/R_0 T_i\right), \quad (15)$$

where K_D is described by the following dependency

$$K_D = \frac{D_{O_2}}{dp_i}\left(2.0 + 0.16\,\mathrm{Re}_i^{0.667}\right). \quad (16)$$

And the final phase is the effect of the dispersed phase on the gas phase. The control volume method is used to account for the influence of particles on the gas phase. To do this, the entire computational domain is divided into a finite number of elements within which the values of the desired functions can be considered homogeneous. And for each such element the proper values are calculated $J_{evap}, J_{vap}, J_{char}, F_j, \Theta$.

To calculate the parameters of the CWF in the ANSYS Fluent package complex, the first step is to build a vortex furnace model by means of CAD programs. Then, using the Gambit package, which is a Fluent preprocessor, a finite difference grid is constructed based on the resulting model (Fig. 1). This model includes: nozzle (1), outlet (2), lower blast system (3), boiler furnace (4). The finite-difference grid is constructed on the basis of tetrahedral elements with uniform distribution throughout the volume, the number of which is equal to 300000 cells.



1 — nozzle; *2* — outlet; *3* — lower blast system; *4* — boiler furnace

Figure 1. Finite difference grid

In ANSYS Fluent, a three-dimensional formulation of the problem is given and the Navier-Stokes and Reynolds-averaged energy equations are solved [3–5]. To account for turbulence, a two-parameter model «k–ε» is chosen. The equations are solved taking into account the implicit scheme of the 2nd order of accuracy in space for the convective terms of the equations. Thermo-physical properties of air are calculated by polynomial dependence on temperature. For modeling the combustion of pulverized coal-water fuel, using the model of breakup of eddies (Eddy-Dissipation Model) and the parameters of injection of drops in the furnace was set using «Discrete Phase Model».

To initialize the numerical simulation, the following parameters were specified:

1) Source data — heat output of the furnace — 0.3 Gcal/h; the flow rate of the CWF through the atomizer — 200–300 kg/h; mass fraction of solid phase — 42–58 %; ash content of coal in CWF — 7 %; the particle size– 0–100 μm; velocity of the fuel particles is 30–60 m/s; air pressure — 0.2–0.5 MPa; the pressure of combustion air — 0.001–0.002 MPa; the excess air ratio is 1.1 to 1.4.

2) Boundary conditions on the air supply through the nozzle: velocity of gas — 50 m/s; temperature — 300 K; turbulent energy — 0.1 k; energy dissipation rate — 0.1 E.

3) Boundary conditions for the supply of air through the lower blast system-hole width — 3mm; gas velocity — 30 m/s; temperature — 300 K; turbulent energy — 0.1 K; energy dissipation rate — 0.1 E.

In the course of numerical simulation, the distribution field patterns of velocity vectors were obtained (Fig. 2).

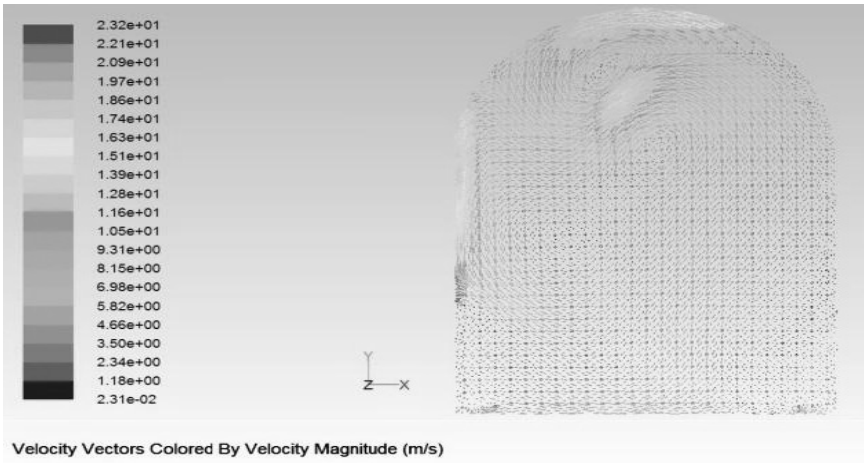


Figure 2. Distribution field of velocity vector

In Figure 2 it is seen that in the upper region of the furnace and on the left border of the nozzle are formed areas of high speeds. It can also be observed that when the fuel is fed through the nozzle, it is picked up by the air flow coming through the lower ducting system, and twists, as a result of which the speed increases to reach the upper boundary of the furnace.

Figure 3 shows the dependence of the particle residence time in the combustion chamber of the furnace on its diameter. It can be seen that the larger the diameter, the longer the particles will burn, also from the previous figures it can be concluded that the particles entering the combustion chamber will move along a spiral trajectory.

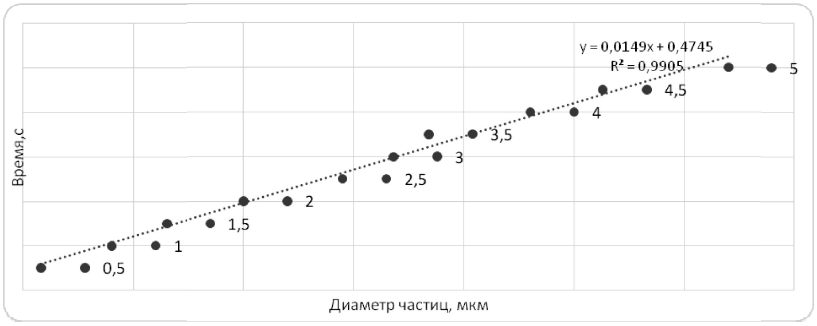


Figure 3. The residence time of the droplets of particles in the boiler furnace

The data of the numerical experiment are well approximated by the linear dependence: $t = 0.0149d + 0.4745$.

Due to the device of the vortex furnace, it helps to increase the retention time of burning particles in the furnace space, which has a beneficial effect on the reduction of ash residue and volatiles. When conducting a thorough analysis of the temperature regime of the furnace, we realized that the optimal combustion temperature of CWF is 700–1200 ºC.

We observed that after prolonged fuel flow in the vortex furnace, the temperature levels off and reach 1143 °C, which provides isothermality, the stability of combustion andsmall under burning of fuel.

This work was financially supported by the RFBR project Mol_nr 19–38–50058.

References

1 Кусаиынов К. Экспериментальный стенд для сжигания водоугольного топлива, полученного из шламов шубаркольских углей / К. Кусаиынов, А.Ж. Сатыбалдин, Н.К. Танашева, Г.К. Алпысова, А.Ж. Тлеубергенова // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2014. — № 3(75). — С. 57–62.

2 Мурко В.И. Водоугольное топливо / В.И. Мурко // Уголь. — 2002. — № 6. — С. 58, 59.

3 Кусаиынов К. Моделирование процесса распыления водоугольного топлива, полученного из шламов шубаркольского угля / К. Кусаиынов, Н.К. Танашева, А.Ж. Тлеубергенова, А.В. Рожкова, С.Е. Сулейменова // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2015. — № 1(77). — С. 71–74.

4 Frankel N.A. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres / N.A. Frankel, A. Acrivos // Chem. Eng. Sci. 1967. — Vol. 22. — P. 847–853.

5 Patel P.D. A mean field theory for the rheology of phase separated or flocculated dispersions / P.D. Patel, W.B. Russel // Colloids i surf. — 1988. — Vol. 31. — P. 355–383.

Н.К. Танашева, Л.Л. Миньков, А.Ж. Тлеубергенова, К.К. Саденова

Математикалық модельдеу негізінде сулы-көмірлі отынның жағу технологиясын есептеу

Математикалық модельдеу негізінде сулы-көмірлі отынды (СКО) жағу технологиясын есептеу ұсынылған. Сулы-көмірлі отынның жану үдерісін сандық модельдеу ANSYS Fluent бағдарламалар пакетінде жүргізілді. Ол көп компонентті ортада массаны, энергияны және импульсті сақтау заңдарына және Навье-Стокс теңдеулерін шешуге, жылудың үзілмеуіне және тасымалдануына негізделген. СКО жану сипаттамасының математикалық моделі үш фазадан тұрады. Шашыраңқы сулы-көмірлі отынның жануын модельдеу үшін құйынның ыдырау моделі (Eddy-Dissipation Model) пайдаланылды, ал оттыққа тамшы инжекциясының параметрлері «Discrete Phase Model» функциясын пайдалану арқылы қойылды. ANSYS Fluent-те есептің үш өлшемді тұжырымын анықтайды және Навье-Стокс теңдеулері және Рейнольдс бойынша орташаланған энергия шешіледі. Турбуленттілікті есепке алу үшін екі параметрлік «k-ε» үлгісі таңдалды. Сандық модельдеу барысында жылдамдық векторларын бөлу өрісінің суреттері алынды. Оттықтың температуралық режиміне мұқият талдау жүргізу кезінде СКО жануының оңтайлы температурасы 700–1200 ºС екенін дәлелденді. Сонымен қатар оттықты жағу камерасындағы бөлшектердің болу уақытының оның диаметріне тәуелділігі алынды.

Кілт сөздер: сулы-көмірлі отын, сандық модельдеу, ANSYS Fluent бағдарламасы, Навье-Стокс теңдеулері, жану процесі.

Н.К. Танашева, Л.Л. Миньков, А.Ж. Тлеубергенова, К.К. Саденова

Расчет технологии сжигания водоугольного топлива на основе математического моделирования

Представлен расчет технологии сжигания водоугольного топлива (ВУТ) на основе математического моделирования. Численное моделирование процесса сжигания водоугольного топлива проводилось в пакете программ ANSYS Fluent. Оно основано на законах сохранения массы, энергии и импульса в многокомпонентной среде и решения уравнений Навье-Стокса, неразрывности и переноса тепла. Математическая модель описания горения ВУТ состоит из трех фаз. Для моделирования горения распыленного водоугольного топлива использовалась модель распада вихрей (Eddy-DissipationModel), а па-

раметры инжекции капель в топку задавались с использованием функции «DiscretePhaseModel». В ANSYS Fluent задается трехмерная постановка задачи и решаются уравнения Навье-Стокса и энергии, осредненные по Рейнольдсу. Для учета турбулентности выбирается двухпараметрическая модель «k-ε». В ходе численного моделирования были получены картины поля распределения векторов скорости. При проведении тщательного анализа температурного режима топки доказано, что оптимальная температура сжигания ВУТ составляет 700–1200 ºС. Кроме того, получена зависимость времени пребывания частицы в камере сжигания топки от ее диаметра.

Ключевые слова: водоугольное топливо, численное моделирование, программа ANSYS Fluent, уравнения Навье-Стокса, процесс горения.

References

1 Kusaiynov, K., Satybaldin, A.Zh., Tanasheva, N.K., Alpysova, G.K., & Tleubergenova, A.Zh. (2014). Eksperimentalnyi stend dlia szhihaniia vodouholnoho topliva, poluchennoho iz shlamov shubarkulskikh uhley [Experimental stand for burning water-coal fuel obtained from Shubarkul coal sludge]. *Vestnik Karahandinskoho universiteta. Seriia Fizika — Bulletin of the Karaganda University. Physics Series, 3, 75,* 57–62 [in Russian].

2 Murko, V.I. (2002). Vodouholnoe toplivo [Water-Coal fuel]. *Uhol — Coal, 6,* 58–59 [in Russian].

3 Kusaiynov, K., Tanasheva, N.K., Tleubergenova, A. Zh., Rozhkova, A.V., & Suleimenova, S.E. (2015). Modelirovaniie protsessa raspyleniia vodouholnoho topliva, poluchennoho iz shlamov shubarkulskoho uhlia [Modeling of sputtering process of water-coal fuel obtained from Shubarkul coal sludge]. *Vestnik Karahandinskoho universiteta. Seriia Fizika — Bulletin of the Karaganda University. Physics Series, 1, 77,* 71–74 [in Russian].

4 Frankel, N.A., & Acrivos, A. (1967). On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. *Chem. Eng. Sci., 22,* 847–853.

5 Patel, P.D., & Russel, W.B. (1988). A mean field theory for the rheology of phase separated or flocculated dispersions. *Colloids i surf., 31,* 355–383.

DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79

UDC 004.942:656.61.052:629.123

S. Zinchenko[1], P. Nosov[1], V. Mateichuk[1], P. Mamenko[1], I. Popovych[2], O. Grosheva[1]

[1]Kherson State Maritime Academy, Ukraine;
[2]Kherson State University, Ukraine
(E-mail: srz56@ukr.net)

Automatic collision avoidance system with many targets, including maneuvering ones

The article considers the issues of automatic collision avoidance with many targets, including maneuvering ones, which is especially important when navigating a vessel in narrownesses. Was made a brief review of literature devoted to the problem of collision avoidance and conclusion was drown on the relevance of developing such systems. There were developed mathematical and algorithmic support of the combined collision avoidance with many targets, including maneuvering ones. Based on the synthesized algorithms, there was developed software in the MATLAB environment for a simulator of an onboard controller of a ship control system, the operability and efficiency of mathematical, algorithmic and software was tested in a closed circuit with a Navi Trainer 5000 navigation simulator for various types of ships, navigation areas and weather conditions. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method and algorithms and allow to recommend them for practical use in the development of modules for automatic collision avoidance with many targets, including maneuvering ones, an onboard controller of the ship's control system.

Keywords: collision avoidance system, automatic collision avoidance, collision avoidance with many targets, collision avoidance with maneuvering targets, collision avoidance in narrowness, collision avoidance control systems.

Introduction

The main international legal document regulating the safety of navigation today is the rules COLREGS [1], adopted in 1972 and put into operation since 1977. For 47 years, they are significantly outdated and require the speediest revision. Thus, the COLREG provide collision avoidance only two vessels (while the radar-tracking equipment (ARPA) installed on the vessels allows capturing and tracking up to 40 targets at a time), are verbal (and therefore are sometimes interpreted differently by boatmasters), are recommended character and don't always give a definite answer to avoid collision in a particular situation. The COLREG are human-oriented and don't fit into the concept of automation of control processes, they are a braking factor for the development of automatic systems.

At the same time, over the past 10–20 years, the intensity of shipping and the speed of ships has significantly increased, and with them the flow of information has increased. It becomes increasingly difficult for boatmasters to find the right management decisions, especially in critical situations (when operating in narrow spaces), which is the reason for the increasing number of accidents in maritime transport. Accident statistics in global shipping indicate that 75 % of all accidents occur due to the human factor.

Therefore, according to experts, a significant reduction in accidents can be achieved only by reducing human intervention in management, namely through the creation of decision support systems (DSS) and automatic control systems (ACS). DSS control the operation of individual navigation modules and, in the event

that the operating parameters of the modules exceed the permissible limits, give warning messages or may even give «advice» on the management of the vessel. The boatmaster should comprehend the information received before making a decision, which also takes time [2–5].

In this regard, automatic control systems for the movement of the vessel deserve special attention when the human factor is completely excluded from the control loop. In this case, the skipper only makes a decision to activate the automatic control mode and monitors its implementation from the side. Currently, many ships have autopilots that implement two automatic control modes — automatic course maintenance and/or trajectory. The decision to activate these modes is made by the skipper, however, the vessel is further controlled without his participation. According to the authors of the article, such an approach to the construction of control systems is the most rational, as it allows the skipper to be freed from routine operations to control the vessel, while at the same time leaving him overall control over the development of the situation. A special place is occupied by the tasks of escorting the vessel in narrow places, where there is a large traffic flow and the constant maneuvering of ships — targets.

The object of the research in the article is the process of automatic collision avoidance with many vessels — targets, including maneuvering ones.

The subject of the study is the methods and algorithms implemented in the software of the onboard controller of the control system, and allowing to diverge from many targets, including maneuvering ones.

The purpose of the Article is the development of methods and algorithms for automatic collision avoidance with many vessels — targets, including maneuvering ones, for the collision avoidancemodule of the onboard controller of the ship control system.

Problem statement

A mathematical model of a controlled object (own ship) is set in the form of a system of nonlinear differential equations

$$\frac{d\mathbf{X}_n}{dt} = \mathbf{f}_n(\mathbf{X}_n, \mathbf{W}, \mathbf{U}, \theta, \delta);$$
$$\mathbf{X}_n = (\mathbf{V}_n, \omega_n, \Psi_n, X_n, Y_n),$$

model of external disturbances from the wind $\mathbf{W} = \mathbf{f}_w(\mathbf{t})$ and currents $\mathbf{U} = \mathbf{f}_u(\mathbf{t})$. In the measured data of the ship's linear speed $\mathbf{V}_m$, angular rotation speed ω_m, yaw angle Ψ_m, bearings P_{mj} and distances D_{mj} to targets, measurement errors are taken into account according to the passport data of each sensor. The mathematical model of targets is defined as a system of nonlinear algebraic equations $\mathbf{f}_{tgj}(X_{tgj}, Y_{tgj}, V_{tgj}, K_{tgj})$, $j = 1, 2, ..., N_{tg}$ that determine the parameters of the movement of targets along the trajectory (speed and course), as well as the breakpoints of the trajectory to simulate maneuvers of targets.

It is required, for given initial conditions (the initial state vector of the vessel $\mathbf{X}_n(0)$, the initial state vector of the targets $\mathbf{X}_{tgj}(0), j = 1, 2, ..., N_{tg}$, routes, parameters of the movement of targets along the routes), external disturbances, measurement errors of the motion parameters, to determine such telegraph θ and rudder δ controls that would allow to diverge with all the targets, including maneuvering ones, at a safe distance

$$(X_n - X_{tgj})^2 + (Y_n - Y_{tgj})^2 >= D_{s.a}{}^2, j = 1, 2, ..., N_{tg}.$$

Literature review

The issues of automatic collision avoidance were considered in many works of domestic and foreign authors. So, in [6], there was proposed a method for forming an area of unacceptable values for the course of one of the vessels and the speed of another vessel, taking into account its inertial characteristics with external control of the process of their collision avoidance. Depending on the parameters of the situation of dangerous approach and the braking mode of the vessel, there were obtained analytical expressions for calculating the boundaries of the area of unacceptable course values and speed of approaching ships. The method is based on an analytical description of unacceptable course values, which limits its ability to diverge from only one non-maneuvering vessel.

The article [7] describes a control system with deep Q-learning. The advantage of the system is the possibility of optimization based on information about the interaction with the environment. The disadvantages of the system are the need to organize the storage of information in the database, its quick search and retriev-

al, maintenance of the database. In addition, any training of the control system, including Q-training, is simply unacceptable in extreme situations, for example, when managing in narrow places, since during training the system may not work optimally or incorrectly, which is fraught with serious consequences.

The article [8] describes a path planning method taking into account the dynamic characteristics of the control object and COLREGS rules to prevent possible collisions. The method takes into account the uncertainty of the trajectory over time. Collision risk is calculated using the probabilistic method, and the collision risk area is adjusted based on the predicted trajectory. Simulation results are presented that demonstrate the feasibility of the proposed method. The proposed method allows you to assess the risk of a collision with only one non-maneuvering targets, since the rules of COLREGS don't consider other situations, does not form controls to prevent collisions in the automatic mode, and can only be used in automated decision support systems.

The article [9] describes the use of AIS for tracking the movement of targets through the electronic exchange of navigation data between ships with airborne transceivers, ground and/or satellite base stations. The collected data contains a large amount of information useful for maritime safety and is used to detect target maneuvers, route estimation, collision forecasting. The use of AIS data provides great opportunities for preventing collisions due to more accurate information about the parameters of their movement, however, this method cannot be used on ships that are not equipped with AIS transponders or vessels that hide information about the parameters of their movement.

As a result of the analysis, the authors of [10] came to the conclusion that collision avoidance algorithms developed over the past decades allow diverging from only one or two non-maneuvering targets, using the simplified dynamics of the ship and targets. The collision avoidance algorithms proposed by the authors of the article make it possible to visualize dangerous heading and speed of the vessel, which can lead to a collision. The system may also offer optimal solutions for discrepancies in accordance with the rules of COLREGS. However, the described system belongs to DSS and cannot solve the problems of collision avoidance in the automatic mode.

In [11] there was proposed a collision avoidance method using predictive models. Mathematical modeling in the on-board controller allows predicting the trajectory of the ship and the target using the currently measured parameters of the ship and the calculated parameters of the target. This forecast, taking into account the rules of COLREG, is used to determine the optimal control strategy for the collision avoidance. The disadvantage of this method is the difficulty in realizing multiple forecasts in the on-board controller of the vessel in real time, as well as the inability to diverge from several targets.

In [12, 13] the authors proposed a method of collision avoidance with many vessels — targets, including maneuvering ones. The method involves measuring, with the processing of information in the on-board controller, the true speed of the vessel and the relative speeds of the vessel and the targets, estimating the true speeds of the targets, building the area of acceptable controls for the collision avoidance with all targets, choosing the optimal parameters of the collision avoidance from the constructed area, forming controls for implementing selected options. The disadvantage of this method is the computational cost of constructing area of acceptable controls.

Material and method

Figure 1 shows a diagram of collision avoidance with two vessels. The results obtained are also valid for discrepancies with a large number of vessels. The vessel (control object) is located at point O. Around the vessel, an area of safe collision avoidance is drawn. When manually operated, the recommended area of safe collision avoidance in open waters should be at least 2 nautical miles (nm), and in cramped waters at least 0.7 nm.

The recommendations cited took into account the human factor, namely the delays associated with assessing the situation and making a decision by the skipper. With automatic control, the area of safe collision avoidance can be reduced. Thus, the standard deviation of the radar measurement, according to IMO requirements, should not exceed 1 % of the measured distance, i.e. for a measurement range of 10 nm, the standard deviation will be 0.1 nm, or, with a probability of 99.7 %, $3\sigma = 0.3$ nm. Therefore, $D_{s.a} = 0.3$ nm is sufficient for safe automatic collision avoidance.

The smaller size of the area allows to reduce the distance of departure from the original course in case of collision avoidance, reduce time and fuel consumption. Figure 1 also shows the measured vector of the true speed of the vessel $\mathbf{V}_m$ and the circle of maneuvering capabilities outlined by this vector. The positions

of the target echoes j = 1,2 are plotted on the measurement steps $n-2, n-1, n$ through which the line of relative motion RML_j is drawn.

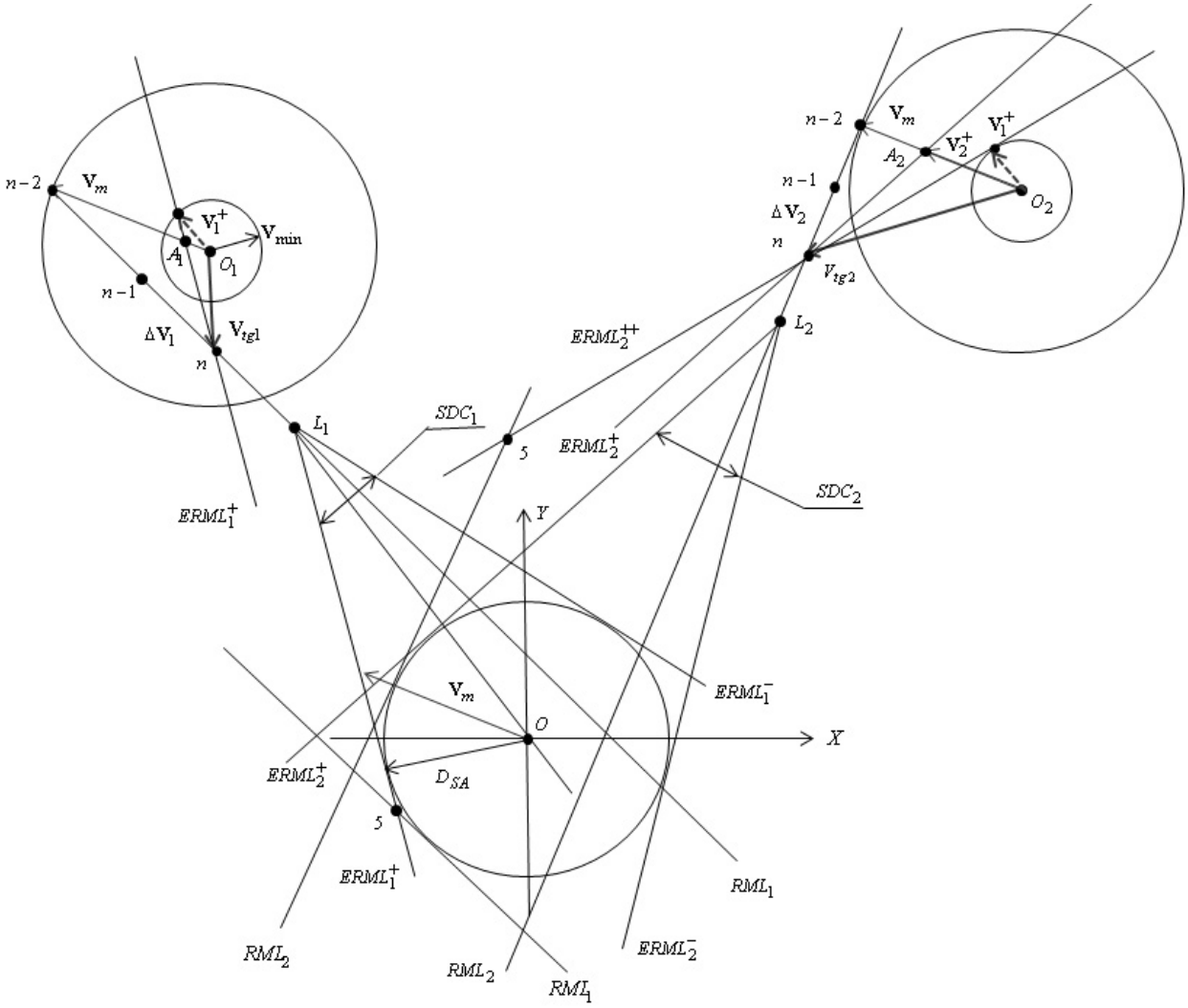


Figure 1. Diagram of collision avoidance with two vessels

The lead point L_j is moved forward along RML_j for a time sufficient to change the motion parameters of the vessel, taking into account its inertial characteristics. From the point L_j, the expected relative motion lines $ERML_j^+, ERML_j^-$ are drawn, tangent to the area of safe collision avoidance. Sector of dangerous courses SDC_j — the angle between $ERML_j^+, ERML_j^-$. When the relative speed vector $\mathbf{\Delta V}_j$ enters in sector of dangerous courses, the target echo will necessarily cross the area of safe collision avoidance. $ERML_j^+, ERML_j^-$ are the lines of optimal collision avoidance, since the movement of the target echo along given trajectories satisfies both the conditions of safe collision avoidance and the conditions of minimal flipping from the original trajectory. $ERML_j^+$ corresponds to collision avoidance by turning to the right, and $ERML_j^-$ corresponds to collision avoidance by turning to the left. Since the variants of the collision avoidance along $ERML_j^+$ and $ERML_j^-$ are constructed in a similar way, we will further consider the construction of only one of them, for example, the variant of the collision avoidance by $ERML_j^+$. Figure 1 shows the speed triangles $\mathbf{V}_m + \mathbf{\Delta V}_j = \mathbf{V}_{tgj}$, where $\mathbf{V}_{tgj}$ is the instantaneous speed vector of the j-target, estimated from the results of radar observations. These speed triangles correspond to the positions of the vectors before maneuvering. To

direct the vector of the relative speed of collision avoidance along $ERML_j^+$ it is necessary to reduce the vessel's speed vector to a point A_j. In this case, the collision avoidance will be provided only by changing the speed, without changing the course, this maneuver is most applicable in narrownesses and is optimal in terms of fuel consumption. However, the collision avoidance speed cannot be less than the minimum $V_{\min}$, at which controllability is still maintained. In Figure 1, the collision avoidance vector for the first target turned out to be less than the minimum speed. Therefore, it is not always possible to conduct a clean speed maneuver. In this case, the collision avoidance speed vector must be turned to the point of intersection the line $ERML_j^+$, drawn through the point n, with the circle $V_{\min}$. The resulting speed vector will correspond to a combined maneuver of course and speed with a minimum turn from the original course.

Define the positions of the target echoes in the Cartesian coordinate system for measurement n.

$$X_{mj}(n) = D_{mj}(n)\sin P_{mj}(n);$$

$$Y_{mj}(n) = D_{mj}(n)\cos P_{mj}(n), j = 1..N_{tg}.$$

Using a series of consecutive measurements $n, n-1, n-2, \ldots$, using the least squares method, find the equations of the line of relative motion RML_j

$$Y = k_j^{RML} X + b_j^{RML}, j = 1..N_{tg}.$$

In order to remove noise, for the last two measurements $X_{mj}(n), X_{mj}(n-1)$, specify the coordinates $Y_{mj}(n), Y_{mj}(n-1)$ using the obtained equation RML_j

$$Y_{mj}(n) = k_j^{RML} X_{mj}(n) + b_j^{RML};$$

$$Y_{mj}(n-1) = k_j^{RML} X_{mj}(n-1) + b_j^{RML}, j = 1..N_{tg}.$$

We estimate the vector of relative vessel speeds and targets using RML_j

$$\mathbf{\Delta V}_j = (\Delta V_{xj}, \Delta V_{yj});$$

$$\Delta V_{xj} = \frac{X_{mj}(n) - X_{mj}(n-1)}{\Delta T};$$

$$\Delta V_{yj} = \frac{Y_{mj}(n) - Y_{mj}(n-1)}{\Delta T}, j = 1..N_{tg},$$

where ΔT is the radar update tact.

Determine the lead point L_j at a distance ΔT from the last measurement n.

$$\mathbf{L}_j = \mathbf{X}_j(n) + \Delta\mathbf{V}_j \Delta T.$$

Determine the unit vectors defining the basic directions from p. $\mathbf{L}_j$:

– ort $\mathbf{E}_{0j}$ is the direction to the vessel (to the p. O);

– ort $\mathbf{E}_j$ is the direction along RML_j;

– ort $\mathbf{E}_j^+$ is the direction along $ERML_j^+$;

– ort $\mathbf{E}_j^-$ is the direction along $ERML_j^-$.

$$\mathbf{E}_{0j} = \left(\frac{L_{xj}}{|\mathbf{L}_j|}, \frac{L_{yj}}{|\mathbf{L}_j|}\right), \mathbf{E}_j = \left(\frac{\Delta V_{xj}}{|\mathbf{\Delta V}_j|}, \frac{\Delta V_{yj}}{|\mathbf{\Delta V}_j|}\right);$$

$$\mathbf{E}_j^+ = \mathbf{E}_{0j} e^{i\Theta_j}, \mathbf{E}_j^- = \mathbf{E}_{0j} e^{-i\Theta_j}, \Theta_j = \frac{SDC_j}{2} = \arcsin\left(\frac{D_{SA}}{|\mathbf{L}_j|}\right).$$

Determine the vector of the collision avoidance speed by $ERML_j^+$.

$$|\mathbf{V}_j^+| \mathbf{E}_{mj}^+ = \mathbf{V}_{tgj} - |\mathbf{\Delta V}_j^+| \mathbf{E}_j^+, \quad (1)$$

where $\left|\mathbf{V}_j^+\right|$ is the modulus of the collision avoidance speed vector; $\mathbf{E}_{mj}^+ = (\sin K_{mj}^+, \cos K_{mj}^+)$ is the unit vector of collision avoidance speed; K_{mj}^+ is collision avoidance course; $\left|\mathbf{\Delta V}_j^+\right|$ is module of the relative speed vector.

The modulus of the relative speed vector $\left|\mathbf{\Delta V}_j^+\right|$ is determined by the solution of the vector equation (1)

$$\left|\mathbf{\Delta V}_j^+\right| = \langle \mathbf{V}_{tgj}, \mathbf{E}_j^+ \rangle \underset{-}{+} \sqrt{\langle \mathbf{V}_{tgj}, \mathbf{E}_j^+ \rangle^2 + \left|V_j^+\right|^2 - V_{tgj}{}^2} \,. \tag{2}$$

Equation (2) can have one solution when the radical expression is zero, two solutions when the radical expression is greater than zero and have no solutions when the radical expression is less than zero. In Figure 1, $ERML_2^-$ drawn through p. n, doesn't intersect the circle of maneuvering capabilities and the vector equation (2) in the case of collision avoidance along the line $ERML_2^-$ has no solutions. First of all, we are interested in one solution of equation (2), which corresponds to a maneuver of speed. Equating the radical expression to zero, we determine the modulus of collision avoidance speed $\left|V_j^+\right|$. If $\left|V_j^+\right| < V_{\min}$, where $V_{\min}$ is the minimum speed at which the ship maintains controllability, then we solve equation (2) again for $\left|V_j^+\right| = V_{\min}$. Find the collision avoidance speed vector $\mathbf{V}_j^+ = \mathbf{V}_{tgj} - \mathbf{\Delta V}_j^+$.

Among the vectors $\mathbf{V}_j^+, j = 1..N_{tg}$ we find the limiting collision avoidance speed vector having the largest deviation in angle from the initial speed vector $\mathbf{V}_m$

$$\langle \mathbf{V}_m, \mathbf{V}^+ \rangle = \min_{j=1..Ntg} \langle \mathbf{V}_m, \mathbf{V}_j^+ \rangle ,$$

where $\langle\ \rangle$ — scalar multiplication; $\mathbf{V}^+ = V^+(\cos K^+, \sin K^+)$ — the limiting vector of the collision avoidance speed.

In Figure 1 it will be a vector $\mathbf{V}_1^+$. Similarly, determine the limiting vector of the collision avoidance speed when turning to the left $\mathbf{V}^- = V^-(\cos K^-, \sin K^-)$. Of the two limiting vectors, choose the smaller one by the angle of the turn $\mathbf{V}^* = \max(<\mathbf{V}_m, \mathbf{V}^+>, <\mathbf{V}_m, \mathbf{V}^->)$.

The collision avoidance speed vector $\mathbf{V}^* = V^*(\cos K^*, \sin K^*)$ is implemented by the PID controller

$$\delta = k_\Psi (K_m - K^*) + k_\omega \omega_{mz} + k_\int \int (K_m - K^*) dt \,;$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \frac{V^*}{V_{\max}} ,$$

where k_Ψ, k_ω, $k_\int$ are the gains of the PID controller for the mismatch angle, the angular velocity and the integral of the mismatch angle; K_m, ω_{mz} — measured course and angular velocity of rotation of the vessel.

Experiments

The operability of the collision avoidance algorithm was tested on the navigation simulator of the Kherson State Maritime Academy [14–17]. The block diagram of the simulator is shown in Figure 2. In the computer network of the simulator, additional system units 14–16 were connected, with which information exchange was organized. Blocks 14–16 contain control system modules, which provide collision avoidance according to the above algorithm. A task was created in the Navi Trainer Instructor program of the Instructor's workplace (block 6 of the structural diagram of the simulator), a screenshot is shown in Figure 3.

As you can see from the screenshot above, at the time of the beginning of the collision avoidance, our SS1 vessel is surrounded by dangerous targets that also maneuver (the trajectories of the targets have kinks). Vessel and targets trends are also shown.

Figure 4 shows a screenshot of the radar at the time the collision avoidance began.

Figure 5 shows a screenshot of the Navi Trainer Instructor after 10 minutes of collision avoidance.

Figure 6 shows a screenshot of the radar after 10 minutes of collision avoidance.

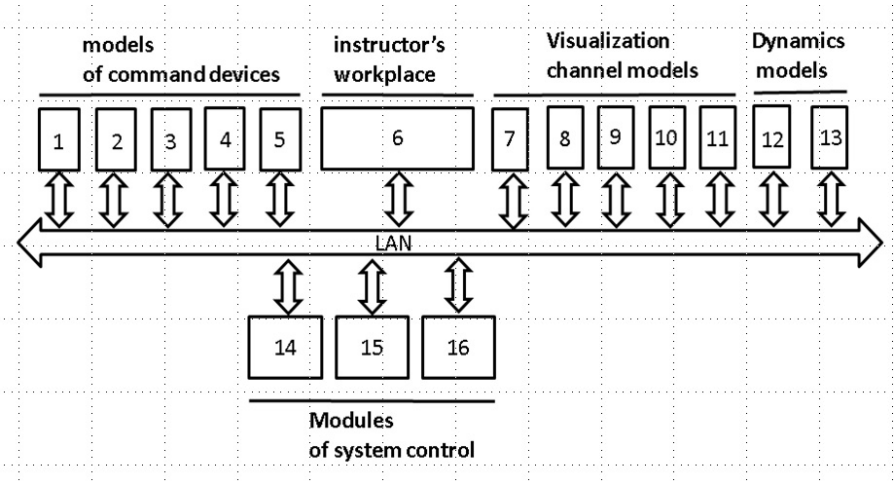


Figure 2. Block diagram of the simulator

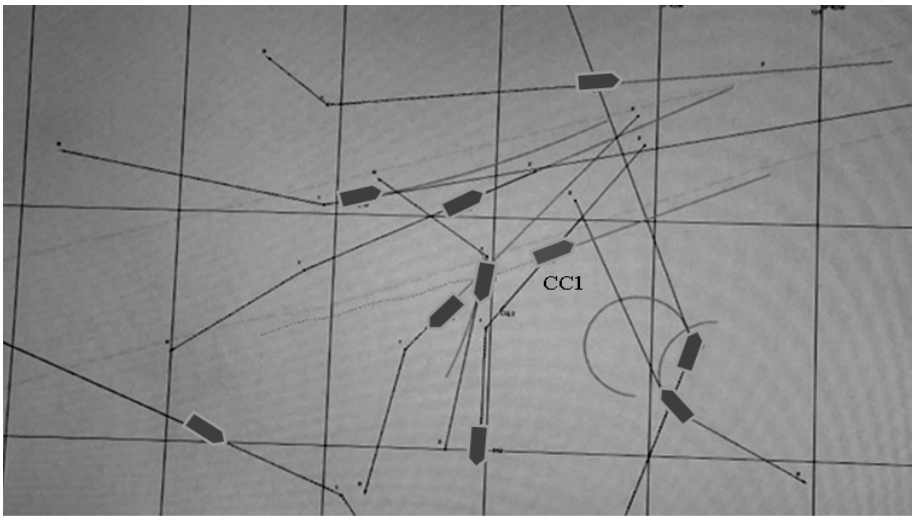


Figure 3. Screenshot of the Navi Trainer Instructor

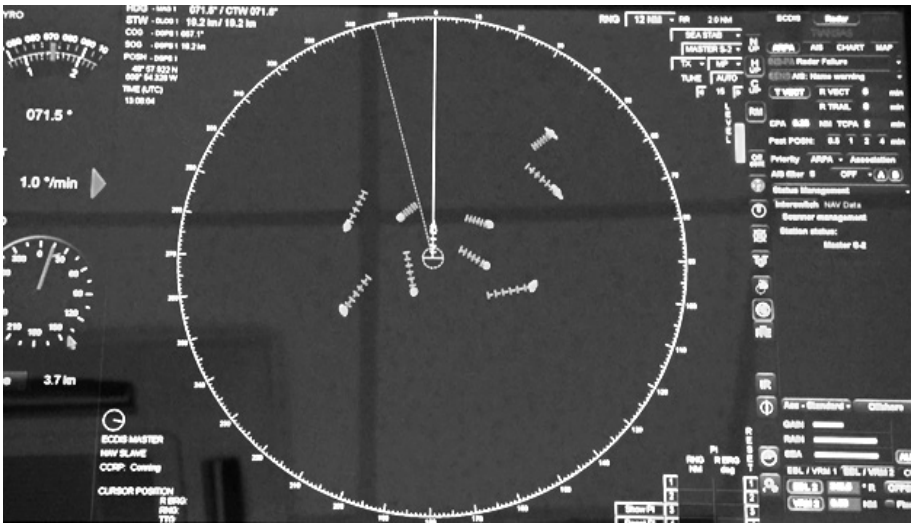


Figure 4. A screenshot of the radar at the time the collision avoidance began

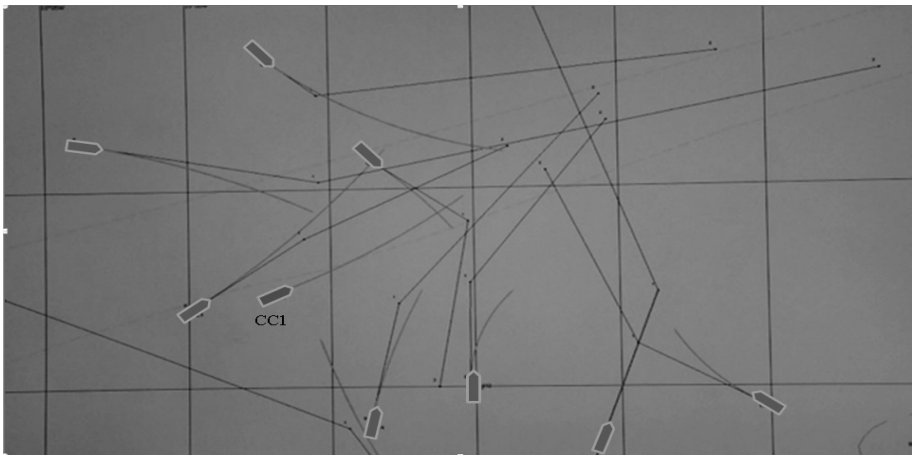


Figure 5. Screenshot of the Navi Trainer Instructor after 10 minutes of collision avoidance

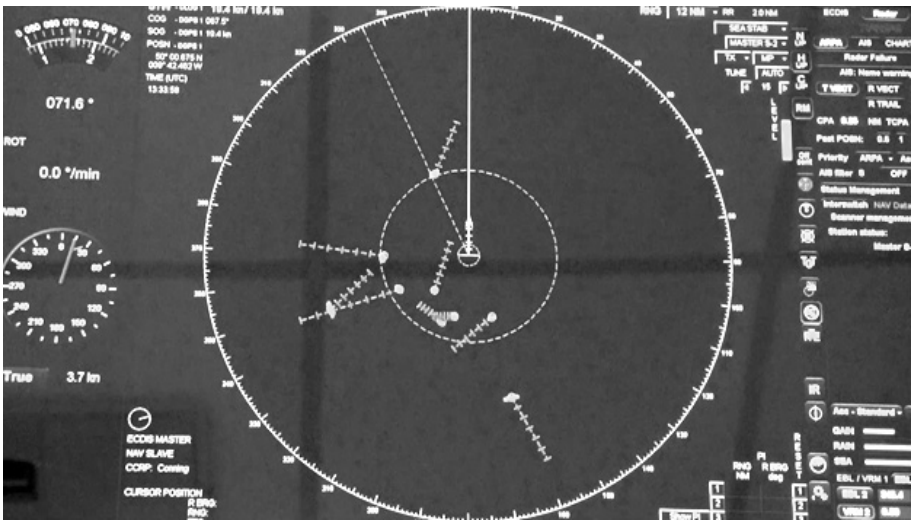


Figure 6. Screenshot of the radar after 10 minutes collision avoidance

As can be seen from the results, the control system has almost completed the collision avoidance from dangerous maneuvering targets.

Conclusions

There are proposed a method and algorithms for automatic collision avoidance with many targets, including maneuvering ones.

The scientific novelty of the results obtained is the possibility of collision avoidance with many targets, including maneuvering ones, in a fully automatic mode, which is especially useful in extreme situations, for example, when the vessel avoid collision in narrownesses. This is achieved through periodic, with the on-board controller operation, measuring the true speed of the vessel and the relative speeds of the vessel and the targets, averaging the measured information in order to remove noise, estimating the true speeds of the targets, determining for the left and right maneuvers the speed vector discrepancies for each target separately, definitions for the left and right maneuvers of the limiting collision avoidance speed vector, selection from the limiting collision avoidance vectors of the left and right maneuvers of the required collision avoidance vector using the criterion of a smaller angle of rotation, the implementation of the required vector of the collision avoidance speed in the control system.

The practical value of the obtained results lies in the fact that the developed method and algorithms are implemented in software and investigated by solving the problem of automatic collision avoidance with several targets, including maneuvering ones, in a closed loop with the Navi Trainer 5000 simulator for various types of ships, targets, navigation areas and weather conditions. The experiments confirmed the efficiency of

the proposed method and algorithms and allow to recommend them for practical use in the development of modules for automatic collision avoidance with many targets, including maneuvering ones, an onboard controller of the ship's control system.

Further research may consist in the development of methods and algorithms for processing radar information that allow to consider small and nearby objects, for example, small fishing vessels, as one impassable cluster and solve the problem of collision avoidance not with each such object, but with a whole cluster, which will significantly increase speed and reliability solutions.

Acknowledgements

The work is carried out within the framework of «Development of software for important the quality of functioning systems for dynamic position sea vessels» (state registration number 0119U100948), of navigation and ECDIS departments of Kherson State Maritime Academy Navigation Faculty (scientific adviser: Ph.D. Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, A.P. Ben).

References

1 COLREGS — International Regulations for Preventing Collisions at Sea [Electronic resource] // Lloyd's Register Rulefinder 2005 — Version 9.4. — 2009. — Access mode: http://www.jag.navy.mil/distrib/instructions/COLREG-1972.pdf

2 Shiqi Fan. Effects of seafarers emotion on human performance using bridge simulation / Shiqi Fan, Jinfen Zhang, Eduardo Blanco-Davis, Zaili Yang, Jin Wang, Xinping Yan // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 170. — P. 111–119. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018. 10.021.

3 Popovych I.S. The Structure, Variables and Interdependence of the Factors of Mental States of Expectations in Students' Academic and Professional Activities / I.S. Popovych, O.Ye. Blynova // The New Educational Review. — 2019. — Vol. 55, No. 1. — P. 293–306. doi:10.15804/tner.2019.55.1.24.

4 Nosov P.S. Modeling the manifestation of the human factor of the maritime crew / P.S. Nosov, I.V. Palamarchuk, M.S. Safonov, V.I. Novikov // Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan (Dnipro). — 2018. — No. 5(77). — P. 82–92. doi: 10.15802/stp2018/ 147937.

5 Nosov P.S. Identification of «Human error» negative manifestation in maritime transport. Radio Electronics, Computer Science, Control / P.S. Nosov, A.P. Ben, V.N. Matejchuk, M.S. Safonov // Zaporizhzhia National Technical University. — 2018. — No. 4(47). — P. 204–213. doi: 10.15588/1607-3274-2018-4-20.

6 Смоленцев С.В. Автоматический синтез решений по расхождению судов в море / С.В. Смоленцев // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. С.О. Макарова. — 2016. — № 2(36). — С. 1–10.

7 Shen H. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning / H. Shen, H. Hashimoto, A. Matsuda et al. // Applied Ocean Research Journal. — 2019. — Vol. 86. — P. 268–288. doi: 10.1016/j.apor.2019.02.020.

8 Park J. COLREGS-compliant path planning considering time-varying trajectory uncertainty of autonomous surface vehicle / J. Park, J. Choi, H. Choi // Electronics Letters. — 2019. — Vol. 55, Iss. 4. — P. 222–224. doi: 10.1049/el.2018.6680.

9 Tu E. Exploiting AIS date for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey / E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati et al. // IEEE Transactions on intelligent transportation system. — 2016. — Vol. 19, Iss. 5. — P. 99. doi: 10.1109/ TITS.2017.2724551.

10 Huang Y. Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea / Y. Huang, L. Chen, P. Gelder // Ocean Engineering Journal. — 2019. — Vol. 173. — P. 142–156. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.053.

11 Johansen T.A. Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based Model Predictive Control [Electronic resource] / T.A. Johansen, A. Cristoforo, T. Perez // IFAC, 2016. — Access mode: https://pdfs.semanticscholar.org/34a3/ c1a0b699774fadab417ca2f5ef422edb1f0b.pdf

12 Zinchenko S.M. Automatic collision avoidance with many targets, including maneuvring ones / S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, P.P. Mamenko, O.O. Grosheva // The international scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Y.Y. Fomin and V.S. Semenov. — Odessa – Istanbul, April 24–28, 2019. — P. 343–349.

13 Спосіб розходження з небезпечними цілями: пат. 129699UA Украина: МПК (1218.01) B63B4900 / Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Матейчук В.Н.; заявитель и патентообладатель Херсонская государственная. морская академия. — № u 2018 04610; заявл. 26.04.2018; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21. — 3 с.: ил.

14 Navi-Trainer Professional 5000 (version 5.35), Instructor's Guide, release date: October 2014.

15 Navi-Trainer Professional 5000 (version 5.35), Navigation bridge, release date: October, 2014.

16 Zinchenko S.M. Use of navigation simulator for development and testing ship control systems / S.M. Zinchenko, P.S. Nosov, V.M. Mateichuk, P.P. Mamenko, O.O. Grosheva // The international scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Y.Y. Fomin and V.S. Semenov. — Odessa – Stambul, April 24–28, 2019. — P. 350–355.

17 Спосіб використання тренажерного обладнання для розробки та тестування систем керування рухом суден: пат. 133709 UAУкраина: МПК (1219.01) G06F 8/35 (2018.01) G06Q 99/00 / Зинченко С.Н., Матейчук В.Н., Ляшенко В.Г., Бень А.П., Товстокорый О.Н., Грошева О.А.; заявитель и патентообладатель Херсонская государственная морская академия. — № u 2018 08851; заявл. 20.08.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8. — 3 с.: ил.

С. Зинченко, П. Носов, В. Матейчук, П. Маменко, И. Попович, О. Грошева

Көптеген мақсаттары бар автоматты айырылу жүйесін синтездеу, соның ішінде маневрлар

Мақалада басқа кемелерден айырылу кезінде кеменің қозғалысын автоматты түрде басқару мәселелері қарастырылған — нысандар, оның ішінде маневрлар, бұл кемелерді тар жолдарда навигациялау кезінде өте маңызды. Кемелердің айырылу мәселесіне арналған әдебиеттерге қысқаша шолу, осындай жүйелерді әзірлеудің өзектілігі туралы қорытынды жасалды. Кеменің бұрылу кезінде, соның ішінде маневрмен үйлескен айырмашылықты математикалық және алгоритмдік қамтамасыз ету әзірленді. Синтезделген алгоритмдердің негізінде кемені басқару жүйесінің борттық контроллерін модуляциялау үшін MATLAB жүйесін бағдарламалық қамтамасыз ету жасалды, математикалық, алгоритмдік және бағдарламалық қамтамасыз етудің жұмыс қабілеттілігі мен тиімділігі Navi Trainer 5000 навигациялық тренажеры көмегімен түрлі кемелерге, навигациялық аймақтарға және ауа-райына байланысты жабық схемада сыналды. Эксперименттер ұсынылған әдіс пен алгоритмдердің жарамдылығын растады және көптеген мақсаттарға, соның ішінде маневрлік, кемені басқару жүйесінің борттық контроллеріне арналған автоматты сәйкессіздік модулдерін жасау кезінде оларды практикалық пайдалануға ұсынуға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: соқтығысуды болдырмау, автоматты айырылу, көптеген мақсаттары бар айырылу, маневрлік мақсаттардағы айырылу, таршылықтағы айырылу, айырылуды басқару жүйелері.

С. Зинченко, П. Носов, В. Матейчук, П. Маменко, И. Попович, О. Грошева

Синтез системы автоматического расхождения со многими целями, включая маневрирующие

В статье рассмотрены вопросы автоматического управления движением судна при расхождении с другими судами — целями, включая маневрирующие, что особенно актуально при проводке судна в узкостях. Проведен краткий обзор литературных источников, посвященных проблеме расхождения судов, сделан вывод об актуальности разработки таких систем. Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение комбинированного расхождения со многими целями, включая маневрирующие. По синтезированным алгоритмам создано программное обеспечение в среде MATLAB для имитатора бортового контроллера системы управления судном, работоспособность и эффективность математического, алгоритмического и программного обеспечения проверены в замкнутой схеме с навигационным тренажером Navi Trainer 5000 для различных типов судов, районов плавания и погодных условий. Эксперименты подтвердили работоспособность предложенного способа и алгоритмов и позволяют рекомендовать их для практического использования при разработке модулей автоматического расхождения со многими целями, включая маневрирующие, бортового контроллера системы управления судном.

Ключевые слова: системы расхождения, автоматическое расхождение, расхождение со многими целями, расхождение с маневрирующими целями, расхождение в узкостях, системы управления расхождением.

References

1 COLREGS — International Regulations for Preventing Collisions at Sea. (2009). *Lloyd's Register Rulefinder 2005, Version 9.4*. Retrieved from: http://www.jag.navy.mil/distrib/instructions/COLREG-1972.pdf

2 Shiqi, Fan, Jinfen, Zhang, Eduardo, Blanco-Davis, Zaili, Yang, Jin, Wang, & Xinping, Yan (2018). Effects of seafarers emotion on human performance using bridge simulation. *Ocean Engineering, 170*, 111–119. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018. 10.021.

3 Popovych, I.S., & Blynova, O. Ye. (2019). The Structure, Variables and Interdependence of the Factors of Mental States of Expectations in Students' Academic and Professional Activities. *The New Educational Review, 55(1)*, 293–306. doi:10.15804/tner.2019.55.1.24.

4 Nosov, P.S., Palamarchuk, I.V., Safonov, M.S., & Novikov, V.I. (2018). Modeling the manifestation of the human factor of the maritime crew. *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro), 5(77)*, 82–92. doi: 10.15802/stp2018/ 147937.

5 Nosov, P.S., Ben, A.P., Matejchuk, V.N., & Safonov, M.S. (2018). Identification of «Human error» negative manifestation in maritime transport. Radio Electronics, Computer Science, Control. *Zaporizhzhia National Technical University, 4(47)*, 204–213. doi: 10.15588/1607-3274-2018-4-20.

6 Smolentsev, S.V. (2016). Avtomaticheskii sintez reshenii po raskhozhdeniiu sudov v more [Automatic synthesis of solutions for the divergence of ships at sea]. *Vestnik Hosudarstvennoho universiteta morskoho i rechnoho flota imeni S.O. Makarova — Bulletin of the S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet, 2(36)*, 1–10 [in Russian]

7 Shen, H., Hashimoto, H., & Matsuda, A. et al. (2019). Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning. *Applied Ocean Research Journal, 86*, 268–288. doi: 10.1016/j.apor.2019.02.020.

8 Park, J., Choi, J., & Choi, H. (2019). COLREGS-compliant path planning considering time-varying trajectory uncertainty of autonomous surface vehicle. *Electronics Letters, 55, 4*, 222–224. doi: 10.1049/el.2018.6680.

9 Tu, E., Zhang, G., & Rachmawati, L. et al. (2016). Exploiting AIS date for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey. *IEEE Transactions on intelligent transportation system, 19, 5*, 99. doi: 10.1109/TITS.2017.2724551.

10 Huang, Y., Chen, L., & Gelder, P. (2019). Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea. *Ocean Engineering Journal, 173*, 142–156. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.053.

11 Johansen, T.A., Cristoforo, A., & Perez, T. (2016). Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based Model Predictive Control, *IFAC*. Retrieved from: https://pdfs.semanticscholar.org/34a3/c1a0b699774fadab417ca2f5ef422edb1f0b.pdf

12 Zinchenko, S.M., Nosov, P.S., Mateichuk, V.M., Mamenko, P.P., & Grosheva, O.O. (2019). Automatic collision avoidance with many targets, including maneuvring ones. Proceedings from The international scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Y.Y. Fomin and V.S. Semenov. Odessa – Istanbul, April, 24–28 (pp. 343–349).

13 Zinchenko, S.N., Ljashenko, V.G., & Matejchuk, V.N. (2018). Sposib rozhodzhennia z nebezpechnimi ciljami [A way of diverging with dangerous goals]: *Pat. 129699 UA Ukraina: MPK (1218.01) B63B 4900*; applicant and patent holder Kherson State Maritime Academy, No. u 2018 04610; stated 26.04.2018; publ. 12.11.2018, Bullletin No. 21 [in Ukrainian].

14 Navi-Trainer Professional 5000 (version 5.35), Instructor's Guide, release date: October, 2014.

15 Navi-Trainer Professional 5000 (version 5.35), Navigation bridge, release date: October, 2014.

16 Zinchenko, S.M., Nosov, P.S., Mateichuk, V.M., Mamenko, P.P., & Grosheva, O.O. (2019). Use of navigation simulator for development and testing ship control systems. Proceedings from The international scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Y.Y. Fomin and V.S. Semenov. Odessa – Istanbul, April, 24–28 (pp. 350–355).

17 Zinchenko, S.N., Matejchuk, V.N., Ljashenko, V.G., Ben', A.P., Tovstokoryj, O.N., & Grosheva O.A. (2019). Sposib vikoristannia trenazhernoho obladnannia dlia rozrobki ta testuvannia sistem keruvannia ruhom suden [A method of using training equipment for the design and testing of vessel traffic management systems]: *Pat. 133709 UA Ukraina: MPK (1219.01) G06F 8/35 (2018.01) G06Q 99/00/*; applicant and patent holder Kherson State Maritime Academy, No. u 2018 08851; stated 20.08.2018; publ. 25.04.2019, Bulletin No. 8 [in Ukrainian].

DOI: 10.31489/2019Ph4/80-84

UDC 621,7.537

B.R. Nussupbekov[1], A.K. Khassenov[1], D.Zh. Karabekova[1],
U.B. Nussupbekov[1], M. Stoev[2], M.M. Bolatbekova[2]

[1]*Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan;*
[2]*Neofit Rilski South-West University, Blagoevgrad, Bulgaria*
(E-mail: ayanbergen@mail.ru)

Coal pulverization by electric pulse method for water-coal fuel

In the article describes the electrohydraulic method as a source of high energy concentration for the disintegration of the components of water-coal fuel in an aqueous medium under the action of pulsed discharges. The proposed method of grinding coal is based on the use of pulsed shock wave energy resulting from a spark electric discharge in a liquid. The essence and distinctive feature of the proposed technology is that the processing of the material using the energy of the shock wave released with electrohydraulic action allows to obtain a quickly crushed product of a given size. The degree of grinding of the material on the dependence of the electrical and geometric parameters of the installation is determined. The optimal parameters of the capacitance of capacitor banks, voltage of pulse discharges, number of pulse discharges and forming gap distance are proposed. The presented results of laboratory tests at different temperature mode, which proves that the grinding of coal by electric discharge method does not require additional cooling, since the processing process is carried out in a liquid medium. The main working element in the electric pulse processing is a spark discharge, the resulting product is not contaminated with the materials of grinding bodies, characteristic of the traditional mechanical method.

Keywords: coal, grinding, spark discharge, discharge voltage, electric pulse method.

Introduction

Among alternative fuels, the so-called water-coal fuel has good prospects. Water-coal fuel is a dispersed fuel system consisting of finely ground (40–500) microns) coal (55–70 % of the composition), water of any quality, including mine water and industrial effluent water (30–45 % of the composition) and reagent-plasticizer. The presence of water in the composition of coal fuel provides a reduction of harmful emissions into the atmosphere and turns coal into an explosion-proof material. The use of water-coal fuel has a number of environmental, technological and economic advantages. Also one of the main advantages are safety at all stages of production, reduction of harmful impurities in the atmosphere, the possibility of using it like liquid fuel and full mechanization and automation of the process, the possibility of using coal of any brands and reducing the cost by 2 or more times. The energy efficiency of such fuel depends on the initial preparation of coal, namely its grinding. In this regard, it is necessary to improve the quality of coal grinding [1, 2].

Grinding coal for water-coal fuel is the basic task that must be solved in the production process. Rheological properties and stability of the combustion process in direct proportion depends on the stability of the grinding process of the coal with the specified parameters and strict adherence to the concentrations of excipients. For grinding coal, used mechanical crushers and mills of various types. Until recently, the water-coal fuel is received with the use of these grinders. Mechanical mills can grind coal to a pulverized state, but have disadvantages in the form of bulkiness and complexity of equipment, significant specific power consumption, as well as insufficient efficiency in the processing of high-strength items. There are also difficulties in grinding wet ash coals, which merge and are compressed under the grinding organs, which leads to a deterioration of the grinding [3–5].

In this regard, the grinding of coal under the influence of pulsed discharges in a liquid medium to obtain the necessary product of water-coal fuel was studied.

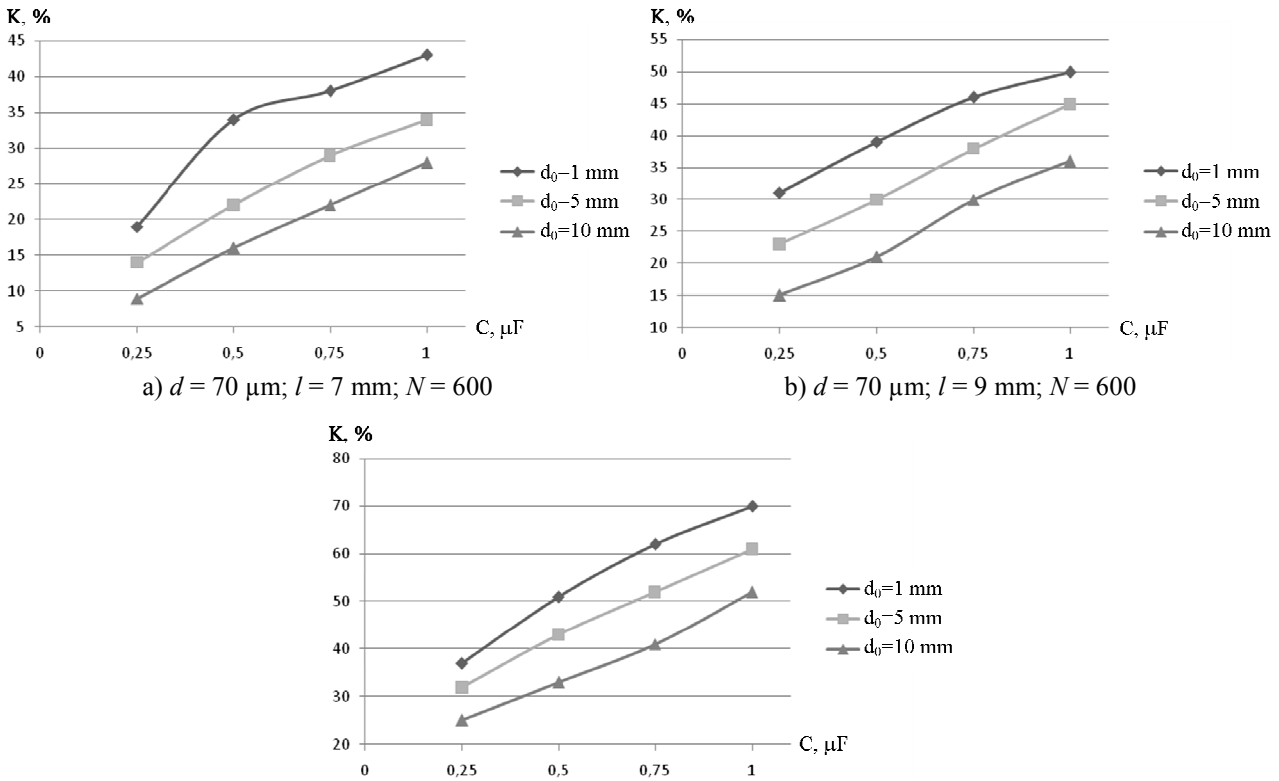
The essence of the electrohydraulic method consists in the fact that when a specially formed pulsed electric (spark, brush and other forms) discharge is carried out inside a volume of liquid located in an open or closed vessel, super-high hydraulic pressures arise around the zone of its formation, capable of performing useful mechanical work and accompanied by a complex of physical and chemical phenomena [6, 7].

The technological scheme of coal grinding includes a power source, a capacitor Bank as a storage of electric energy, forming a spark gap, a working cell. The initial diameter of the coal particles in the tests averaged d_0= 1 mm, 5 mm, 10 mm, the diameter of the resulting product d = 70 μm.

Results and its discussion

Laboratory work on coal crushing is performed depending on the basic electrical and geometric parameters of the electrohydraulic installation:

– capacitor bank capacity — 0.25 UF÷1 UF (Fig. 1);
– pulse discharge voltage — 20 kV÷32 kV (Fig. 2);
– number of pulse discharges — 300–2000;
– the distance of the forming gap is 7 mm÷11 mm.



a) d = 70 μm; l = 7 mm; N = 600

b) d = 70 μm; l = 9 mm; N = 600

c) d = 70 μm; l = 11 mm; N = 600

Figure 1. The dependence of the degree of grinding of coal on the capacity of the capacitor bank

The results of the dependence of the degree of coal grinding on the capacitance of the capacitor Bank are obtained at constant values of the discharge voltage and the number of discharges (U = 24 kV, N = 600), and with an increase in the forming interval of the electrohydraulic installation from 7 mm to 11 mm.

Grinding of coal depending on the discharge voltage was carried out at the value of the capacitance of the capacitor Bank C = 0.5 μF and at different values of the number of discharges of the number of discharges (N = 300÷600). From the results obtained, it can be seen that with increasing electrical and geometric parameters, the degree of grinding of coal increases. The following values are selected as effective parameters of the installation: U = 24÷28 kV, C = 0.5 μF, l = 9 mm, N = 600.

The following studies were devoted to the study of changes in the temperature of the medium in the process of grinding coal during the passage of a pulse discharge in a liquid medium.

This is due to the fact that in traditional methods before grinding coal is dried to a temperature of 70–85 ºC. In mechanical mills, as a result of friction between the crushing parts and the mill wall, heat is generated, which causes the temperature of the dried untreated coal to rise by 20 ºC. Thus, the temperature of the pre-cooled untreated coal again reaches the permissible level of about 60 ºC. To cool the crushed particles to a temperature below 60 ºC, cooling air is passed through an air-flow grinding mill at a temperature below the temperature of dried unprocessed coal [8].

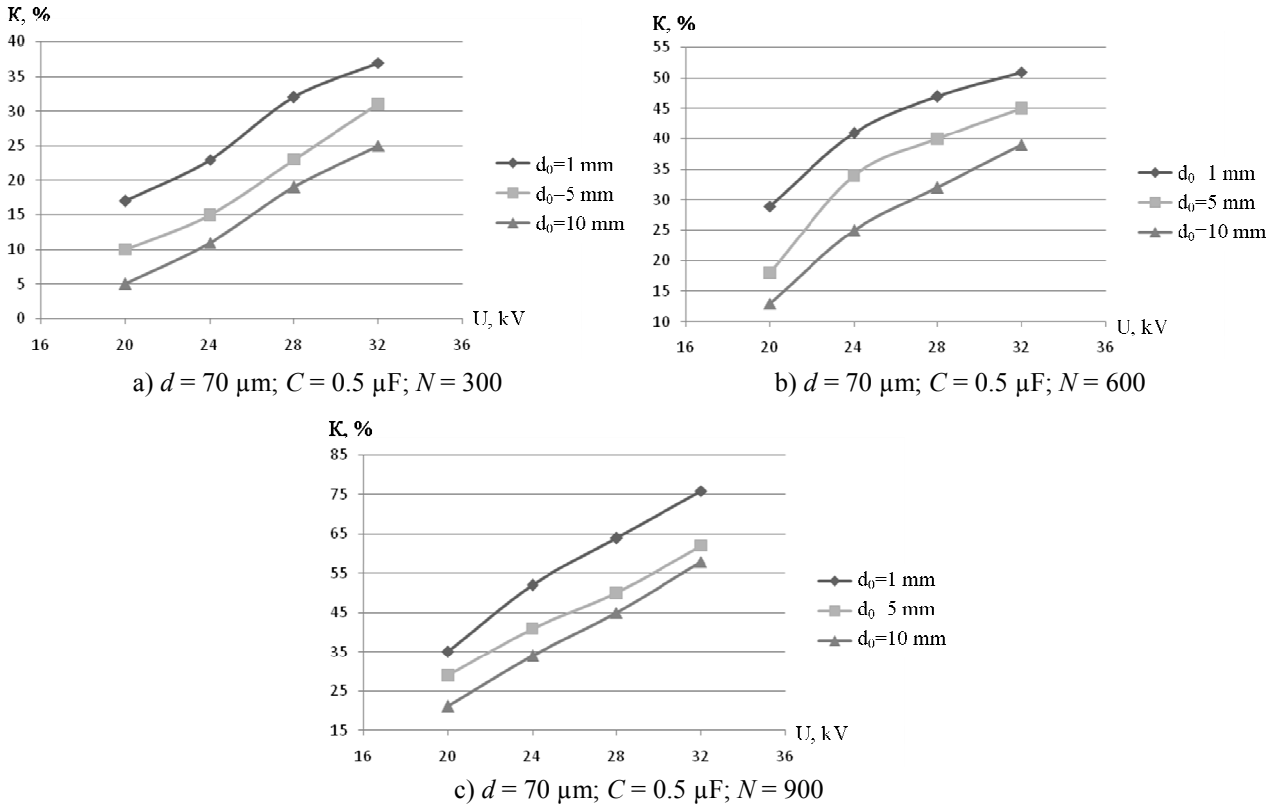


Figure 2. The dependence of the degree of grinding of coal from the voltage discharge

The number of pulsed discharges increased from 400 to 2000 when the temperature of the raw material changed during coal crushing by electrohydraulic method (Fig. 3). According to the obtained results it was observed that increasing the number of impulse discharges from 400 to 2000 maximum temperature limit hydrocarbon fuel was 55 ^{0}C. This suggests that grinding of coal electrohydraulic method does not require additional cooling, as the process takes place in a liquid medium.

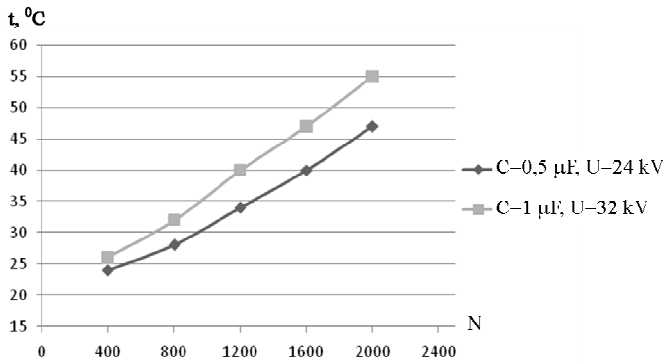


Figure 3. The dependence of the temperature of wet coal in the working cell on the number of pulse discharge

Conclusion

The use of electrohydraulic method to obtain the necessary product for water-coal fuel shows the effectiveness of the method. The efficiency depends on the capacitance of the capacitor Bank, the pulse discharge voltage and the number of pulse discharge. The results of processing coal pulsed discharges in a liquid medium, shows the rationality of the electrohydraulic method for obtaining water-coal fuel.

References

1 Докучаева С.А. Анализ существующих методов подготовки угля для водоугольного топлива / С.А. Докучаева, С.И. Кускарбекова, А.К. Джундубаев, Д.В. Растворов, Ю.С. Приходько // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере. — 2019. — Т. 7, № 1. — С. 52–58.

2 Долинский А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А.А. Долинский, А.А. Халатов // Промышленная теплоэнергетика. — 2007. — Т. 29, № 5. — С. 70–79.

3 Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Организация контроля выбросов в атмосферу на тепловых электростанциях и в котельных [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://lektsii.org/1–14683.html

4 Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г.С. Ходаков // Теплоэнергетика. — 2007. — № 1. — С. 35–45. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://masters.donntu.org/2009/feht/bondarenko/library/index2.htm

5 Алексеенко С.В. Энергоэффективные и экологически чистые технологии при реконструкции и модернизации угольной теплоэнергетики / С.В. Алексеенко, А.П. Бурдуков, Г.В. Чернова, В.Н. Чурашев // Изв. Российской академии наук. Энергетика. — 2003. — № 2. — С. 52–63.

6 Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности: учеб. / Л.А. Юткин. — Л.: Машиностроение, 1986. — 253 с.

7 Kuritnik I. Disintegration of copper ores by electric pulses / I. Kuritnik, B.R. Nussupbekov, A.K. Khassenov, D.Zh. Karabekova // Archives of Metallurgy and Materials. — 2015. — Vol. 60, No. 4. — P. 2449–2551.

8 Кассек К. Способ измельчения непереработанного бурого угля / К. Кассек, Г. Салевски, В. Карпус // 1998. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2109569C1_19980427.pdf

Б.Р. Нүсіпбеков, А.К. Хасенов, Д.Ж. Карабекова,
Ұ.Б. Нүсіпбеков, М. Стоев, М.М. Болатбекова

Сулы-көмірлі отын үшін көмірді электримпульсті әдісімен ұсақтау

Мақалада импульстік разрядтардың әсерімен сулы ортада сулы-көмірлі отынның компоненттерін дезинтеграциялауға арналған энергияның жоғары концентрациясының көзі ретінде электрогидравликалық әдіс сипатталған. Көмірді ұсақтаудың ұсынылған тәсілі сұйықтықта ұшқынды электр разрядының нәтижесінде пайда болатын импульстік соққы толқынның энергиясын пайдалануға негізделген. Ұсынылған технологияның мәні мен ерекшелігі — электрогидравликалық әсер ету кезінде соққы толқынның энергиясын пайдалану арқылы материалды өңдеуде белгілі бір мөлшерде тез ұсақталған өнімді алуға мүмкіндік береді. Қондырғының электрлік және геометриялық параметрлерінің тәуелділігінен материалды ұсақтау дәрежесі анықталды. Конденсаторлық батареялар сыйымдылығының оңтайлы параметрлері, импульстік разрядтардың кернеуі, импульстік разрядтардың саны және қалыптастырушы аралықтың арақашықтығы көрсетілген. Зертханалық зерттеулердің нәтижелері әртүрлі температура режимдерінде ұсынылған, бұл көмірді электрлік разряд әдісімен ұнтақтау қосымша салқындатуды қажет етпейді, себебі өңдеу процесі сұйық ортада орындалады. Электримпульсті өңдеу кезінде негізгі жұмыс элементі ұшқындық разряд болып табылады, алынған өнім дәстүрлі механикалық әдістерге тән ұнтақталған денелердің материалдарымен ластанбайды.

Кілт сөздер: көмір, ұнтақтау, ұшқынды разряд, разряд кернеуі, электроимпульстік әдіс.

Б.Р. Нусупбеков, А.К. Хасенов, Д.Ж. Карабекова,
У.Б. Нусупбеков, М. Стоев, М.М. Болатбекова

Измельчение угля электроимпульсным способом для водоугольного топлива

В статье описан электрогидравлический способ как источник высокой концентрации энергии для дезинтеграции компонентов водоугольного топлива в водной среде под действием импульсных разрядов. Предлагаемый способ измельчения угля основан на использовании энергии импульсной ударной волны, возникающей в результате искрового электрического разряда в жидкости. Сущность и отличительная особенность предлагаемой технологии в том, что обработка материала с использованием энергии ударной волны, выделяемой при электрогидравлическом воздействии, позволяет получить быстро измельченный продукт заданной крупности. Определена степень измельчения материала в зависимости от электрических и геометрических параметров установки. Предложены оптимальные параметры емкости конденсаторной батареи, напряжения импульсных разрядов, количество импульсных разрядов и расстояние формирующего промежутка. Представлены результаты лабораторных испытаний при различных температурных режимах, которые доказывают,

что измельчение угля электроразрядным способом не требует дополнительного охлаждения, так как процесс обработки осуществляется в жидкой среде. Основным рабочим элементом при электроимпульсной обработке является искровой разряд, полученный продукт не загрязняется материалами мелющих тел, свойственных традиционным механическим методам.

Ключевые слова: уголь, измельчение, искровой разряд, напряжение разряда, электроимпульсный метод.

References

1 Dokuchaeva, S.A., Kuskarbekova, S.I., Dzhundubaev, A.K., Rastvorov, D.V., & Prihod'ko, Yu.S. (2019). Analiz sushchestvuiushchikh metodov podhotovki uhlya dlia vodouholnoho topliva [Analysis of existing methods of coal preparation for water-coal fuel]. *Energo- i resursosberezhenie v teploenerhetike i sotsialnoi sfere. — Energy and resource saving in heat power and social sphere, 7, 1,* 52–58 [in Russian].

2 Dolinskii, A.A., & Halatov, A.A. (2019). Vodouholnoe toplivo: perspektivy ispolzovaniia v teploenerhetike i zhilishchno-kommunalnom sektore [Water-coal fuel: prospects of use in heat power and housing and communal sector]. *Promyshlennaia teploenerhetika — Industrial heat, 29, 5,* 70–79 [in Russian].

3 Predelno dopustimye kontsentratsii vrednykh veshchestv v vozduhe rabochei zony. Orhanizatsiia kontrolia vybrosov v atmosferu na teplovykh elektrostantsiiakh i v kotelnykh [Maximum permissible concentrations of harmful substances in the air of the working area. Organization of control of emissions into the atmosphere at thermal power plants and boilers]. *lektsii.org* Retrieved from https://lektsii.org/1–14683.html [in Russian].

4 Hodakov, G.S. (2007). Vodouholnye suspenzii v enerhetike [Coal-water suspensions in power engineering]. *Teploenerhetika — Heat power engineering*, *1,* 35–45. Retrieved from http://masters.donntu.org/2009/feht/bondarenko/library/index2.htm [in Russian].

5 Alekseenko, S.V., Burdukov, A.P., Chernova, G.V., & Churashev, V.N. (2003). Enerhoeffektivnye i ekolohicheski chistye tekhnolohii pri rekonstruktsii i modernizatsii uholnoi teploenerhetiki [Energy efficient and environmentally friendly technologies in the reconstruction and modernization of coal thermal power]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Enerhetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetics,* 2, 52–63.

6 Kuritnik, I., Nussupbekov, B.R., Khassenov, A.K., & Karabekova, D.Zh. (2015). Disintegration of copper ores by electric pulses. *Archives of Metallurgy and Materials*. *60, 4,* 2449–2551.

7 Yutkin, L.A. (1986). *Elektrohidravlicheskii effekt i eho primeneniie v promyshlennosti [Electrohydraulic effect and its application in industry]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].

8 Kassek, K., Salevski, G., & Karpus, V. (1998). Sposob izmelcheniia nepererabotannoho buroho uhlia [The method of grinding of raw brown coal]. *patents.s3.yandex.net* Retrieved from https: //patents.s3.yandex.net/RU2109569C1_19980427.pdf

DOI: 10.31489/2019Ph4/85-88

UDC 662.8: 678.8

E.S. Mustafin, Kh.B. Omarov, K.M. Shaimerdenova, A.T. Omerkulov

Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan
(E-mail: gulzhan.0106@mail.ru)

Production of coal briquettes using the original binder

In this paper the authors consider a new genuine binder that makes it possible to produce coal briquets with desired consumer properties, i.e. reduced bitumen consumption, low production process temperatures and high moisture resistance. To make coal briquets, a batch mixture was prepared (coal fines, slack, riddlings) and then mixed in a mixer with a genuine emulsified bitum in a ratio of 20 to 1 by weight, after which the mixture was fed into molds and taken to a pressing machine. The resulting briquets were dried at a temperature of 30–40 ºC for 12 hours. The results of their tests displayed a compressiion strength of 60–70 kg/cm^2; when dropped from a height of one meter, the residue on the sieve +25 mm after sieving was 96–98 % (high strength). In addition, the briquets showed good resistance to moisture (low moisture capacity not more than 2–3 %) — water sprinkling did not loose the briquettes; there was no destruction even when doused into water. In the process of burning the briquets did not disintegrate, the flame was uniform in all directions. Calorific capacity tests of the produced briquets were made. Due to the improved commercial quality offered by briquees, after scoping calculations the saving of coal fuel was presupposed.

Keywords: coal briquettes, coal fines, mixture, slack, bitumen, moisture resistance, binder, calorific capacity.

The strategic objectives of the development of coal chemistry are reliable and effective satisfaction of domestic demand for high-quality solid fuel and its products, ensuring the competitiveness of coal products in the conditions of saturation of domestic and foreign markets with interchangeable energy resources and alternative suppliers, improving the safety of coal processing and reducing their impact on the environment.

As a result of the activities of enterprises for the extraction and beneficiation of coal, there is a need to recycle the inevitable waste (coal fines, riddling and milling slime, etc.), which are practically not used.

One of the methods of such processing is briquetting. Briquetting is the process of processing fine coal and slack into pieces of a geometrically regular and uniform shape, and of equal mass — briquettes. Coal briquettes are very easy to use due to simple placing, high flammability, and constant caloricity even during long-term storage, ease of accounting and control in use. Every year production of briquettes develops more and more, as during transportation the briquettes are not destroyed due to the strength obtained in the manufacturing process. Usually coal is transported in bulk in open wagons, and with one loading (unloading), the volume of coal in the car decreases by 10 %, and if we take into account the number of coal transfer upon delivery to the consumer, the volume decreases by 15–25 %. Ordinary coal does not burn completely in furnaces and fire pots — fine coal is spilt through fire bars into an ash pan, and this is about 10 % of the total weight of the poured coal; when burning, pieces of coal break up, releasing coal dust that flies out in fly ash, so losses can reach 25–35 %. Unlike coal, briquettes burn completely, there is no refuse burnout and only ash remains after combustion [1].

The need to process waste (coal fines) arising from the activities of enterprises for the extraction and enrichment of coal, to obtain liquid products, the sale of which will allow a more complete use of mineral reserves, to save products and improve the productivity of the coal industry requires the development of new briquetting technologies. Briquetting is the process of processing coal fines into pieces geometrically correct and uniform shape, the same mass-briquettes.

The influence of briquetted charge humidity on the strength characteristics of fuel briquettes and the optimal humidity value equal to 4.9 % was established.

We can assume the following stages of the process of coal briquetting with binders:

– adsorption of binder by briquetted material and formation of thin binder film on particle surface,
– pressing processes, during which, under the influence of pressure, hardening processes occur at the interface of the binder phases with the surface of coal,
– formation of a structuring polycyclic complex or polymer layers around a granular carbon-containing component that determine the strength and other technical characteristics of fuel briquettes.
– formation of own structure of briquettes and hardening, accompanied by dehydration and drying processes [2].

The imported coal has in its volume a certain amount of rock and debris, which are added to the loading and unloading stations. During the production of briquettes, coal raw materials are cleaned of rock and other impurities by sieving.

Currently, the main reasons inhibiting the development of briquetting of stone, brown coal and coal sludge is the lack of affordable and cheap binder. For this reason, constantly underway the search for different variants of individual or combined binders for obtaining fuel briquettes.

Currently, the development of briquetting binders has been divided into three categories: organic, inorganic and composite binders. However, the development of complex substances continues, in which the binder can take full advantage of all kinds of binder, fill the shortage of one binder, reduce the amount of inorganic binder, reduce the cost of briquettes, improve the quality of briquettes and greatly improve the strength. Given the development of modern research, the search for organic and organic-inorganic composition of binders has become a center of research and development. In particular, the composite binder consisting of industrial and agricultural waste mixed with other binders can reduce environmental pollution and improve the quality of the briquette, and have certain economic and environmental benefits at the same time. So in recent years, composite binder has become the main direction of development of briquette binder [3].

Selection of binders that simultaneously meet all the necessary requirements: availability, low cost, the ability to increase the heat of combustion of the obtained pieces of fuel and its moisture resistance, the ability to give the briquette high mechanical strength, etc.

In the modern technology of briquetting of coal fines with the addition of bitumen binder, the strength of the briquette after pressing is determined by technological regimes, in particular the pressing temperature, and depends on the structure and properties of bitumen [4].

The purpose of the proposed work is to expand the existing range of binders that allow creating a fuel coal briquette with the necessary consumer properties, which imply a reduction in bitumen consumption, lower process temperatures and moisture resistance.

Bituminous emulsion (composite material) was used to bind fine coal, which showed good adhesive qualities and was operated for three years during the pretreatment of the roadbed for asphalt laying. The resulting emulsion has plasticity, fluidity, relatively good adhesion (stickiness), hydrophobic, short preparation times and good combustibility. Due to the content of the polymer (cross-linked) composition, the proposed water-emulsion mixture binds coal fines well and has increased strength characteristics [5].

The main advantages of using the proposed emulsion in comparison with other binders are the availability of a ready production plant, relatively low energy consumption, the use of local raw materials and low-cost reagents.

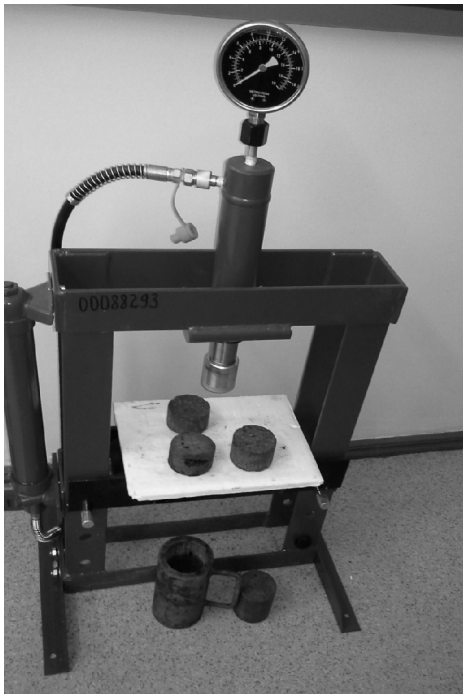


Figure. Photo of obtained coal briquettes

The batch mixture (coal fines, slack, riddling) intended for briquetting heated to the temperature of 60–70 ºC was mixed in a mixer with emulsified bitumen prepared at a temperature of 90 ºC in a ratio of 20 to 1 by weight, after which the mixture was loaded into molds and fed into pressing machine with a working pressure of 100–200 MPa. The resulting briquettes were dried at a temperature of 30–40 ºC for 8 hours.

As a result of mixing, the binder covered coal particles in thin layers (film) with hydrophobic properties, and provided the necessary adhesion of particles, and then during dehydration, polymerization took place; the latter process cemented the coal particles in briquette mass.

Briquettes were tested according to GOST 21289-75-21289-91 «Briquettes coal. Methods of physical tests» (see Fig.).

Obtained fuel briquettes according to the test results:

– have a compressive strength of 65–70 kg/cm^2;

– when dropped from a height of 1 m, the residue on the sieve +25 mm after sieving was 96–98 % (high strength);

– have good resistance to moisture (low moisture capacity of not more than 2–3 %) — irrigation spraying did not loosen the briquettes;

– no destruction when immersed in water;

– in the combustion process, the flame was uniform in all directions and the briquettes disintegrated.

The performed tests on the calorific value are GOST 147–95 «Solid mineral fuel. Determination of the highest heat of combustion and calculation of the lowest heat of combustion» showed improvement of properties of briquetted coal in comparison with the initial raw materials taken from different coal enterprises (see Table).

Table

Test results of small fractions and obtained briquettes

Name and measurement units	Results					
	Small fraction from coal enterprises			Briquette		
	1	2	3	1	2	3
Mass fraction of total moisture in operating condition of fuel, %	5.7	7.5	5.4	3.6	5.6	2.9
Ash content, %	34.5	39.9	32.3	34.4	36.3	32.4
Mass fraction of total sulfur	0.50	0.6	0.5	0.45	0.55	0.5
The lower heating value, based on the operating condition of the fuel, kcal/kg	4885	4560	4090	5100	4650	5154
Higher heating value calculated for dry ash-free fuel, kcal/kg	7860	6960	7210	8220	6990	8381

Notes: *1* — sludge from the «Saburkhanskaya» central processing plant; *2* — coal fines from the Borly deposit; *3* — coal fines from the «Kuu Chekinsky» surface coal mine.

Due to the improved commercial qualities of the proposed briquettes, after preliminary calculations, the following saving of coal fuel was presupposed:

– up to 10 % during transportation and overloading due to high mechanical strength (M35≥80 %);
– up to 10 % during transportation and overloading due to high mechanical strength;
– up to 14 % during combustion due to avoiding carrying away of coal fines by flue gases and spillage of the fuel through the grate;
– up to 11 % due to elimination of under-burns due to high reactivity and thermal stability.

The main advantages of the proposed method of coal briquetting are the following:

– the briquette has high strength and moisture resistance (it can be stored in open areas);
– it turns out to be smoother and cleaner than conventional coal and other briquettes;
– bitumen consumption decreases by 75–85 %;
– reduced energy consumption, due to lowered operational temperature of the production process — 60–80 ºC;
– losses during loading and unloading operations are reduced due to the high strength and cylindrical shape of briquettes;
– small production costs, due to the low cost of the emulsion (binder).

As a result of the tests, it was noted that the produced briquettes meet the standards, have increased moisture resistance, are resistant to mechanical stress and have a higher calorific value compared to the original raw material. Coal briquettes made using the genuine binder are easy-to-use due to the simplicity of their storage, fairly high flammability, the invariance of their calorific value during storage, moisture resistance and ease of control during consumption. Coal briquettes produced with the original binder are easy to handle due to the simplicity of laying, fairly easy flammability, and immutability of their calorific value during storage, moisture resistance and ease of control during consumption.

References

1 Елишевич А.Т. Брикетирование угля со связующими / А.Т. Елишевич. — М.: Недра, 1972. — 160 с.

2 Tulepov M.I. Preparation of Coal Briquettes and Determination of Their Physical and Chemical Properties / M.I. Tulepov, L.R. Sassykova, A.R. Kerimkulova, G.O. Tureshova, D.M. Tolep, A.O. Zhapekova, Z.A. Mansurov // Oriental Journal of Chemistry. — 2019. — No. 35(1). — P. 180–185. DOI:10.13005/ojc/350120.

3 Zhang G.J. Review of briquette binders and briquetting mechanism / G.J. Zhang, Y.H. Sun, Y. Xu // Renewable & Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Vol. 82. — P. 477–487.

4 Петрова Л.А. Получение бытовых топливных брикетов с использованием нефтяных связующих / Л.А. Петрова // Нефтегазовое дело (электрон. науч. журн.). — 2007. — № 1. — 14 с.

5 Мустафин Е.С. Способ получения битумной дорожной эмульсии с использованием каменноугольного битума / Е.С. Мустафин, К.К. Ташмагамбетов, Р.З. Касенов // Патент РК № 12–3/89 от 22.01.13 г.

Е.С. Мустафин, Х.Б. Омаров, К.М. Шаймерденова, А.Т. Омеркулов

Бастапқы байланыстырушы затты қолдана отырып, көмір кесектерін алу

Мақалада қажетті тұтынушылық қасиеттері бар көмір брикеттерін жасауға мүмкіндік беретін жаңа бастапқы байланыстырушы зат қарастырылған, яғни, битумның шығынын азайту, технологиялық процесс температурасының төмендеуі және ылғалға төзімділігін. Брикеттеу үшін шихтаны (көмір қалдықтары, шлам, бөліктер) дайындап, содан кейін қоспаны массасы бойынша 20:1 қатынасында түпнұсқалы битум эмульсиясымен араластырды, содан кейін қоспа пресс қалыптарға тиеліп, баспаққа берілді. Алынған брикеттер 30–40 ºС температурада 12 сағат бойы кептірілді. Сынау нәтижелері 60–70 кг/см^2 қысуға беріктігін көрсетті, бір метр биіктіктен лақтыру кезінде, елегеннен кейін ситадағы +25 мм қалдық 96–98 % (жоғары беріктігі) құрады. Сонымен қатар, брикеттер ылғалға жақсы төзімділігін көрсетті (ылғал сыйымдылығы 2–3 %-дан аспайтын төмен) — бүрку арқылы брикеттерді қопсытпады, қираған және суға батқан кезде болған жоқ. Өрт кезінде брикеттер құлап қалмады, жалын барлық бағыттар бойынша біркелкі болды. Алынған брикеттерге жылу шығарғыштығы бойынша сынау жүргізілді. Алдын ала есептеуден кейін, брикеттер ұсынған жақсартылған тауарлық қасиеттер есебінен көмір отынын үнемдеу болжамды.

Кілт сөздер: көмір брикеттері, көмір қалдықтары, шихта, шлам, битум, ылғалға төзімділік, байланыстырушы заттар, жылу шығарғыштық.

Е.С. Мустафин, Х.Б. Омаров, К.М. Шаймерденова, А.Т. Омеркулов

Получение угольных брикетов с применением оригинального связующего вещества

В статье рассмотрено новое оригинальное связующее вещество, которое позволяет создать угольные брикеты с нужными потребительскими свойствами, т.е. уменьшение расхода битума, понижение температур технологического процесса и влагостойкость. Для брикетирования готовили шихту (угольная мелочь, шлам, отсев) и затем смешивали в смесителе с оригинальной битумной эмульсией в соотношении 20 к 1 по массе, после чего смесь загружалась в пресс-формы и подавалась в пресс. Полученные брикеты сушились при температуре 30–40 ºС в течение 12 ч. Результаты испытаний показали прочность на сжатие 60–70 кг/см^2, при сбрасывании с высоты одного метра остаток на сите +25 мм после просеивания составил 96–98 % (высокая прочность). Кроме того, брикеты показали хорошую устойчивость к влаге (низкая влагоемкость не более 2–3 %) — орошение опрыскиванием не разрыхляло брикеты, отсутствовали разрушения и при погружении в воду. В процессе горения брикеты не распадались, пламя было равномерное по всем направлениям. Проведены испытания полученных брикетов по теплотворности. За счет улучшенных товарных качеств предлагаемых брикетов после предварительных расчетов была предположена экономия угольного топлива.

Ключевые слова: угольные брикеты, угольная мелочь, шихта, шлам, битум, влагостойкость, связующее вещество, теплотворность.

References

1 Elishevich, A.T. (1972). *Briketirovanie uhlia so sviazuiushchimi [Coal briquetting with binders]*. Moscow: Nedra [in Russian].

2 Tulepov, M.I., Sassykova, L.R., Kerimkulova, A.R., Tureshova, G.O., Tolep, D.M., & Zhapekova, A.O., et al. (2019). Preparation of Coal Briquettes and Determination of Their Physical and Chemical Properties. *Oriental Journal of Chemistry*, *35(1)*, 180–185. DOI:10.13005/ojc/350120.

3 Zhang, G.J., Sun, Y.H., Xu, Y. (2018). Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable & Sustainable Energy Reviews, 82*, 477–487.

4 Petrova, L.A. (2007). Poluchenie bytovykh toplivnykh briketov s ispolzovaniem neftianykh sviazuiushchikh [Production of household fuel briquettes using oil binders]. *Neftehazovoe delo — Oil and Gas Business*, 1, 14 [in Russian].

5 Mustafin, E.S., Tashmagambetov, K.K., & Kasenov, R.Z. (2013). Sposob polucheniia bitumnoi dorozhnoi emulsii s ispolzovaniem kamennouholnoho bituma [Method for producing bitumen road emulsion using coal bitumen]. *Patent RK No. 12–3/89* Dated 01.22.13.

ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ
МЕТОДИКА ФИЗИКИ
METHODOLOGY OF PHYSICS

DOI: 10.31489/2019Ph4/89-96

ӘОЖ 371.2, 378.1

А.С. Кудусов[1], Қ.Б. Копбалина[2], Ж.Т. Камбарова[1], И.А. Кудусова[1]

[1]Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті, Қазақстан;
[2]Қарағанды мемлекеттік техникалық университеті, Қазақстан
(E-mail: kambarova@bk.ru)

Білім беру мекемелері үшін ақпараттық-білім беру ортасын Google Apps сервис пакетінің негізінде құрастыру

Мақалада желілік сервистер құралдарымен бірыңғай ақпараттық-білім беру ортасын құру сұрақтары қарастырылған. Білім беру үшін Google Apps сервис пакетінің көмегімен ақпараттық-білім беру ортасын құру оқытушылар мен білім алушылардың нәтижелі біріккен іс-әрекеттілігін ұйымдастыруға мүмкіндік береді. Google Apps сервистері мен олардың мүмкіндіктері, бұлттық қызметтердің мәні, сонымен қатар білім беру мекемесінің ақпараттық-білім беру кеңістігіндегі дидактикалық потенциалы зерттелген. Білім беру үшін Google Apps сервис пакеті негізінде ақпараттық-білім беру ортасын құрудың артықшылықтары көрсетілген. Авторлар Google Apps сервис пакетінде құрылған «Quantum mechanics» пәні бойынша оқу курсын сипаттады. Бұл пән бойынша студенттердің өздік жұмыстарын ұйымдастыру үшін аталған сервистің мүмкіндіктері зерттелді.

Кілт сөздер: білім беру мекемелері, ақпараттық-білім беру ортасы, ақпараттық-білім беру кеңістігі, білім беруді басқару, Google Apps сервис пакеті.

Білім беру мекемелерінде ақпараттық — білім беру ортасын құрудың ең тиімді құралдарының бірі — Google компаниясымен ұсынылған білім беру жүйесіне арналған Google Apps сервис пакеті болып табылады.

Google Apps — білім беру процесінің бүкіл қатысушыларының тиімді өзара әрекеттесуін ұйымдастыруға, біріккен жұмысты жоспарлауға, ресурстарды сауатты үлестіруге және кез келген оқу мәселелерін шешудің қажетті құралдарын қамсыздандыруға мүмкіндік береді (1-сур.). Ең белгілі және тиімді сервистерді біріктіре отырып, Google Apps техникалық дайын емес мұғалімнің өзіне тиімді, қауіпсіз және ең маңыздысы тегін берілетін құралдарды береді. Google Apps сервис пакетін бүгінгі күнде бүкіл әлем бойынша ондаған миллион оқушылар мен студенттер қолданады [1].

Google Apps for Education — бұл .edu доменінде рұқсат етілген Google компаниясының сервистер жиыны. Оған пошталық сервис Gmail (веб-пошта), Drive бұлтты қоймасы, Google Calendar (күнтізбе), Google Video (видеофайлдармен қауіпсіз және құпиялы алмасу), кестелерді, құжаттарды, презентацияларды және сайттарды құрастыру бойынша сервистер (Sheets, Docs, Slides и Sites) және т.б. кіреді (1-сур.).

Google Apps сервис пакетінің артықшылықтарын қарастырайық:

1. Тегін.

– барлық базалық мүмкіндіктер қол жетімді;

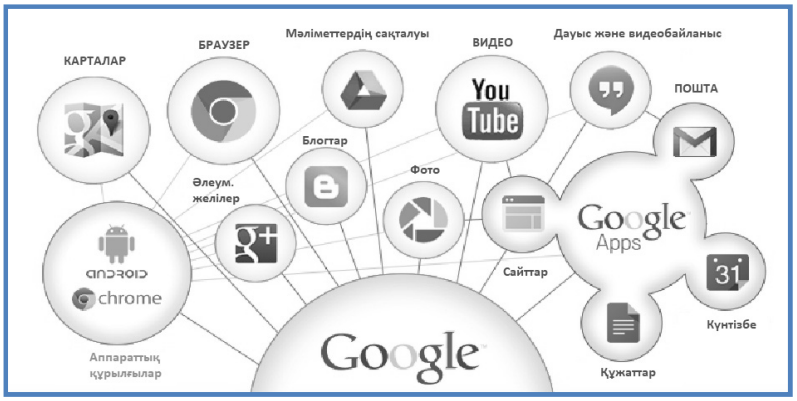
– қолдану кезеңіне шектеулер қойылмаған.

2. Бір аккаунт — бүкіл сервистер.

– тіркелу үшін бір рет қана жеткілікті;

– қажеттілік туғанда жаңа сервистерді қосуға болады.

3. Таныс, интуитивті және түсінікті интерфейс.
– интерфейс стандартты офистік бағдарламаларға сәйкес келеді;
– сервистердің тұтастығы — интерфейстердің тұтастығы.
4. Мәліметтердің бұлт қоймасында сақталуы.
– мәліметтерді жоғалту мүмкін емес;
– тікелей сілтемелер арқылы ыңғайлы кіру;
– желіге қосылған кез келген компьютерден кіру мен редакциялау мүмкіндігі.
5. Кіру рұқсаттылығы үшін аз талаптар.
– қосымша бағдарламаларды орнату қажеттілігі жоқ;
– әр түрлі браузерлерді қолдану мүмкіндігі;
– портативті құрылғылардан кіру.



1-сурет. Google Apps for Education

6. Құжаттарды бірігіп құрастыру.
– құрастырушылардың бірігуі;
– кешенді құжаттарды құрастыру процесін қарапайымдылау;
– құжаттарды бірігіп тез келістіру;
– интерактивтік, нақты уақытта өзгертулердің көрінуі.
7. Кіру құқықтарының ажыратып шектелуі.
– әр түрлі рұқсат деңгейлері (редакциялау, көру);
– сілтемелер мен фреймдер түрінде кірістіру мүмкіндігі.
8. Бүкіл енгізілген өзгертулердің тарихы.
– өзгертулердің статистикасын жүргізу;
– алғашқы редакцияда құжатты қалпына келтіру мүмкіндігі;
– құжатты құрастыруда әрбір қатысушының белсенділігін және үлесіне мониторинг жүргізу.
9. Пайдаланушылар қоғамы.
– қолдану мүмкіндіктерімен және көзқарастармен алмасу;
– тиімді мысалдар мен тәжірибе.
– құралдарды тестілеу үшін кең аудитория.
10. Мобильдік рұқсат.
Кемшіліктері:
– ғаламтарға қосылу қажеттілігі;
– интерфейстерге бейімделу;
– функционалдың шектеулілігі.

Google Apps сервис пакеті әкімшілер, оқытушылар, білім алушылар мен ата-аналар үшін тегін құрал болып табылады. Бұл өнім білім беру мекемесін қамтығандықтан, корпоративтік аккаунт жауапты тұлғаның тіркелуін талап етеді. Бұл аккаунт ішінде әр түрлі кіру рұқсаттылықтарына ие пайдаланушылар үшін аккаунттар құрылады. Мысалы, мектептің директоры немесе оқу ісі бойынша директор орынбасары толық кіру рұқсатына ие болса, оқушылар мен мұғалімдер біріккен іс-әрекет-тіліктер құралдарына рұқсатқа ие болады, ал ата-аналар мұғалімдерден жаңалықтар сілтемесін ала алады [2].

Google білім беру мекемесінің домендік аты үшін барлық серверлер және серверлердің қызметтері қол жетімді болады. Мысалы, электрондық поштаның барлық тіркеулік жазбасы мекеменің домен атына ие болады (@myschool.org). Білім беру үшін Google Apps-ті білім беру мекемелерінде пайдалану үшін қымбат бағалы серверлер мен құрал-жабдықтар, бағдарламалық қамтамасыз ету үшін лицензиялар мен жаңартулар қажет емес. Google Apps кешеннің барлық мүмкіндіктері барлық мектептер мен университеттер үшін тегін. Сонымен бірге коммуникация мен біріккен жұмыстар үшін көптеген құралдар бар:

Доменді құру. Білім беру үшін Google Apps доменін тіркеу процесі келесі сатылардан тұрады:

1. Ең алдымен домен атын тіркеу қажет. Тіркеудің ең ыңғайлы тәсілі — домендерді тіркеушіден домен атын сатып алу. Домендік ат латындық әріптерден құрылуы керек (мысалы: kz, org, com және т.б.)

2. Домен атын тіркеуден кейін оқу мекемелері үшін Google Apps парақшасына кіру керек https://gsuite.google.com/signup/basic/welcome және тіркеу тетігін басу керек. Тіркеудің барлық позицияларын толтыру жеңіл. Ең алдымен өзі туралы ақпаратты енгізу керек, кейін оқу мекемесінің типін таңдау керек (орташа немесе жоғары білім беру), тіркеу туралы растау келетін телефон нөмерін көрсету керек. Келесі сатыда тіркелген домен атын көрсету керек. Осыдан кейін білім беру мекемесі туралы ақпаратты енгізу. Соңында Google Apps доменнің әкімші атын таңдау қажет.

Барлық ақпарат енгізілгеннен кейін, тест режиміндегі домен тіркелген болып саналады. Әрі қарай Google Apps мүмкіндіктерін қолдану үшін, білім беру мекемесінің лицензиясын тіркеп, өтінім жіберу керек. Google Apps доменін басқаруда әкімшіге қолайлылық үшін әкімшіліктендіру панелі немесе доменнің консолі ұсынылады. Оның көмегімен арнайы дайындығы жоқ адамның өзі доменнің әкімшіліктендіруі бойынша барлық негізгі операцияларды жеңіл орындай алады: пайдаланушы-лардың аккаунттарын құру, пайдаланушыларды мекеменің құрылымдық бөлімшелері бойынша жіктеу, Google Apps-тің негізгі және қосымша қызметтерін қосу, пайдаланушыларға домен ішінде сервистерге рұқсат беру. Білім беру үшін Google Apps доменнің әкімші консоліне өту үшін Google Apps әкімші аккаунтына рұқсат етілген Сервис мәзіріне кіру керек. Одан басқа, доменнің әкімшіліктендіру панеліне admin.google.com сілтеме бойынша кіруге болады. Әдепкі қалып бойынша әкімші консолінде сегіз топ рұқсат етілген, қосымша элементтерді қосу үшін «Добавить элементы управления» қосымша парағына өту қажет. Білім беру үшін Google Apps домені аккаунттары бар пайдаланушылар үшін өз сервестерінің мүмкіншіліктерін қамтамасыз етуге қызмет етеді. Сондықтан доменнің әкімшісіне келесі пайдаланушылармен қарапайым операцияларды меңгеру қажет: пайдаланушыларды құру, оларды ұйымдар бойынша бөлу, пайдаланушыларды топтарға біріктіріп, оларға Google Apps қызметтерін қолдануымен байланысты мүмкіншіліктерді беру.

Google Apps домендегі барлық пайдаланушылар ұйымдар бойынша бөлінген. Ұйым бұл доменнің құрылымдық бөлімшесі, ол оған кіретін пайдаланушылардың ортақтық белгісі бойынша құрылады. Мысалы, мектеп доменнің ішінде ұйым мысалы ретінде «мұғалімдер, «әкімшілік», «ата-аналар» және т.б. болуы мүмкін. Домендегі ұйым иерархиялық принцип бойынша құрылуы мүмкін. Яғни доменнің ішінде әр түрлі ұйымдарды қоса отырып, доменнің құрылымын құруға болады. Ұйымның құрылымы ең алдымен баптаулардың иілімді басқару үшін қажет. Құрылымды құру алдында әр түрлі пайдаланушылардың құқықтарында айырмашылықты анықтау қажет [3].

Ұйымның құрылымын құрғаннан кейін, доменнің пайдаланушыларын тіркеуге көшу керек. Google Apps-та аккаунтарды пайдаланушылардың өздері емес, ал доменнің әкімшілігі ашады. Аккаунты құру үшін пайдаланушының аты жөні, электрондық поштасы қажет.

Google Apps доменнің негізгі және қосымша сервистерін қарастырайық [4].

1. Gmail электронды поштасы. Электрондық пошта — заманауи мұғалімнің кілттік желілік құралдарының бірі. Негізгі қызметі — электрондық хаттарды лезде мекен-жай иесіне жіберу және хаттарды алу. Одан басқа да көптеген функцияларға ие. Электрондық поштаның мекен-жайы көмегімен көптеген желілік ресурстар мен сервистерде тіркеу жүргізіледі. Өзінің электрондық поштасына жаңалықтар алуға болады; пошталық топты құрып, әріптестерімен немесе оқушылардың әр түрлі сипаттағы жобалармен айналысуға болады. Google Apps доменінде Gmail электрондық поштамен қолданудан бұрын, бұл доменнің тіркеу қызметінде сіздің доменіңізді тіркеу керек.

2. *Google дискісі*. Бұл білім беру үшін Google Apps сервистер пакетіне кіретін әмбебап құрал. Google дискісі ақпараттар қоймасының функцияларымен қатар, құжаттармен (Google құжаттары), мәліметтерді жинаумен (Google формалары) және оларды өңдеумен (Google кестелері), кескіндерді құру (Google суреттері) және презентацияларды құрастыруымен (Google презентациялары)

байланысты күнделікті есептерді шешуге мүмкіндік беретін құралдар мен сервистер жиыны. Сонымен қатар Google дискісінде базалық сервистерден басқа Google компаниясының серіктестерімен ұсынылған ондаған қосымшаларды қосуға болады. Google дискісі сервисін таңдаған кейін, кез келген форматтағы файлдарды оған жүктеу мүмкіндігіне ие боласыз, яғни оны бұлтты қойма ретінде пайдалануға болады, сонымен бірге жеке файлдарға немесе папкаларға біріккен рұқсатты беруге болады. Білім беру үшін Google Apps пайдаланушыларына Google бұлтында серверлік кеңістіктің 30 Гбайты тегін ұсынылады. Ескерту: бұл кеңістік тек Google дискісіне сізбен жүктелген файлдарға ғана жұмсалады (фотографиялар, видео-аудиоматериалдар, PDF және мұрағаттық файлдар және т.б.). Ал Google дискісінің құралдарымен құрылған құжаттар мүлдем орын алмайды.

Google құжаттары — файлдарды құруға мүмкіндік беретін қосымша, оларды Google дискісінде сақтауға болады. Google құжаттары — бұлттық технология. Бұл дегеніміз — оның көмегімен құрылған материалдар қорғалған ғаламтор-қоймасында сақталады, олардағы пайдаланушылармен жасалған өзгертулері автоматты түрде сақталады, сондықтан құжаттың соңғы нұсқасын кез келген жерден ашуға мүмкіндік бар. Мұндай құжаттардың қолайлығы — оларға ғаламторға қосылған кез келген компьютерде рұқсат бар. Құжаттармен жұмысы үшін Google Chrome браузері үйлесімді. Google дискісінде жаңа құжатты құру үшін «Создать документы» тетігін басып, ашылатын тізімнен қажет мәзір пунктісін таңдау керек. Бес типті құжаттарды құруға мүмкіндік бар: мәтіндік, кестелік, презентациялар, суреттер мен формалар. Оларды папкалар көмегімен Дисктің құралдар панелін қолдана отырып жүйелеуге болады.

Құжатты ғаламторда веб-парақша түрінде жариялауға болады, оған таңдаған пайдаланушыларға рұқсат беруге болады. Дайын құжатты өзіңіздің блогыңызда немесе сайтыңызда орналастыруға болады, сонымен бірге құжатты Google+ әлеуметтік желіде сілтеме арқылы орналастыруға болады. Құжаттарды бірнеше адам қарап, бір уақытта немесе асинхронды түрде өзгертулерді енгізе алады. Құжаттардың жалпы қоймасында мәліметтердің жинау мен өңдеуіне қатысатын мектеп қызметкерлеріне және әкімшілікке рұқсат берілуі тиіс. Құжаттарға әр түрлі рұқсат ету деңгейлері бар [5]:

– құжат иесі (құқықтардың ең жоғары деңгейі, құжатты жою құқығына дейін);
– редактор (өзгертулерді енгізу, түзету және т.б. мүмкіндіктер);
– түсінік беруші (редакциялау құқығы жоқ, шолу мүмкіндігі);
– оқырман (құқықтардың ең төменгі деңгейі — оқуға ғана құқығы бар).

Google құжаттарды мәтіндік және дауыспен шолу бар.

Google кестелері көптеген электрондық кестелер сияқты мәліметтерді есептеу мен өңдеу функцияларына ие, бірақ олар Google құжаттары сервисінің әмбебап функцияларының арқасында білім беру мақсаттары үшін инновациялық қолдану болып табылады. Бір құжатта ұжымдық жұмыс мүмкіндіктері, өз парақшаларына кіруге рұқсат, кіруді ыңғайлы басқару және дайын кестелік құжаттарды веб-парақша түрінде жариялау, кез келген белсенділікке ие болатын көпсанды қатысушылардың қашықтықтан біріккен жұмысын ұйымдастыруға мүмкіндік береді. Сонымен бірге өзекті мәліметтерді жинап өңдеуіне және барлық топтарға оперативті құрылымды ақпаратты ұсынуға мүмкіндігі зор.

Google формалары. Формалармен жұмыс істеу Google мәтіндік құжатпен жұмысына ұқсас. Мұнда құралдар панелі, бір формада авторластармен біріккен жұмыстарды жүргізу, элементтерді өзгерту мүмкіндіктері бар. Формаға қосылған кез келген элементті түзетуге, жоюға немесе көшіруге болады. Бірақ мәтіндік құжаттағы жұмыстан айтарлықтай айырмашылығы бар: форма кестемен байланысқан, бұл кестеде респонденттердің жауаптары жиналады.

Google презентациялары — презентацияларды құру мен рәсімдеу қосымшасы. Сіз жалғыз немесе бірнеше авторлармен презентацияны құрып, кейін басқаларға нәтижелерді көрсете аласыз. Google презентацияларында әдеттегі презентацияларда сияқты слайдтар мен объектілермен негізгі құралдар панелі, анимация опциясы және т.б. бар. Google презентация қосымшасының артықшылығы: бірігіп дайындалған презентация бірнеше қатысушы арасында жұмысты бөлуге көмектесіп, онлайн, синхронды немесе асинхронды түрде тікелей топтық жұмысты ұйымдастыруға мүмкіндік береді.

Google суреттері — графикалық редактор. Google суреттердің көмегімен блок-сұлбаларды, графиктерді және т.б. құрастыруға болады. Мұнда Google дисктің басқа сервистерінде сияқты біріккен жұмыс режимі бар. Одан басқа, авторлармен суреттер редакторында тікелей байланысуға

болады, кескіндер сияқты суреттерді жариялауға және компьютерге жүктеуге болады. Google суреттер сервисінің қызықты практикалық қолданыстарының бірі — оқушының өздік жұмысы үшін мұғаліммен құрылған интерактивті жұмыс парағы болып табылады.

3. *Google күнтізбегі* — жұмыстарды орындау графиктерін және кестелерді жоспарлау мен құрастыру құралы. Google күнтізбегін қолдана отырып, сіз барлық оқиғалардан хабардар боласыз, маңызды кездесуге кешігу тәуекелін қысқартасыз. Google күнтізбегі мектепте — сабақ мен сабақ тыс оқу іс-әрекеттілігін ұйымдастырудың тамаша құралы, мысалы ата-аналарға жиналыс жайлы хабарлау, сонымен бірге жоба жұмыстарын ұйымдастыру. Google күнтізбегі негізінде оқу аудиториялары мен құрал-жабдықтары сияқты мектеп ресурстары, спорт және шаруашылық инвентарьмен, спорт алаңдары сияқты ресурстарымен басқару және үлестіруді ұйымдастыруға болады.

4. *Google Sites* — білім беру үшін Google Apps пакетінің кілттік сервистерінің бірі болып табылады. Ол мектептің кәсіби сайттарын және мұғалімдердің портфолио сайттары, кіші сайт-жобаларды құруға мүмкіндік береді. Мұндай сайттарды өңдеу мен Ғаламторда жариялауға бірнеше минут қана уақыт жұмсалады. Бұл сервис редакторлар құқықтарына ие бірнеше адамдардың ұжымдық жұмысының атқаруына мүмкіндік береді. Google Sites — wiki-жақындауға негізделген сервис, бұл дегеніміз желіде ресурсты құру қиындығы қарапайым мәтіндік құжатты құру қиындығынан аспайды. Сайтты құрастыруда графиктерді, видеоларды, сілтемелерді орналастыру және т.б. көптеген мүмкіндіктер бар. Бұл сервис негізінде құрылған сайттар Google компаниясының серверінде сақталады. Google Apps-тың бір доменінде шексіз санды сайттарды құруға болады. Себебі бүкіл домен бойынша сайтты құрастыруға лимит 100 Гбайт құрайды.

5. *Google + әлеуметтік желісі*. Білім беру үшін Google Apps-тың жеке аккаунтының ішінде Google+ әлеуметтік желісін қолдану мүмкіндігі бар. Бұл опция Google Apps базалық қызметтеріне кірмейді, сондықтан оны қосу үшін әкімші консолінде Google-дың басқа сервистері командалар тобына кіру керек. Google Apps доменінде Google+ әлеуметтік желіні қосу келесі қосымша мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді: видеочат мен видеотрансляцияларды қолдану, фотографияларды сақтау мен оларға жалпы рұқсат беру, іс-шараларды жоспарлау мен т.б.

6. *Youtube* видеохостингінің танымал сервері Google Apps доменінде қосымша ретінде рұқсат етілген. Google Apps доменінде Google Youtube сервисінің негізгі артықшылығы — мектептің Youtube-каналын құру болып табылады. Бұл Youtube каналында мұғалімдердің оқу материалдарын, мектептік мерекелерде оқушылармен түсірілген видеоматериалдар, экскурсияларда, сапарларда түсірілген видеофайлдарды орналастыруға болады. Youtube-каналды құра отырып, мектеп өзіндік интернет-телевиденияға ие болады. Одан басқа ұзақ жылдар сақталатын видеомұрағатты құрудың зор мүмкіндігі бар.

Әдістеме. Берілген зерттеудің нысаны бакалавриат студенттерінің өздік жұмыстарын ұйымдастыру әдістемесін құру мен апробациялау болып табылады.

Электронды оқытудың жалпы мәселесі — ақпаратты-компьютерлік технологиялар негізінде студенттердің *өздік жұмыстарын* ұйымдастыру және қамтамасыз ету үшін қажетті ақпараттық-білім беру ортасын құру болып табылады. Ақпараттық-білім беру ортасы бұл — білім беру процесі жүзеге асырылатын жалпы ақпараттық кеңістік. Мұндай ортаны құру үшін ақпараттық білім беру ресурстары, бағдарламалық құралдар, коммуникация құралдары және т.б. қажет. Оқытудың тиімді компьютерлік құралдарын құру — күрделі және көп еңбекті қажет ететін жұмыс. Жоғары кәсіптік білім беруде іргелі, арнайы, техникалық пәндерді сапалы заманауи оқу-әдістемелік қамтамасыз ету мәселесі ерекше өзекті болып табылады.

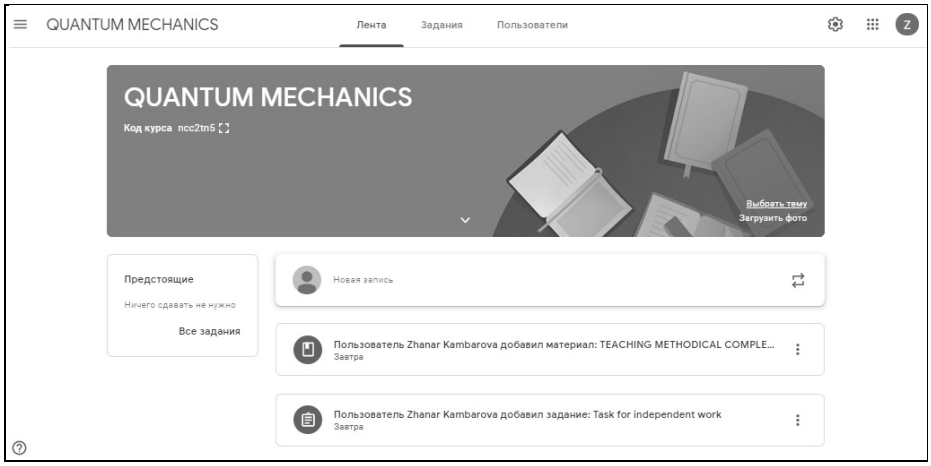
Өздік жұмыс дегеніміз — студенттің жоспарланған жұмысы. Студенттер өздік жұмысты тапсырма бойынша, сонымен бірге оқытушының әдістемелік басшылығымен, бірақ тікелей қатысуынсыз орындайды. Заманауи құзыретті маманды дайындаудың құрамды бөліктерінің бірі ретінде өздік жұмыстың мақсаты — студенттердің үздіксіз өздігінен білім алу, кәсіби жетілдіру, шығармашылық және зерттеу іс-әрекеттіліктерінің қабілеттерін мен дағдыларын қалыптастыру болып табылады.

Оқытылатын пәндер бойынша студенттердің өздік жұмыстарын ұйымдастыру үшін Google Apps for Education платформасы таңдалды. Аталған бұлтты қосымшаларының көмегімен 6В011000 — «Физика» мамандығының студенттері үшін «Quantum mechanics» пәні бойынша оқу курсы әзірленді.

Кванттық теория қазіргі таңда физиктерді дайындауда негізгі теориялық пәндердің бірі болып табылады. Бұл пәндерді мықты білу — арнайы пәндерді табысты оқып-үйренудің қажетті шарты.

Кванттық механика физиканың ең күрделі жоғары дәрежедегі теориясы. Кванттық механика курсы физика мамандығының студенттері оқитын теориялық физиканың үшінші бөлімі болып табылады. Кванттық механика арнайы салыстырмалылық теориясымен және статистикалық физикамен бірге заманауи жаратылыстанудың іргетасын құрайтындығы белгілі.

Ресурс пәннің әрбір тақырыбы бойынша электрондық оқу материалдарын қамтиды және оқу процесінің әр түрлі құраушыларын (ақпарат алу, практикум, білімді тексеру) қолдауға бағытталған. Ұсынылған оқу курсы *Google Класс* қосымшасында жұмыс істейді, оның құрамына дәрістер курсы, дәрістерге арналған электронды презентациялар, дәрістер мен практикалық жұмыстардың жоспарлары, практикалық жұмыстарға арналған тапсырмалар, өздік жұмыстарға арналған тапрсырмалар, ұсынылған әдебиеттер тізімі, қосымша оқу материалдарына сілтемелер, ағымдық бақылау тестілері, емтихан сұрақтары, хабарландырулар және түсініктемелер кіреді (2-сур.).



2-сурет. Google Класс қосымшасының терезесі

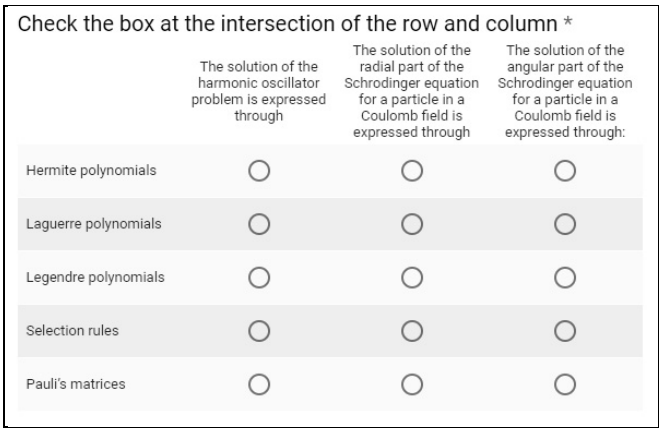
Студенттердің өздік жұмыстары келесі түрде ұйымдастырылуы мүмкін:

1. Теориялық материалды бұлтты сервисте орналастыру. Оқыту барысында оқытушы студенттерге материалды өз бетімен оқуға береді. Мысалы, егер тақырыпты қайталау керек болса, өткен материалға оралуға болады.

2. Тапсырмаларды орындау. Тапсырмаларды орындау барысында туындаған сұрақтарды оқытушымен бірге талқылау мүмкіндігі бар.

3. Сабақ тақырыбы бойынша тест тапсыру. Теория оқылғаннан кейін өткен оқу материалы бойынша тест тапсыру ұсынылады. Тест нәтижесі автоматты түрде электрондық кестеде көрсетіледі.

Білім алушылардың үлгерімін ағымдық бақылауды жүргізу үшін *Google Форма* қосымшасында пән бойынша тесттерді оңай құрастыруға болады. Тесттер ашық және жабық түрдегі тапсырмалардан тұрады. 3-суретте жабық түрдегі тапсырманың мысалы берілген, онда жауап ретінде жол мен баған қиылысындағы тордағы нүкте таңдалады.

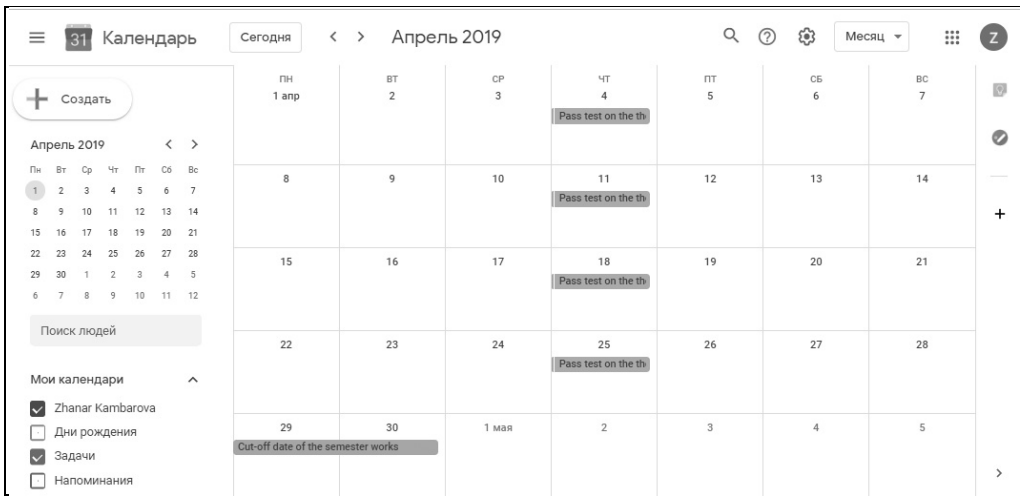


Check the box at the intersection of the row and column *

	The solution of the harmonic oscillator problem is expressed through	The solution of the radial part of the Schrodinger equation for a particle in a Coulomb field is expressed through	The solution of the angular part of the Schrodinger equation for a particle in a Coulomb field is expressed through:
Hermite polynomials	○	○	○
Laguerre polynomials	○	○	○
Legendre polynomials	○	○	○
Selection rules	○	○	○
Pauli's matrices	○	○	○

3-сурет. Google Форма қосымшасында тест тапсырмасының фрагменті

Сабақ кестесін, консультация және т.б. кестелерді құру және көру үшін ыңғайлы құрал — *Google күнтізбесі* болып табылады. Мысалы, кез келген пән немесе топ үшін көптеген күнтізбелерді жасау мүмкіндігі бар (4-сур.).



4-сурет. Google күнтізбесінің мысал үлгісі

Пән оқылғаннан кейін студенттерге анонимдік сауалнама сұрақтарына жауап беру ұсынылады, бұл сауалнама білім беру сапасын, сонымен бірге оқытуды ұйымдастыру және студенттердің пән бойынша алған білімдер мен дағдыларына қанағаттанушылығын бағалауға мүмкіндік береді. Сауалнама Google форма көмегімен дайындалған, онда респонденттердің жауаптары Google электрондық кестесінде сақталып, жауаптар жинағын диаграмма және кесте түрінде алу мүмкіндігі бар.

Сонымен Google сервистері қол жетімді ақпараттық технология құралдары бола отырып, оқу процесінің дәстүрлі формаларын қолдауға, сондай-ақ оларды жетілдіруге және жаңа шешімдер табуға мүмкіндік береді. Әрине, виртуалды білім беру ортасын құру — көп жоспарлы, еңбекті қажет ететін болса да, бірақ қажетті процесс. Білім беру кеңістігін ұйымдастыру жеке пәндер, кафедралар шеңберінде жүзеге асырылуы мүмкіндігі көрсетілген.

Әдебиеттер тізімі

1 Федорова Е.В. Использование облачных технологий Google Apps Education Edition для создания саморазвивающейся информационной платформы вуза / Е.В. Федорова, М.А. Гетьман, Е.В. Савельева // Информационные технологии. — 2012. — № 7. — С. 57–60.

2 Патаракин Е.Д. Анализ связей между сотрудниками школы на основе их взаимодействия в домене Google Apps для образования / Е.Д. Патаракин, Б.Б. Ярмахов // Образовательные технологии и общество. — 2016. — Т. 19, № 2. — С. 585–599.

3 Латипов О.О. Применение облачных технологий в образовательном процессе (на примере Google Apps for Education) / О.О., Латипов, С.Д. Храпов, Н.С. Графова, М.Г. Старичихин // Современные тенденции развития науки и технологий. — 2017. — № 1–2. — С. 23–27.

4 Ярмахов Б. Google Apps для образования: учеб. пос. / Б. Ярмахов, Л. Рождественская. — СПб.: Питер, 2015. — 224 с.

5 Справка Google. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://support.google.com

А.С. Кудусов, К.Б. Копбалина, Ж.Т. Камбарова, И.А. Кудусова

Создание информационно-образовательной среды для образовательных учреждений на основе сервисного пакета Google Apps

В статье рассмотрены вопросы формирования единой информационно-образовательной среды образовательного учреждения средствами сетевых сервисов. Создание информационно-образовательной среды с помощью пакета сервиса Google Apps для образования позволяет организовать продуктивную совместную деятельность преподавателей и учащихся. Изучены сервисы Google Apps и их возможно-

сти, суть облачных служб, а также дидактический потенциал в информационно-образовательном пространстве образовательного учреждения. Обоснованы преимущества построения информационно-образовательной среды на основе пакета сервиса Google Apps для образования. Авторами описан учебный курс, созданный в пакете сервиса Google Apps, по дисциплине «Quantum mechanics». Изучены возможности данного сервиса для организации самостоятельной работы студентов по указанной дисциплине.

Ключевые слова: образовательные учреждения, информационно-образовательная среда, информационно-образовательное пространство, управление образованием, сервисный пакет Google Apps.

A.S. Kudussov, K.B. Kopbalina, Zh.T. Kambarova, I.A. Kudussova

Development of the information educational environment for educational institutions based on Google Apps services

The subject of this article is the informational and educational environment of an educational institution. In the article issues of the formation of a unified information and educational environment of an educational institution by means of network services were considered. Creating an informational and educational environment by using Google Apps services for education allows to organize productive united activities of teachers and students. Google Apps services and their capabilities, the essence of cloud services, as well as the didactic potential in the information and educational space of an educational institution were considered. The advantages of creating an information and educational environment based on the Google Apps services for education were justified. The possibilities of this service for the organization of students' independent work on this discipline were studied.

Keywords: educational institutions, information-educational environment, information-educational space, education management, Google Apps services.

References

1 Fedorova, E.V., Getman, M.A., & Savelieva, E.V. (2012). Ispolzovanie oblachnykh tekhnolohii Google Apps Education Edition dlia sozdaniia samorazvivaiushcheisia informatsionnoi platformy vuza [Using cloud technologies of Google Apps Education Edition to creation a self-developing information platform for a university]. *Informatsionnye tekhnolohii — Information Technologies, 7,* 57–60 [in Russian].

2 Patarakin, E.D., & Yarmakhov, B.B. (2016). Analiz sviazei mezhdu sotrudnikami shkoly na osnove ikh vzaimodeistviia v domene Google Apps dlia obrazovaniia [Analysis of the links between the school staff based on their interaction in the Google Apps domain for education]. *Obrazovatelnye tekhnolohii i obshchestvo — Educational technologies and society, 19, 2,* 585–599 [in Russian].

3 Latipov, O.O., Khrapov, S.D., Grafova, N.S., & Starichikhin M.G. (2017). Primenenie oblachnykh tekhnolohii v obrazovatelnom protsesse (na primere Google Apps for Education) [The use of cloud technologies in the educational process (for example, Google Apps for Education)]. *Sovremennye tendentsii razvitiia nauki i tekhnolohii — Modern trends in the development of science and technology, 1–2,* 23–27 [in Russian].

4 Yarmakhov, B., & Rozhdestvenskaya, L. (2015). *Google Apps dlia obrazovaniia [Google Apps for Education]*. Saint Petersburg: Piter [in Russian].

5 Spravka Google [Google help]. *support.google.com* [in Russian].

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT AUTHORS

Akylbekov, A. — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Alpyssova, G. — PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Amangeldikyzy, A. — PhD student, Karaganda State Technical University, Kazakhstan.

Baisagov, Ya.Zh. — Engineer, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Balabekov, K. — Candidate of physical and mathematical sciences, Assistant professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Bolatbekova, M.M. — Master student, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Dauletbekova, A. — Candidate of physical and mathematical sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Golkovskii, M. — Candidate of chemical sciences, Head of Laboratory, Scientific Research Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia.

Góralski, P. — Master of Science, Researcher, Council of Gravity Research, Unit of Analysis Celestial Mechanics, Poland.

Grosheva, O. — Senior Lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine.

Guchenko, S.A. — Junior scientist, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Yerzhanov, K.K. — Candidate of physical and mathematical sciences, PhD, Associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Yurov, V.M. — Docent, Candidate of physical and mathematical sciences, Ye.A. Buketov Karaganda State University.

Kambarova, Zh.T. — PhD, Docent, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Karabekova, D.Zh. — PhD, Docent, Ye.A.Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Karipbaev, Zh. — PhD, Acting assistant professorof, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Khassenov, A.K. — PhD, Docent, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Kopbalina, K.B. — Master, Senior lecturer, Karaganda State Technical University, Kazakhstan.

Kozlovskii, A. — PhD, Head of the Laboratory, Institute of Nuclear Physics, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Kudussov, A.S. — Candidate of physical and mathematical sciences, Head of the Department, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Kudussova, I.A. — Student, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Lisitsyn, V. — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Tomsk Polytechnic University, Russia.

Lisitsyna, L. — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Tomsk State University, Russia.

Mausymbayeva, A.D. — Candidate of technical sciences, PhD student, Karaganda State Technical University, Kazakhstan.

Meirambay, A. — Master of natural science, PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Mamenko, P. — Senior Lecturer, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Mateichuk, V. — Assistant of the department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Minkov, L.L. — Doctor of physical and mathematical sciences, professor, Tomsk State University, Russia.

Mussakhanov, D. — Graduate student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan; Tomsk Polytechnic University, Russia.

Mustafin, A. — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan.

Mustafin, E.S. — Doctor of chemical sciences, Professor, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Nosov, P. — Candidate of Technical Sciences, Docent, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Nussupbekov, B.R. — Candidate of technical sciences, Professor, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Nussupbekov, U.B. — PhD student, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Omarov, Kh.B. — Doctor of technical sciences, Professor, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Omerkulov, A.T. — Master student, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Popovych, I. — Doctor of psychology, Docent, Kherson State University, Ukraine.

Portnov, V.S. — Doctor of technical sciences, Professor, Karaganda State Technical University, Kazakhstan.

Razina, O.V. — PhD, Docent, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Sadenova, K.K. — Senior lecturer, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Shaimerdenova, K.M. — Candidate of technical sciences, Associate professor, Head of the Department, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Shanina, Z.K. — PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Stoev, M. — Associate professor, PhD, Doctor engineering, Southwestern University «Neophyte Rilski», Blagoevgrad, Bulgaria.

Szostek, K. — Student, AGH University of Science and Technology, Poland.

Szostek, R. — PhD, Eng., Doctor, Assistant professor, Rzeszow University of Technology, Poland.

Tanasheva, N.K. — PhD, Scientific secretary, Institute of Applied Mathematics, Karaganda, Kazakhstan.

Tleubergenova, A. Zh. — Teacher, Ye.A. Buketov Karaganda State University, Kazakhstan.

Tulegenova, A. — Candidate of technical sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

Usseinov, A. — PhD, Acting assistant professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Zinchenko, S. — Candidate of technical sciences, Senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

2019 жылғы «Қарағанды университетінің хабаршысында» жарияланған мақалалардың көрсеткіші. «Физика» сериясы

	№	б.
КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ		
Афанасьев Д.А., Ибраев Н.Х., Алихайдарова Э.Ж. Ag–TiO_2 наноқұрылымдарында зарядты тасымалдау және локалды плазмондық резонанс қасиеттері	3	8
Гученко С.А., Коваль Н.Н., Юров В.М., Крысина О.В., Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н. Ti-Cu көпқабатты плазмалық қаптамалардың құрылымы мен қасиеттері	1	8
Жумабеков А.Ж., Ибраев Н.Х., Селиверстова Е.В., Камалова Г.Б. TiO_2-GO нанокомпозиттік материалды алу мен оның электрфизикалық және оптикалық қасиеттерін зерттеу	2	54
Завгородний А.В., Аймуханов А.К., Зейниденов А.К., Ахатова Ж.Ж. Мыс фталоцианині қабыршағының фотоэлектрлік қасиеттеріне сыртқы магнит өрісінің әсерін зерттеу	1	18
Зейниденов А.К., Аймуханов А.К., Мухаметкали Т.М., Ишмуратова М.Ю., Тлеукенова С.У. Лазер сәулесімен сәулелендірілген бидай дәнінің спектрлік-люминесценттік қасиеттерін зерттеу	1	26
Карипбаев Ж., Мусаханов Д., Лисицын В., Алпысова Г., Голковский М., Лисицына Л., Тулегенова А., Акылбеков А., Даулетбекова А., Балабеков К., Козловский А., Усеинов А. Радиация өрісіндегі ИАГ және ИАГГ люминофорларының құрылымын зерттеу және синтездеу	4	24
Карицкая С.Г. Антрахинон ертінділерінде кеңістік бойынша біртекті емес люминесценцияның пайда болуына және өзгерісіне жарық әсерінен туындайтын синглет оттегі мен оттегі кешендердің ықпалы	1	32
Кутум Б.Б., Шайхова Г.Н. Екіөлшемді q-Тода тізбегінің q-солитондық шешімі	3	22
Мейрамбай А., Ержанов К.К. Янг-Бакстер теңдеуінің әдістері арқылы алынған Шварцшильд деформацияланған метрикасының шешімдері	4	8
Мұстафин А. Модуляция сапалығына байланысты екі лазердің динамикасы	4	15
Сакенова Р.Е., Ердыбаева Н.К., Погребняк А.Д., Кылышканов М.К. Вакуумды-доғалық әдіспен алынған MoN(MoZr)ZrN және (TiMo)N/(TiMo), (CrZr)N/(CrZr) негізіндегі көпқабатты жабынды зерттеу	2	14
Темирбаева Д.А., Нурмаханова А.К., Селиверстова Е.В., Ибраев Н.Х. Жартылайөткізгішті полимерлер мен цианин бояғыштарының макромолекулаларының өзара әрекеттесуін зерттеу	1	44
Тлеукенов С.К., Жукенов М.К., Испулов Н.А. Электрмагниттік толқындардың анизотропты магнитэлектрлік орталарда таралуы туралы	2	29
Чиркова Л.В., Ермаганбетов К.Т., Маханов К.М., Рожкова К.С., Аринова Е.Т., Курмаш А. Туннельдік диодта тоқтың орнықсыздығы және электрондардың өздігінен ұйымдасуы	2	8
Чопуроглу Э., Мехметоглу Т. Биномиалдық жіктеу теоремасын қолдану арқылы Юлинг потенциалын аналитикалық жуықтап анықтау	3	17
Шалтаков С.Н., Кажикенова С.Ш., Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К., Стоев М. Жақын тәртіптің табиғатын есепке ала отырып балқыманың жоғары температуралы ағынының математикалық моделі	2	22
Шанина З.К., Разина О.В. Еркін бозондық ішектің модификацияланған модельдері және олардың шешімдері	4	30
Шостэк Р., Гуральски П., Шостэк К. Ньютонның гравитациясы мен жалпы салыстырмалылық теориясынан туындайтын гравитациялық толқындар (LIGO) кезіндегі гравитация толқыны	4	39
Юров В.М., Архипов В.В., Ранова Г.А., Лауринас В.Ч. Нанобөлшектердің термодинамикалық сипаттамаларының мөлшеріне тәуелділіктерін зерттеу	2	35
Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н. Металдардың беткі қабатындағы құрылымдық фазалық өту	1	50
Юров В.М., Еремин Е.Н., Лауринас В.Ч., Қасымов С.С. Трибологиядағы диссипативтік үрдістер	2	42
ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ		
Маусымбаева А.Д., Байсагов Я.Ж., Портнов В.С., Юров В.М., Гученко С.А., Амангелдіқызы А. Шұбаркөл кен орны көмірлеріндегі темір оксидін анықтау	4	57
Мехтиев А.Д., Ким П.М., Югай В.В., Алькина А.Д. Электрвакуум жылыту элементтері	3	27

Сатыбалдин А.Ж., Нүсіпбеков Б.Р., Айтпаева З.К., Фэнъюнь Ма, Омаров Н.Н. Мұнай құбырлары арқылы тасымалданатын мұнай өнімдерінің физика-химиялық қасиеттерін жақсартуға арналған үшэлектродты электрразрядты қондырғының әсері 1 61

Танашева Н.К., Миньков Л.Л., Тлеубергенова А.Ж., Саденова К.К. Математикалық модельдеу негізінде сулы-көмірлі отынның жағу технологиясын есептеу 4 63

Хасенов А.К., Нүсіпбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Стоев М., Булкаирова Г.А., Құлжанбеков А.Т. Электргидравликалық әдіспен жылутарату құбырларын қатты қалдықтардан тазалау 1 67

Хасенов А.К., Нүсіпбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Стоев М., Зейнолла Б.К., Муратова А.К. Тұрғындарды жылумен және ыстық сумен жабдықтауда жылу энергиясының шығындарын үнемдеу.. 2 61

Шаймерденова К.М., Шрагер Э.Р., Тусыпбаева А.С., Наушарбан Ж.К. Тік орналасқан жылуалмастырғыштардағы жылу алмасу үрдістерін зерттеу..... 2 66

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

Гевко И., Ляшук О., Сокил М., Слободян Л., Гудь В., Вовк Ю. Винттік жүктиегіштің қозғалмалы жұмыс бөлігінің резонанстық тербелісі..... 2 73

Жаутиков Б.А., Риад Таха Аль-Касасбех, Айкеева А.А., Ержанов А.Р., Аяганов А.К. Электрмагнитті көтерме қондырғысының барлық бағыттаушыларының ұзындығы бойынша скиптен қажетті саңылауды қамтамасыз ету үшін электрмагнитті ауыстырудың күшін анықтау..... 1 73

Зинченко С., Носов П., Матейчук В., Маменко П., Попович И., Грошева О. Көптеген мақсаттары бар автоматты айырылу жүйесін синтездеу, соның ішінде маневрлар 4 69

Кашканов А.А., Диордица В.Н., Кучерук В.Ю., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К., Шарзадин А.М. Шұғыл тежеу кезінде автокөлік дөңгелектерінің жолмен өзара әрекеттесуін инерциялық бағалау . 2 82

Клиновицкая И., Плотников С., Калыгулов Д., Лэ Ф. Қазақстандық кремний негізінде фотоэлектрлік түрлендіргіштердің қасиеттерін зерттеу 3 34

Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Кацыв С.Ш., Граняк В.Ф., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К. Синусоидалды токтың сызықты емес диодэлектрлік тізбегінде «детерминирленген хаос» құбылысының пайда болу шарттары..... 3 43

Кучерук В.Ю., Курытник И.П., Ошанов Е.З., Кулаков П.И., Семенов А.А., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К. Асинхронды қозғалтқыштың айналмалы моментінің динамикалық сипаттамаларын компьютерлік-өлшеу жүйесі..... 2 92

Мустафин Е.С., Омаров Х.Б., Шаймерденова К.М., Омеркулов А.Т. Бастапқы байланыстырушы затты қолдана отырып, көмір кесектерін алу 4 85

Нусупбеков Б.Р., Картбаева Г.Т., Стоев М., Хасенов А.К., Карабекова Д.Ж., Муратова А.К. Сүйек майын алудың электргидроимпульстік әдісі..... 2 101

Нүсіпбеков Б.Р., Хасенов А.К., Карабекова Д.Ж., Нүсіпбеков Ұ.Б., Стоев М., Болатбекова М.М. Сулы-көмірлі отын үшін көмірді электримпульсті әдісімен ұсақтау 4 80

Степаненко В.Ф., Жумадилов К.Ш., Хоши М., Жунусов Е.Т., Эндо С., Отаки М., Отани К., Фуджимото Н., Шичиджо К., Кавано Н., Сакагучи А., Чайжунусова Н.Ж., Шабдарбаева Д.М., Бауыржан А., Гныря В.С., Азимханов А.С., Каприн А.Д., Иванов С.А., Яськова Е., Белуха И., Колыженков Т., Петухов А.Д., Богачева В. Егеуқұйрықтардың альвеолярлық эпителийіне ^{56}Mn ішкі әсері кезіндегі кеңістіктік микродеңгейде мөлшерінің таралуын алдын ала бағалау 3 59

Танашева Н.К., Дюсембаева А.Н., Нусупбеков Б.Р., Миньков Л.Л., Нургалиева Ж.Г., Саденова К.К. Айналмалы қозғалыстағы цилиндрлердің аэродинамикалық коэффициенттерін зерттеу 2 108

Төлеуов Ғ., Исатаев М.С., Сейдулла Ж.Қ., Досанова А., Төлен Ж. Еркін турбулентті ағыншаны эксперименттік зерттеу..... 1 79

Шевчук Е.П., Нурумканов Д.К., Муратбеков Б.М., Ахметжанов Б., Плотников В.А. Муфельді пеште жану арқылы химиялық термиялық өңдеу әдісімен 20 болаттың бетін модификациялау..... 3 52

Якубова М.З., Сериков Т.Г. NetDoctor модулін қолдану арқылы OPNET Modeler v.14.5 қолданбалы бағдарламасы мен жүйенің қауіпсіздігін қамтамасыз ету 3 64

ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

Ильина Л.Ф., Каюмова А.С., Жаңбырбай Е.Р., Болатбекова М.М. Жоғарғы оқу орны курсында молекулалық физика бойынша физпрактикумның модернизация мәселесі..... 3 78

Искакова А.Б., Каирбаева А.К. Жобалық технологияларды ЖОО-ның техникалық мамандықтарында білім алатын студенттерге физиканы оқытуда қолданудың әдістемелік негіздері..... 3 71

Кудусов А.С., Копбалина Қ.Б., Камбарова Ж.Т., Кудусова И.А. Білім беру мекемелері үшін ақпараттық-білім беру ортасын Google Apps сервис пакетінің негізінде құрастыру 4 89

Разина О.В., Цыба П.Ю., Сагидуллаева Ж.М. $f(R)$-гравитациясының максвелдік мүшесі және g-эссенциялы үлгісінің дәрежелі шешімі 1 94

РАДИОФИЗИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА

Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Квадрупольді-цилиндрлік өрістің электронды-оптикалық сипаттамаларын есептеу 1 87

ЕСКЕ АЛУ

Ғылыммен ұштасқан ғұмыр..... 3 83

Указатель статей, опубликованных в «Вестнике Карагандинского университета» в 2019 году. Серия «Физика»

	№	с.
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ		
Афанасьев Д.А., Ибраев Н.Х., Алихайдарова Э.Ж. Перенос заряда и свойства локализованного плазмонного резонанса в наноструктурах Ag-TiO_2	3	8
Гученко С.А., Коваль Н.Н., Юров В.М., Крысина О.В., Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н. Структура и свойства многослойных плазменных покрытий Ti-Cu	1	8
Жумабеков А.Ж., Ибраев Н.Х., Селиверстова Е.В., Камалова Г.Б. Получение и исследование электрофизических и оптических свойств нанокомпозитного материала TiO_2–GO	2	54
Завгородний А.В., Аймуханов А.К., Зейниденов А.К., Ахатова Ж.Ж. Исследование влияния внешнего магнитного поля на фотоэлектрические свойства пленки фталоцианина меди	1	18
Зейниденов А.К., Аймуханов А.К., Мухаметкали Т.М., Ишмуратова М.Ю., Тлеукенова С.У. Исследование спектрально-люминесцентных характеристик семян пшеницы после облучения лазерным излучением	1	26
Карипбаев Ж., Мусаханов Д., Лисицын В., Алтысова Г., Голковский М., Лисицына Л., Тулегенова А., Акылбеков А., Даулетбекова А., Балабеков К., Козловский А., Усеинов А. Синтез, исследование структуры ИАГ и ИАГГ люминофоров в поле радиации	4	24
Карицкая С.Г. Фотосенсибилизированный синглетный кислород и кислородные комплексы в возникновении и изменении пространственно-неоднородной люминесценции в растворах антрахинона	1	32
Кутум Б.Б., Шайхова Г.Н. Q-солитонное решение двумерной цепочки q-Тоды	3	22
Мейрамбай А., Ержанов К.К. Решение деформированной метрики Шварцшильда методами уравнения Янга-Бакстера	4	8
Мустафин А. Динамика двух лазеров, связанных взаимной модуляцией добротности	4	15
Сакенова Р.Е., Ердыбаева Н.К., Погребняк А.Д., Кылышканов М.К. Исследование многослойных покрытий на основе MoN(MoZr)ZrN и (TiMo)N/(TiMo), (CrZr)N/(CrZr), полученных методом вакуумного-дугового осаждения	2	14
Темирбаева Д.А., Нурмаханова А.К., Селиверстова Е.В., Ибраев Н.Х. Исследование взаимодействия макромолекул полупроводниковых полимеров и цианинового красителя	1	44
Тлеукенов С.К., Жукенов М.К., Испулов Н.А. О распространении электромагнитных волн в анизотропных магнитоэлектрических средах	2	29
Чиркова Л.В., Ермаганбетов К.Т., Маханов К.М., Рожкова К.С., Аринова Е.Т., Курмаш А. Явления неустойчивости тока в туннельном диоде и процессы самоорганизации электронов	2	8
Чопуроглу Э., Мехметоглу Т. Аналитическая оценка потенциала Юлинга с использованием теорем биномиального разложения	3	17
Шалтаков С.Н., Кажикенова С.Ш., Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К., Стоев М. Математическая модель высокотемпературного течения расплава с учетом природы ближнего порядка	2	22
Шанина З.К., Разина О.В. Модифицированные модели свободной бозонной струны и их решения	4	30
Шостэк Р., Гуральски П., Шостэк К. Гравитационные волны в гравитации Ньютона и критика гравитационных волн, вытекающих из общей теории относительности (LIGO)	4	39
Юров В.М., Архипов В.В., Ранова Г.А., Лауринас В.Ч. Исследование размерных зависимостей термодинамических характеристик наночастиц	2	35
Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н. Структурный фазовый переход в поверхностном слое металлов	1	50
Юров В.М., Еремин Е.Н., Лауринас В.Ч., Касымов С.С. Диссипативные процессы в трибологии	2	42
ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА		
Маусымбаева А.Д., Байсагов Я.Ж., Портнов В.С., Юров В.М., Гученко С.А., Амангелдыкызы А. Определение оксида железа в углях месторождения Шубарколь	4	57
Мехтиев А.Д., Ким П.М., Югай В.В., Алькина А.Д. Электровакуумные нагревательные элементы	3	27

Сатыбалдин А.Ж., Нусупбеков Б.Р., Айтпаева З.К., Фэнъюнь Ма, Омаров Н.Н. Влияние трехэлектродно-разрядных установок на улучшение физико-химических свойств нефтепродуктов, транспортируемых по нефтепроводам 1 61

Танашева Н.К., Миньков Л.Л., Тлеубергенова А.Ж., Саденова К.К. Расчет технологии сжигания водоугольного топлива на основе математического моделирования 4 63

Хасенов А.К., Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Стоев М., Булкаирова Г.А., Кулжанбеков А.Т. Очистка теплораспределительных труб электрогидравлическим способом от твердых отложений 1 67

Хасенов А.К., Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Стоев М., Зейнолла Б.К., Муратова А.К. Экономия расходов энергии тепла при обеспечении жильцов теплом и горячим водоснабжением 2 61

Шаймерденова К.М., Шрагер Э.Р., Тусыпбаева А.С., Наушарбан Ж.К. Исследование процессов теплообмена на вертикальных теплообменниках 2 66

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Гевко И., Ляшук О., Сокил М., Слободян Л., Гудь В., Вовк Ю. Резонансные колебания мобильного рабочего органа винтового загрузчика 2 73

Жаутиков Б.А., Риад Таха Аль-Касасбех, Айкеева А.А., Ержанов А.Р., Аяганов А.К. Определение силы отталкивания электромагнита для обеспечения необходимого зазора от скипа по всей длине направляющих электромагнитной подъемной установки 1 73

Зинченко С., Носов П., Матейчук В., Маменко П., Попович И., Грошева О. Синтез системы автоматического расхождения со многими целями, включая маневрирующие 4 69

Кашканов А.А., Диордица В.Н., Кучерук В.Ю., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К., Шарзадин А.М. Инерционная оценка взаимодействия автомобильных шин с дорогой при экстренном торможении 2 82

Клиновицкая И., Плотников С., Калыгулов Д., Лэ Ф. Исследование свойств фотоэлектрических преобразователей на основе казахстанского кремния 3 34

Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Кацыв С.Ш., Граняк В.Ф., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К. Условия возникновения явления «детерминированный хаос» в нелинейной диодэлектрической цепи синусоидального тока 3 43

Кучерук В.Ю., Курытник И.П., Ошанов Е.З., Кулаков П.И., Семенов А.А., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К. Компьютерно-измерительная система динамических характеристик крутящего момента асинхронного двигателя 2 92

Мустафин Е.С., Омаров Х.Б., Шаймерденова К.М., Омеркулов А.Т. Получение угольных брикетов с применением оригинального связующего вещества 4 85

Нусупбеков Б.Р., Картбаева Г.Т., Стоев М., Хасенов А.К., Карабекова Д.Ж., Муратова А.К. Электрогидроимпульсный метод извлечения костного жира 2 101

Нусупбеков Б.Р., Хасенов А.К., Карабекова Д.Ж., Нусупбеков У.Б., Стоев М., Болатбекова М.М. Измельчение угля электроимпульсным способом для водоугольного топлива 4 80

Степаненко В.Ф., Жумадилов К.Ш., Хоши М., Жунусов Е.Т., Эндо С., Отаки М., Отани К., Фуджимото Н., Шичиджо К., Кавано Н., Сакагучи А., Чайжунусова Н.Ж., Шабдарбаева Д.М., Бауыржан А., Гныря В.С., Азимханов А.С., Каприн А.Д., Иванов С.А., Яськова Е., Белуха И., Колыженков Т., Петухов А.Д., Богачева В. Предварительная оценка распределения дозы на пространственном микроуровне при внутреннем воздействии ^{56}Mn на альвеолярный эпителий крыс 3 59

Танашева Н.К., Дюсембаева А.Н., Нусупбеков Б.Р., Миньков Л.Л., Нургалиева Ж.Г., Саденова К.К. Исследование аэродинамических коэффициентов вращающихся цилиндров 2 108

Толеуов Г., Исатаев М.С., Сейдулла Ж.К., Досанова А., Толен Ж. Экспериментальное исследование свободной турбулентной струи 1 79

Шевчук Е.П., Нурумканов Д.К., Муратбеков Б.М., Ахметжанов Б., Плотников В.А. Модификация поверхности стали 20 методом химико-термической обработки отжигом в муфельной печи 3 52

Якубова М.З., Сериков Т.Г. Обеспечение безопасности сетей на основе пакета прикладных программ OPNET Modeler v.14.5 с использованием модуля NetDoctor 3 64

МЕТОДИКА ФИЗИКИ

Ильина Л.Ф., Каюмова А.С., Жанбырбай Е.Р., Болатбекова М.М. К модернизации физпрактикума по молекулярной физике в вузовском курсе 3 78

Искакова А.Б., Каирбаева А.К. Методические основы использования проектных технологий при обучении физике студентов технических специальностей вуза 3 71

Кудусов А.С., Копбалина К.Б., Камбарова Ж.Т., Кудусова И.А. Создание информационно-образовательной среды для образовательных учреждений на основе сервисного пакета Google Apps 4 89

Разина О.В., Цыба П.Ю., Сагидуллаева Ж.М. Степенное решение модели $f(R)$-гравитации с максвелловским членом и g-эссенцией 1 94

РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Расчет электронно-оптических характеристик квадрупольно-цилиндрического поля 1 87

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Жизнь, посвященная науке 3 83

Index of articles published in «Bulletin of the Karaganda University» in 2019. «Physics» Series

	№	p.
PHYSICS OF THE CONDENSED MATTER		
Afanasyev D.A., Ibrayev N.Kh., Alikhaidarova E.Zh. Charge transfer and properties of localized plasmon resonance in Ag-TiO_2 nanostructures	3	8
Chirkova L.V., Ermaganbetov K.T., Makhanov K.M., Rozhkova K.S., Arinova E.T., Kurmash A. Current instability phenomena in a tunnel diode and electron self-organization processes	2	8
Çopuroğlua E., Mehmetoğlu T. Analytical evaluation of the Uehling potential using binomial expansion theorems	3	17
Guchenko S.A., Koval N.N., Yurov V.M., Krysina O.V., Laurinas V.Ch., Zavatskaya O.N. Structure and properties of multilayer plasma Ti-Cu coatings	1	8
Karipbaev Zh., Musakhanov D., Lisitsyn V., Alpyssova G., Golkovskii M., Lisitsyna L., Tulegenova A., Akylbekov A., Dauletbekova A., Balabekov K., Kozlovskii A., Usseinov A. Synthesis, the study of the structure of YAG and YAGG phosphors in the radiation field	4	24
Karitskaya S.G. Photosensitized singlet oxygen and oxygen complexes in the occurrence and change of spatially inhomogeneous luminescence in solutions of anthraquinone	1	32
Kutum B.B., Shaikhova G.N. Q-soliton solution for two-dimensional q-Toda lattice	3	22
Meirambay A., Yerzhanov K.K. Solution of the deformed Schwarzschild metric by the Yang-Baxter equation	4	8
Mustafin A. Dynamics of two lasers coupled via mutual cavity-loss modulation	4	15
Sakenova R.E., Erdybaeva N.K., Pogrebnjak A.D., Kylyshkanov M.K. The study of multilayer coatings based on MoN(MoZr)ZrN and (TiMo)N/(TiMo), (CrZr)N/(CrZr) obtained by the method of vacuum-arc deposition	2	14
Shaltakov S.N., Kazhikenova S.Sh., Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K., Stoev M. Mathematical model of high-temperature melt flow with account for short-range order nature	2	22
Shanina Z.K., Razina O.V. Modified models of a free boson string and their solutions	4	30
Szostek R., Góralski P., Szostek K. Gravitational waves in Newton's gravitation and criticism of gravitational waves resulting from the General Theory of Relativity (LIGO)	4	39
Temirbayeva D.A., Nurmakhanova A.K., Seliverstova E.V., Ibrayev N.Kh. Investigation of the interaction of macromolecules of semiconductor polymers and cyanine dye	1	44
Tleukenov S.K., Zhukenov M.K., Ispulov N.A. Propagation of electromagnetic waves in anisotropic magnetoelectric medium	2	29
Yurov V.M., Arkhipov V.V., Ranova G.A., Laurinas V.Ch. Study of dimensional dependencies of thermodynamic characteristics of nanoparticles	2	35
Yurov V.M., Eremin E.N., Laurinas V.Ch., Kasimov S.S. Dissipative processes in tribology	2	42
Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch., Zavatskaya O.N. Structural phase transition in surface layer of metals	1	50
Zavgorodniy A.V., Aimukhanov A.K., Zeinidenov A.K., Akhatova Zh.Zh. Study of the effect of an external magnetic field on the photoelectric properties of a copper phthalocyanine film	1	18
Zeinidenov A.K., Aimuhanov A.K., Mukametkali T.M., Ishmuratova M.Yu., Tleukenova S.U. Study of spectral and luminescent characteristics of wheat seeds after laser radiation	1	26
Zhumabekov A.Zh., Ibrayev N.Kh., Seliverstova E.V., Kamalova G.B. Preparation and study of electrophysical and optical properties of TiO_2-GO nanocomposite material	2	54
THERMOPHYSICS AND THEORETICAL THERMOENGINEERING		
Khassenov A.K., Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Stoev M., Bulkairova G.A., Kulzhanbekov A.T. Cleaning of heat distribution tubes by electrohydraulic method from solid waste	1	67
Khassenov A.K., Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Stoev M., Zeinolla B.K., Muratova A.K. Saving of heat energy costs while providing residents with heat and hot water	2	61

Mausymbayeva A.D., Baisagov Ya.Zh., Portnov V.S., Yurov V.M., Guchenko S.A., Amangeldikyzy A. Measuring the iron oxide in Shubarkol deposit coal 4 57

Mekhtiyev A.D., Kim P.M., Yugay V.V., Alkina A.D. Electrovacuum heating elements 3 27

Satybaldin A.Zh., Nussupbekov B.R., Aytpaeva Z.K., Fengyun Ma, Omarov N.N. The effect of three-electrode installations on the improvement of the physicochemical properties of petroleum products transported via pipelines 1 61

Shaimerdenova K.M., Schrager E.R., Tussypbaeva A.S., Nausharban Zh.K. Investigation of heat exchange processes in vertically arranged heat exchangers 2 66

Tanasheva N.K., Minkov L.L., Tleubergenova A.Zh., Sadenova K.K. Calculation of coal-water fuel combustion technology based on mathematical modeling 4 63

TECHNICAL PHYSICS

Hevko I., Lyashuk O., Sokil M., Slobodian L., Hud V., Vovk Yu. Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader 2 73

Kashkanov A.A., Diorditsa V.M., Kucheruk V.Yu., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K., Sharzadin A.M. Inertial evaluation of the tyre-road interaction during emergency braking 2 82

Klinovitskaya I., Plotnikov S., Kalygulov D., Lay P. The investigation of the properties of solar cells based on Kazakhstan silicon 3 34

Kucheruk V.Yu., Kurytnik I.P., Oshanov Ye.Z., Kulakov P.I., Semenov A.A., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. Computer-measuring system of the induction motor's dynamical torque-speed characteristics 2 92

Kukharchuk V.V., Kucheruk V.Y., Katsyv S.Sh., Hraniak V.F., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. Conditions for «deterministic chaos» phenomenon occurrence in a non-linear rl-diode electric circuit of sinusoid current 3 43

Mustafin E.S., Omarov Kh.B., Shaimerdenova K.M., Omerkulov A.T. Production of coal briquettes using the original binder 4 85

Nussupbekov B.R., Kartbaeva G.T., Stoev M., Khassenov A.K., Karabekova D.Zh., Muratova A.K. Electrohydroimpulse method of extracting bone grease 2 101

Nussupbekov B.R., Khassenov A.K., Karabekova D.Zh., Nussupbekov U.B., Stoev M., Bolatbekova M.M. Coal pulverization by electric pulse method for water-coal fuel 4 80

Shevchuk E.P., Nurumkanov D.K., Muratbekov B.M., Ahmetzhanov B., Plotnikov V.A. Surface modification of steel 20 by the method of chemical-thermal treatment by annealing in a muffle furnace 3 52

Stepanenko V.F., Zhumadilov K.Sh., Hoshi M., Zhunussov Y.T., Endo S., Ohtaki M., Otani K., Fujimoto N., Shichijo K., Kawano N., Sakaguchi A., Chaizhunusova N.Z., Shabdarbaeva D.M., Baurzhan A., Gnyrya V.S., Azimkhanov A.S., Kaprin A., Ivanov S., Yaskova E., Belukha I., Kolyzhenkov T., Petukhov A.D., Bogacheva V. Preliminary assessment of dose distribution on the spatial micro level for internal exposure of alveolar epithelium of rats by ^{56}Mn 3 59

Tanasheva N.K., Dyusembaeva A.N., Nussupbekov B.R., Min'kov L.L., Nurgalieva Zh.G., Sadenova K.K. The study of the aerodynamic coefficients of rotating cylinders 2 108

Toleuov G., Isataev M.S., Seidulla Zh.K., Dosanova A., Tolen Zh. Experimental study of free turbulent jet. 1 79

Yakubova M.Z., Serikov T.G. For the security of telecommunication networks on the application program package OPNET Modeler v.14.5 and the use of the «NetDoctor» module 3 64

Zhautikov B.A., Riad Taha Al-Kasasbeh, Aikeyeva A.A., Yerzhanov A.R., Ayaganov A.K. Determination of the repulsive force of an electromagnet to provide the necessary clearance from the skip along the entire length of guides of electromagnetic lifting installation 1 73

Zinchenko S., Nosov P., Mateichuk V., Mamenko P., Popovych I., Grosheva O. Automatic collision avoidance system with many targets, including maneuvering ones 4 69

METHODOLOGY OF PHYSICS

Ilina L.F., Kayumova A.S., Zhangbyrbaj Ye.R., Bolatbekova M.M. To modernization of physical practicum on molecular 3 78

Iskakova A.B., Kairbayeva A.K. Methodical foundations of the use of project-based technologies in teaching physics to students of technical specialties of higher education institutions 3 71

Kudussov A.S., Kopbalina K.B., Kambarova Zh.T., Kudussova I.A. Development of the information educational environment for educational institutions based on Google Apps services 4 89

Razina O.V., Tsyba P.Yu., Sagidullayeva Zh.M. Power solution of the *f(R)*-gravity with Maxwell term and *g*-essence..... 1 94

RADIOPHYSICS AND ELECTRONICS

Saulebekov A.O., Trubitsyn A.A., Kambarova Zh.T. Calculation of electron-optical characteristics of a quadrupole-cylindrical field..... 1 87

IN MEMORY OF THE SCIENTIST

Life dedicated to science 3 83