



КӨБЕЕВ ЕРКІН ҚИНАЯТҰЛЫ

«Қарағанды университетінің хабаршысы –
Вестник Карагандинского университета»
ғылыми журналының бас редакторы

Құрметті әріптестер!

«Қарағанды университетінің хабаршысы» журналы заманауи интеллектуалды кеңістікті қалыптастырып, классикалық академиялық дәстүрлерді сақтауға бейімділік танытып отырған беделді ғылыми басылым болып табылады. Журнал беттерінде қазақстандық ғылым мен білім берудің тарихын бейнелейтін білім салалары мен бағыттарының дамуы үнемі көрініс табады.

Журналдың жетекші ғылыми басылым ретіндегі қалыптасуы Қарағанды мемлекеттік университетімен, оның бүгіні мен болашағымен тығыз байланысты.

Университеттің 40 жылдығы қарсаңында оқытушылар және қызметкерлер ұжымын осы мерейтоймен құттықтай отырып, біздің Отанымыз — Қазақстан Республикасы өркендеуіне қосқан үлесі, жаңа кәсіби жетістіктері мен ғылыми жаңалықтары мол болуына тілектеспін!

Уважаемые коллеги!

Журнал «Вестник Карагандинского университета» является авторитетным научным изданием, призванным сохранять классические академические традиции и формировать современное интеллектуальное пространство. На страницах журнала запечатлено развитие направлений и отраслей знания, отражающее историю казахстанской науки и образования.

Становление журнала как ведущего научного издания неразрывно связано с Карагандинским государственным университетом, его настоящим и будущим.

В год 40-летия университета поздравляю коллектив преподавателей и сотрудников со знаменательной датой и желаю новых профессиональных достижений и научных открытий на благо процветания нашей Родины — Республики Казахстан!

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, flowing letters.

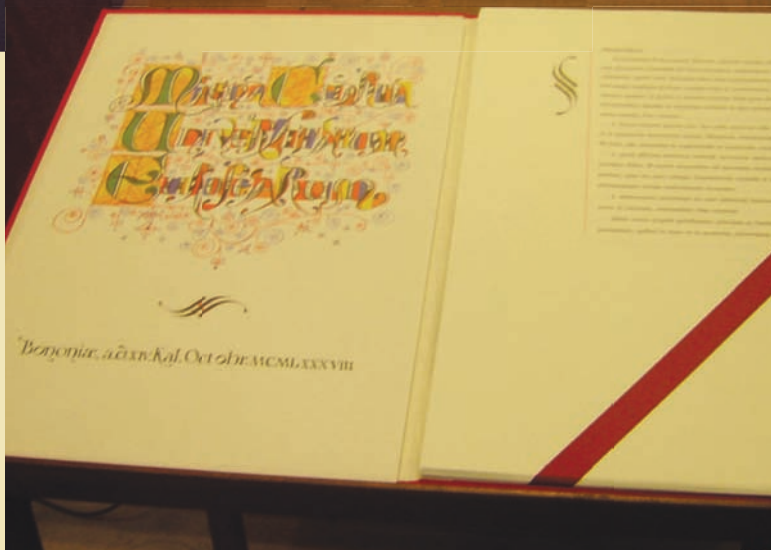


Карагандинский государственный университет имени Е.А. Букетова
100028, Республика Казахстан, город Караганда, ул. Университетская, 28

ISO 9001:2000

Предоставление образовательных услуг в области довузовской подготовки, высшего, послевузовского и дополнительного профессионального образования, проведение научно-исследовательских работ, организация воспитательного процесса, издательская деятельность и обеспечение социальной инфраструктуры

Emil Bekov S. Dumbayev



ҚАРАҒАНДЫ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК

КАРАГАНДИНСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 0142-0843

ФИЗИКА сериясы
№ 4(64)/2011
Серия ФИЗИКА

Қазан–қараша–желтоқсан
1996 жылдан бастап шығады
Жылына 4 рет шығады

Октябрь–ноябрь–декабрь
Издается с 1996 года
Выходит 4 раза в год

Собственник РГКП **Қарагандинский государственный университет
имени Е.А.Букетова**

Бас редакторы — Главный редактор

Е.К.КУБЕЕВ,

академик МАН ВШ, д-р юрид. наук, профессор

Зам. главного редактора

Х.Б.Омаров, д-р техн. наук

Ответственный секретарь

Г.Ю.Аманбаева, д-р филол. наук

Серияның редакция алқасы — Редакционная коллегия серии

К.К.Кусайынов,

Т.А.Кокетайтеги,

Н.Х.Ибраев,

А.О.Саулебеков,

Л.М.Ким,

К.М.Арынгазин,

И.В.Брейдо,

С.Д.Джуманов,

М.М.Кидибаев,

З.Ж.Жанабаев,

Г.В.Климушева,

С.А.Кумеков,

В.М.Лисицын,

И.А.Огородников,

Г.И.Пилипенко,

С.В.Плотников,

Л.А.Пунг,

А.Ж.Турмухамбетов,

К.Ш.Шункеев,

Л.В.Чиркова,

редактор д-р техн. наук;

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук

д-р пед. наук;

д-р техн. наук;

д-р физ.-мат. наук (Узбекистан);

д-р физ.-мат. наук (Кыргызстан);

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук (Украина);

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук (Россия);

д-р физ.-мат. наук (Россия);

д-р физ.-мат. наук (Россия);

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук (Эстония);

д-р физ.-мат. наук;

д-р физ.-мат. наук;

ответственный секретарь

канд. техн. наук, доцент

Редакторы *Ж.Т.Нұрмұханова*

Редактор *И.Д.Рожнова*

Техн. редактор *Д.Н.Муртазина*

Издательство Карагандинского
государственного университета
им. Е.А.Букетова

100012, г. Караганда,

ул. Гоголя, 38,

тел., факс: (7212) 51-38-20

e-mail: izd_kargu@mail.ru

Басуға 28.12.2011 ж. қол қойылды.

Пішімі 60×84 1/8.

Офсеттік қағазы.

Көлемі 13,87 б.т.

Таралымы 300 дана.

Бағасы келісім бойынша.

Тапсырыс № 698.

Подписано в печать 28.12.2011 г.

Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная.

Объем 13,87 п.л. Тираж 300 экз.

Цена договорная. Заказ № 698.

Отпечатано в типографии
издательства КарГУ
им. Е.А.Букетова

Адрес редакции: 100028, г. Караганда, ул. Университетская, 28

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

E-mail: vestnick_kargu@ksu.kz. Сайт: <http://www.ksu.kz>

© Карагандинский государственный университет, 2011

Зарегистрирован Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство № 1131–Ж от 10.03.2000 г.

МАЗМҰНЫ

Түлектер құттықтаулары.....	6
Қарағанды мемлекеттік университеті: тарихы мен бүгінгі күні.....	9
Физика факультеті: даму және қалыптасу кезеңдері.....	12
«Қарағанды университетінің хабаршысы» журналының «Физика» сериясы жайлы.....	17

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

<i>Жарекешев И.Х.</i> Металл-изолятор фазалық ауысуын зерттеу үшін Андерсон моделін қолдану.....	19
<i>Ким Л.М., Кокетайтегі Т.Ә., Сәлкеева А.Қ., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С.</i> K_2SO_4-Sm кристалдарындағы ТСЛ шындырының табиғаты.....	24
<i>Украинец В.Н., Тілеулесов А.К.</i> Серпінді жартылай кеңістікте екі қабатты қабықшаның ішкі жағынан мерзімдік жүктеменің қозғалысы..	29

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

<i>Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Ким П.М., Белик Г.А.</i> Тиімді жылу сақтаушысы және энергия сақтайтын радиаторы бар жылуды қамтамасыздандыру жүйесі.....	40
---	----

РАДИОФИЗИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Исмайылов Ж.Т., Шелухин Е.Н., Сериков Т.М., Закиев Д.М.</i> Автоматты реттеу жүйесі үшін электр сүзгі синтезі.....	44
---	----

АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАЛАРЫ

<i>Дүйсембаева А.Н., Құсайынова А., Тұрғынов М.М., Таңсықбаева Н.К.</i> Айналмалы екі цилиндрлер жүйесінің аэродинамикасын эксперименталдық зерттеу.....	49
--	----

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

<i>Ақашев З.Т., Мехтиев А.Д.</i> Тау машина жасауының алдыңғы дамуындағы құрылымдық сұлба жасалуының оңтайлы алгоритмі.....	53
<i>Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н.</i> Көмір шахталарындағы қуыстарды желдетудің құрама сұлбасын математикалық тұрғыдан модельдеу.....	60

СОДЕРЖАНИЕ

Поздравления выпускников.....	6
Карагандинский государственный университет: история и современность.....	9
Физический факультет: этапы становления и развития.....	12
О серии «Физика» журнала «Вестник Карагандинского университета».....	17

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

<i>Жарекешев И.Х.</i> Применение модели Андерсона для описания фазового перехода металл-изолятор.....	19
<i>Ким Л.М., Кокетайтегі Т.А., Салькеева А.К., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С.</i> Природа пиков ТСЛ в кристаллах K_2SO_4-Sm	24
<i>Украинец В.Н., Тлеулесов А.К.</i> Движение периодической нагрузки по внутренней поверхности двухслойной оболочки в упругом полупространстве.....	29

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

<i>Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Ким П.М., Белик Г.А.</i> Системы теплоснабжения с энергосберегающими радиаторами и эффективными теплоносителями.....	40
--	----

РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Исмаилов Ж.Т., Шелухин Е.Н., Сериков Т.М., Закиев Д.М.</i> Синтез электрического фильтра для системы автоматического регулирования..	44
---	----

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

<i>Дюсембаева А.Н., Кусаиынова А., Тұрғынов М.М., Тансықбаева Н.К.</i> Экспериментальное исследование аэродинамики системы из двух вращающихся цилиндров.....	49
---	----

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

<i>Ақашев З.Т., Мехтиев А.Д.</i> Оптимальный алгоритм построения структурной схемы приоритетного развития горного машиностроения .	53
<i>Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н.</i> Математическое моделирование комбинированной схемы проветривания сети выработок угольной шахты.....	60

<i>Воробьев А.Е., Юров В.М., Портнов В.С.</i> Уран кендерінің қалдықтарындағы гидродинамикалық процестер мен ыдырау процестеріне табиғи факторлардың әсері	67	<i>Воробьев А.Е., Юров В.М., Портнов В.С.</i> Влияние природных факторов на гидродинамические процессы и процессы разрушения в отвалах урановых рудников	67
<i>Выжва С.А., Юров В.М., Портнов В.С., Рева М.В.</i> Пайдалы қазбалардың қорын бағалау үшін минералдардың физикалық қасиеттерін қолдану	78	<i>Выжва С.А., Юров В.М., Портнов В.С., Рева М.В.</i> Использование физических свойств минералов для оценки запасов полезных ископаемых	78
<i>Какенов К.С., Есенбаева Г.С.</i> Жарылыс әсерінен топырақ құрылымының бұзылу аймағын анықтау әдісі	87	<i>Какенов К.С., Есенбаева Г.С.</i> Метод определения зоны разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях	87
<i>Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кишлова А.А., Әлімов М.Ш.</i> Ұзақ мерзімді қолданыста болатын тау машиналарының конструкциясының беріктігін жоғарлату.....	90	<i>Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кишлова А.А., Алимов М.Ш.</i> Повышение прочности конструкций горных машин, находящихся в длительной эксплуатации.....	90
ФИЗИКАНЫҢ ӘДІСТЕМЕСІ		МЕТОДИКА ФИЗИКИ	
<i>Саулебеков А.О., Қамбарова Ж.Т., Түсіпбекова А.К.</i> Электростатикалық өрістегі зарядталған бөлшектердің қозғалысы мен көкжиекке бұрышпен лақтырылған дененің қозғалысы арасындағы ұқсастық	98	<i>Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Тусупбекова А.К.</i> Аналогия между движением заряженных частиц в электростатическом поле и движением тела, брошенного под углом к горизонту	98
АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР.....	103	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	103
2011 жылғы «Қарағанды университетінің хабаршысында» жарияланған мақалалардың көрсеткіші. «Физика» сериясы	105	Указатель статей, опубликованных в «Вестнике Карагандинского университета» в 2011 году. Серия «Физика»	105



Секретарь Карагандинского областного маслихата,
выпускник 1993 г.

Жумабеков Бейсенбай Куанышулы

Уважаемый Еркин Кинаятович!

Сердечно поздравляю Вас, профессорско-преподавательский состав и студентов со знаменательным событием — 40-летием государственного университета имени академика Е.А.Букетова.

Важнейшая общественная и культурная миссия университета реализуется в интеграции науки и образования, которая служит основой динамичного развития нашего общества.

Университет, следуя традициям классических университетов, сохраняет неизменно высокий уровень и фундаментальность университетского образования, является одним из лидеров просвещения, науки и культуры не только области, Казахстана, но и далеко за его пределами.

КарГУ сегодня — динамично развивающийся университет с неизменно высоким уровнем кадров высшей квалификации. Крупные ученые и педагоги достойно сумели сохранить и приумножить добрые традиции, заложенные первым ректором вуза Е.А.Букетовым, учеными и педагогами старшего поколения.

Как выпускник университета, горжусь тем, что учился и получил образование в этом замечательном вузе.

Желаю руководству, профессорско-преподавательскому составу и студентам университета доброго здоровья, успехов в работе и учебе, счастья и благополучия.



Ректор Современного гуманитарно-технического института,
выпускник 1976 г.

Мулдахметов Кабиден Зиядович

*Уважаемые преподаватели, сотрудники и студенты
физического факультета Карагандинского государственного
университета имени академика Е.А.Букетова!*

Примите самые искренние поздравления с 40-летним юбилеем университета. Всем известно, что наш университет с момента создания и по настоящее время является флагманом образования и науки в Казахстане. Выпускники университета трудятся в различных сферах отраслей Казахстана и за рубежом, своими знаниями и достижениями поднимая престиж родного вуза. Все это достигнуто благодаря добросовестному и чуткому отношению, знаниям профессорско-преподавательского состава и сотрудников университета.

Как выпускник физического факультета, благодарю своих преподавателей за знания и воспитание, полученные во время учебы в университете. Желаю коллективу физического факультета мира, согласия, благополучия, крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов!



Генеральный директор ТОО «Теплотранзит» г. Караганды,
выпускник 2003 г.

Ляпунов Андрей Васильевич

*Дорогие преподаватели, сотрудники,
докторанты и магистранты физического факультета!
Дорогие студенты всех специальностей и направлений,
преданные физическому факультету!*

Первые слова поздравления хочу адресовать глубокоуважаемым коллегам, которые основали в далёком 1972 году физический факультет в Карагандинском государственном университете, и тем, кто работает на факультете сейчас.

Из истории факультета известно, что с первых лет его существования была установлена высокая планка для уровня научных исследований как фундаментального, так и прикладного характера, который в дальнейшем динамично рос и развивался. Научные статьи авторов в ведущих журналах, изобретения и опытные образцы, научный рост через защиту кандидатских и докторских диссертаций (судя по данным тех лет) — такому стилю и темпу работы карагандинских физиков могли позавидовать коллеги не только из молодых институтов и университетов, но и из более зрелых вузов. Хотелось бы отметить, что такую высокую планку физический факультет пронёс через десятилетия, включая и труднейший период конец 90-х годов.

Традиционно лучшие выпускники факультета продолжают образование в магистратуре, докторантуре и постепенно пополняют ряд преподавателей уважаемого факультета.

В завершение хочу пожелать студентам и магистрантам успехов в учебных и научных делах и, что не менее важно, личного счастья, ну а преподавателям и сотрудникам — умных, старательных и благодарных учеников.

Поздравляю всех преподавателей, сотрудников, докторантов, магистрантов, студентов и выпускников с сорокалетним юбилеем физического факультета!

Зам. директора АХО ТОО «Қарағанды Жарық»,
выпускник 1985 г.

Рахимов Орынбасар Тазабекович

Поздравляю Карагандинский государственный университет с 40-летним юбилеем.

С момента своего основания и по сей день КарГУ является одним из самых авторитетных и престижных вузов Казахстана. И такое лидерство в полной мере оправданно.

От всей души желаю Карагандинскому государственному университету им. Е.А. Букетова процветания и неуклонного роста, педагогическому коллективу — новых достижений и осуществления всех начинаний, студентам — успеха в обучении и профессионального становления и развития. Особую благодарность выражаю своему руководителю дипломной работы А.Ж.Турмухамбетову, К.К.Кусаинову (зав. кафедрой теплофизики). Светлая память моему бывшему куратору — Ж.С.Акылбаеву.



Заведующий лабораторией физико-химических методов исследования и электрокатализа Института органического синтеза и углехимии РК профессор, доктор химических наук, выпускник 1980 г.

Агельменов Максут Ельтаевич

Вот уже 40 лет авторитет ученых Карагандинского государственного университета, носящего имя его первого ректора Е.А.Букетова, их высокий научный уровень предопределили интеграцию в стенах этого вуза талантливых, творческих личностей. Это — Л.Ф.Ильина, С.С.Контаев, А.Ж.Турмухамбетов, К.М.Арынгазин, Л.К.Сейфуллина, К.К.Кусаинов, В.Е.Клочко, Ж.С.Акылбаев, Т.Е.Омаров, Б.С.Фиалков, Т.А.Кукетаев, К.Т.Ермаганбетов, К.З.Альжанов, С.Е.Сакипова и многие другие замечательные ученые.

Творческий импульс, полученный в годы студенчества, был, несомненно, источником сил, которые позволили мне успешно завершить учебу в аспирантуре Физического института АН СССР им. П.Н.Лебедева, а в дальнейшем выполнить работу в области физической химии жидких кристаллов. Я благодарен моей Alma mater — Карагандинскому государственному университету и его профессорско-преподавательскому коллективу. Желаю коллективу университета процветания, успехов во всех начинаниях!

Қарағанды мемлекеттік университеті: тарихы мен бүгінгі күні

Карагандинский государственный университет: история и современность



История и современность КарГУ им. Е.А.Букетова отражают этапы становления системы образования в Республике Казахстан, основные вехи развития высшей школы, сформированной в соответствии с принципами преемственности академических традиций, открытости современным инновациям и эффективности внедрения результатов научных исследований.

Фундаментом для организации Карагандинского государственного университета стал Педагогический институт, созданный в 1938 г. как Учительский. Это был единственный вуз в регионе, готовивший педагогические кадры, в которых остро нуждалась в то время молодая республика.

Основой Учительского института стали

5 кафедр (марксизма-ленинизма, языка и литературы, истории, педагогики и психологии, физ. воспитания), осуществлявших подготовку студентов по специальностям «история» и «филология» на казахском и русском языках. В числе направленных в институт специалистов были выпускники Ленинградского института им. Герцена и Казахского педагогического института им. Абая.

Тяжелым испытанием для коллектива института, как и для всего советского народа, явилась Великая Отечественная война. Большая группа преподавателей и студентов была призвана на фронт, многие ушли добровольно. В первые дни на защиту Родины ушли директор института Р.Иманкулов, преподаватели А.Аймагамбетов, П.Г.Лаптев, А.Нарешев, И.А.Колыванов и другие. Многие ушедшие на фронт пали смертью храбрых в боях за Родину.

Однако несмотря на суровое военное время, Учительский институт продолжал работать и развиваться. Вуз стал подлинной кузницей учительских кадров, и в послевоенные годы в институте были подготовлены более 1000 учителей, большая часть которых — представители казахской молодежи. В начале 50-х годов перед народным образованием республики ставились новые задачи, связанные с введением всеобщего семилетнего и среднего образования. Решение поставленных задач предопределило реорганизацию Карагандинского учительского института в Педагогический.

4 августа 1952 г. ректором учебного заведения был назначен доцент С.Б.Баймурзин, бессменно руководивший коллективом в течение 20 лет. В 1952 г. в институте функционировали факультеты: физико-математический, историко-филологический, естествознания, с казахским и русским отделениями.

О динамике развития института свидетельствуют данные об увеличении приема студентов и расширении структуры вуза: если в 1952 г. были приняты на первый курс 200 человек, то в 1971 г. — 625. К началу 70-х годов Карагандинский педагогический институт стал вузом первой категории, состоящим из 22 кафедр, 6 факультетов, на которых обучались 5 440 студентов. Преподавательским составом и руководством вуза была создана необходимая академическая и материально-техническая база для организации университета. 1 марта 1972 г., в соответствии с постановлением Совета Министров КазССР, на базе Карагандинского педагогического института был сформирован Карагандинский государственный университет. Ректором университета был назначен доктор технических наук, профессор, член-корреспондент АН КазССР, лауреат Государственной премии СССР Евней Арстанович Букетов.

С открытием университета началась новая страница в истории вуза. Перед профессорско-преподавательским составом встали задачи по совершенствованию форм учебно-методической, научной и воспитательной работы, по повышению качества подготовки специалистов.



плекс учебных и вспомогательных учреждений, учебным и научным оборудованием.

Показателем развития вуза стало создание еще 14 кафедр и увеличение преподавательского состава. Так, в 1980 г. численность преподавательского коллектива возросла до 502 человек, в числе которых 5 профессоров, докторов наук и 138 доцентов, кандидатов наук.

В 80-х годах университет развивается под руководством академика АН КазССР, доктора технических наук, профессора З.М.Мулдахметова (1980–1988) и доктора биологических наук, профессора А.Б.Бигалиева (1988–1991). 80-е годы в истории вуза стали определяющим этапом в преддверии становления университета как ведущего учебного заведения суверенного государства Республики Казахстан. В апреле 1991 г. университет возглавил профессор Ж.С.Акылбаев, проявивший себя как крупный ученый и организатор.

16 августа 1991 г. Постановлением Кабинета Министров Казахской ССР Карагандинскому государственному университету было присвоено имя его первого ректора — академика Е.А.Букетова.



(МАРУ). В апреле 1997 г. за достигнутые успехи в подготовке специалистов КарГУ принят коллективным членом в Международную академию наук высшей школы. В июле 1997 г. университет

Необходимым условием для реализации поставленных задач стал кадровый потенциал вуза. К началу учебного года в университете на 7 факультетах работали 280 преподавателей, из них 4 доктора наук, 82 кандидата наук. Страницы истории вуза в 70-е годы неразрывно связаны с именем первого ректора КарГУ академика АН КазССР, доктора технических наук Евнея Арстановича Букетова. Под руководством Е.А.Букетова в университете был сформирован прочный академический фундамент для развития учебно-методического и научно-исследовательского направлений деятельности. В эти годы закладывается и создается современная материальная база университета, включающая разветвленный комплекс специализированных лабораторий, оснащенных



В 90-е годы расширяется структура вуза. Так, в 1994 г. на базе отделения иностранных языков филологического факультета был открыт факультет иностранных языков. В январе 1995 г. был создан факультет повышения квалификации преподавателей. В 1996 г. в результате присоединения к КарГУ Педагогического института было образовано еще 4 факультета: педагогический, социальный, профессионально-художественный, физической культуры и спорта.

Свидетельством активного развития вуза становится расширение международных связей. В мае 1996 г. КарГУ стал членом Международной ассоциации руководителей университетов

утвержден в качестве действительного члена Евразийской ассоциации университетов. В августе 2002 г. КарГУ становится членом Международной ассоциации университетов, действующей под патронажем ЮНЕСКО.

В 2004 г. КарГУ возглавил доктор юридических наук, профессор Еркин Кинаятович Кубеев. Под его руководством осуществляется многосторонняя деятельность по формированию и укреплению статуса вуза как классического университета, внедряющего современные технологии обучения в соответствии с критериями национальной образовательной модели и высокими международными стандартами качества. Подтверждением тому стала международная аккредитация экономического факультета, получившего статус первого в Казахстане факультета, аккредитованного по международным стандартам. Показателем результативности внедрения инновационных технологий, высокого качества обучения стало вхождение университета в Великую Хартию Университетов в мае 2005 г., введение системы менеджмента качества ISO 9001:2000 и кредитной технологии обучения, прохождение государственной аттестации специальностей в 2008 г. В 2010 г. КарГУ успешно прошел институциональную аккредитацию образовательных специальностей. В сентябре 2011 г. осуществлен аудит программ «Химия/Бакалавр/Магистр», «Физика/Бакалавр» и «Экономика/Бакалавр» в рамках международной аккредитации.

Статус Карагандинского государственного университета имени академика Е.А.Букетова как старейшего и крупнейшего вуза нашей страны подтвержден темпами и объемом реализации образовательных программ, осуществляемых по 76 направлениям бакалавриата, 43 программам магистратуры и 4 образовательным программам докторантуры. В 2011 г. состоялся первый выпуск докторов PhD по направлениям: «Нанотехнологии и нелинейная физика», «Фармацевтическая химия», «Экономика и инновационное развитие», «Лингвистическая типология и контактология».

КарГУ — это современный образовательный комплекс, вошедший в первую пятерку многопрофильных университетов Генерального рейтинга вузов Казахстана, в мировой рейтинг лучших университетов GS Word Universities Rankings (601+), в тройку лучших вузов Казахстана мирового рейтинга Webomatrix. Он по праву является ведущим вузом Республики Казахстан, образовательным и научным центром, сохраняющим классические академические традиции и активно внедряющим современные образовательные инновации.

Физика факультеті: даму және қалыптасу кезеңдері

Физический факультет: этапы становления и развития

Физический факультет — один из ведущих факультетов Карагандинского государственного университета имени Е.А.Букетова.

На факультете ведется подготовка высококвалифицированных научно-педагогических и инженерных кадров, обладающих высокой адаптивностью в сфере профессиональной деятельности, способных успешно работать в различных отраслях и сферах образования, промышленности и бизнеса. Профессорско-преподавательский состав факультета проводит прикладные и фундаментальные исследования по физике.

Ориентиром для нашего факультета служат общепризнанные модели ведущих российских и зарубежных университетских школ, реализующих портфель многоуровневых образовательных программ и активно развивающих научные исследования.

В настоящее время физический факультет осуществляет подготовку по 6 специальностям. Сегодня на факультете по программам бакалавриата обучаются 400 человек, 80 % из них являются студентами очной формы обучения. Успешно реализуется многоступенчатая модель подготовки специалистов — функционирует магистратура и докторантура PhD.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция к росту числа студентов физического факультета, что, безусловно, связано с возрастающей ролью естественных и технических наук в современном мире и в этой связи с интересом молодежи к техническим и естественно-научным специальностям.

Физический факультет образовался на базе отделения физики, функционировавшего на физико-математическом факультете Карагандинского педагогического института с 1963 г. На нем обучались будущие учителя физики и общетехнических дисциплин. До 1966 г. деканом факультета был Т.К.Кельтенов, с 1966 по 1969 гг. — кандидат физико-математических наук, доцент В.Н.Нам, а с 1969 по 1972 гг. — кандидат физико-математических наук, доцент, а ныне доктор педагогических наук, профессор К.М.Арынгазин. На физическом отделении было две кафедры: кафедра физики (зав.кафедрой — доцент В.П.Усик) и кафедра общетехнических дисциплин (зав. кафедрой — Г.И.Рах, далее кандидат педагогических наук, доцент Б.М.Вахольский) с шестью лабораториями общего и двумя лабораториями специального практикума: лабораторией молекулярной спектроскопии, заведующим которой являлся З.М.Мулдахметов, ныне профессор, академик НАН РК, и лабораторией оптических явлений в кристаллах, ею заведовали кандидаты физико-математических наук, доценты Б.К.Кусаинова, а затем К.М.Арынгазин.

На кафедре физики работали Ж.С.Акылбаев, Б.Алешин, К.М.Арынгазин, А.Г.Виноградов, К.Т.Ермаганбетов, И.П.Жиленков, Г.К.Каратаева, Г.А.Кецле, Б.К.Кусаинова, Б.С.Какенов, В.Г.Иванчинова, М.Мадеев, В.Н.Ниханбаева и другие, на кафедре общетехнических дисциплин — А.Ф.Лепешкин, В.Е.Клочко, А.А.Тим, О.В.Прусаков и другие.

В соответствии с разработанной руководством, по инициативе ректора Педагогического института доцента С.Б.Баймурзина, специальной программой по подготовке научно-педагогических кадров высокой квалификации в целевую аспирантуру ведущих вузов страны были направлены лучшие выпускники и молодые преподаватели кафедры физики: в 1965 г. — Ж.С.Акылбаев, К.М.Арынгазин (КазГУ им. Кирова, Алматы), в 1967 г. — К.Т.Ермаганбетов (ИФП СО АН СССР, г. Новосибирск), Г.А.Кецле, Б.Алешин, М.Мадеев (МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва). Ряды преподавателей и сотрудников кафедры пополнили ее талантливые выпускники, отличники учебы: в 1965 г. — К.З.Альжанов, С.Д.Дарибеков, В.Ю.Еськова, М.Абишев, Ю.А.Сойников, в 1970 г. — Ю.Н.Антипов, В.Е.Гладков, С.С.Контаев, В.В.Брюханов.

В 1972 г. на базе Педагогического института был образован Карагандинский государственный университет, который в то время был вторым университетом республики. На физическом факультете функционировало уже пять кафедр, заведующими которыми были назначены молодые кандидаты наук: общей физики — Л.Ф.Ильина, теоретической физики — Ж.С.Акылбаев, оптических методов

исследования и анализа — А.И.Перевертун, радиоэлектроники — Л.А.Краусс, физики твердого тела — Т.А.Кукетаев.

По предложению первого ректора нового университета Евнея Арстановича Букетова К.М.Арынгазин стал первым деканом физического факультета КарГУ (1972–1974 гг.). За время работы в КарГУ им. Е.А.Букетова К.М.Арынгазин заведовал кафедрами теоретической физики, общей и теоретической физики, более 10 лет был деканом ФПК ОНО КарГУ, 7 лет занимал должность проректора по науке ИПК РО при КарГУ. В последующие годы факультетом руководили Ж.С.Акылбаев, А.И.Перевертун, Б.К.Кусаинова, Л.Ф.Ильина, Т.А.Кукетаев, А.Ж.Турмухамбетов, К.С.Бактыбеков, Н.Х.Ибраев, А.О.Саулебеков.

В начале 1980 г. на факультете была открыта новая кафедра — кафедра теплофизики. Теперь в составе физического факультета было уже шесть кафедр.

За время своего существования физический факультет прошел большой и сложный путь становления и развития. Ярче всего достижения проявились в профессиональном росте его сотрудников. Так, если в 1972 г. на двух физических кафедрах работали два кандидата наук — К.М.Арынгазин и Б.М.Вахольский и один доцент — В.П.Усик, то в настоящее время на факультете 7 докторов наук, профессоров и 22 кандидата наук, доцента.

Гордостью факультета, примером для молодых преподавателей, сотрудников и студентов являются наши заслуженные работники, ветераны труда:

– обладатель нагрудных знаков «Отличник образования КазССР», «Ибрай Алтынсарин» и «Заслуженный работник КарГУ» д.п.н., профессор К.М.Арынгазин;

– обладатели нагрудного знака «Почетный работник образования Республики Казахстан» и «Заслуженный работник КарГУ» д.ф.-м.н., профессор Т.А.Кукетаев; к.ф.-м.н., профессор К.Т.Ермаганбетов;

– обладатель нагрудного знака «За отличные успехи в работе» (Высшая школа СССР) и «Заслуженный работник КарГУ» к.ф.-м.н., профессор Л.Ф.Ильина;

– обладатель нагрудного знака «Почетный работник образования Республики Казахстан» д.т.н., профессор К.Кусаинов;

– лауреаты Государственной научной стипендии для ученых и специалистов, внесших выдающийся вклад в развитие науки и техники, д.ф.-м.н., профессор Т.А.Кукетаев, д.ф.-м.н., профессор Н.Х.Ибраев, д.ф.-м.н., профессор Л.М.Ким;

– обладатели нагрудных знаков «Заслуженный работник КарГУ» к.т.н., профессор С.Д.Дарибеков, к.т.н., доцент В.Е.Гладков.

О высоком профессионализме профессорско-преподавательского состава факультета свидетельствует тот факт, что 6 преподавателей в разные годы были удостоены государственных грантов «Лучший преподаватель вуза»: к.ф.-м.н., доцент С.Е.Сакипова (2005 г.), д.т.н., профессор К.Кусаинов и д.ф.-м.н., профессор Н.Х.Ибраев (2006 г.), д.ф.-м.н., профессор Т.А.Кокетайтеги (2007 г.), д.ф.-м.н., профессор А.О.Саулебеков (2009 г.), к.т.н., доцент Б.Р.Нусупбеков (2010 г.).

Традиции факультета с честью продолжают молодые преподаватели и сотрудники, среди которых хотелось бы отметить лауреата Государственной стипендии для талантливых молодых ученых д.ф.-м.н., доцента С.Г.Карстину; обладателей гранта РФФИ «Научная работа молодых ученых из стран СНГ в российских научных организациях» на проведение фундаментальных научных исследований магистра физики Д.А.Оспанову; к.х.н., доцента З.К.Айтпаеву; магистра техники и технологии А.К.Хасенова (2009–2010 уч. год); магистра физики Г.А.Булкаирову (2010–2011 уч. год); лауреата Государственной стипендии для талантливых молодых ученых и номинанта премии Акима Карагандинской области среди молодых ученых в номинации «Естественные науки» к.ф.-м.н. А.К.Аймуханова; докторанта PhD, обладателя гранта на проведение фундаментальных научных исследований Д.А.Афанасьева; докторанта PhD, номинанта премии Акима области среди молодых ученых в номинации «Естественные науки», победителя Республиканского конкурса на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам Е.В.Селиверстову; магистра физики, обладателя гранта Карагандинского государственного университета им. Е.А.Букетова на проведение фундаментальных научных исследований в Томском государственном университете Г.Е.Сейсенбек (2009 г.) и других.

Особенностью факультета является активное участие ППС в установлении прочных взаимоотношений с зарубежными вузами-партнерами. В частности, кафедры имеют тесные связи с такими известными научно-образовательными центрами, как Тартуский университет (Эстония), Гумбольдт-

ский университет (Берлин, Германия), Институт ядерной физики Академии наук Чешской Республики (Прага, Чехия), Рязанский государственный радиотехнический университет (Россия), КазНУ им. аль-Фараби, КГПУ им. Абая, Евразийский гуманитарный институт, Институт КАО им. И.Алтынсарина, Институт теплофизики СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Институт неорганической химии СО РАН, Институт прикладной механики НАН Беларуси, Томский государственный университет, Институт физики и прочности материалов СО РАН, Кемеровский государственный университет (Россия), Физико-технический институт МОН РК, Алматы, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Россия), Институт технической теплофизики (Украина).

Активное расширение перечня специальностей и направлений подготовки в рамках высшего и послевузовского образования — также один из наших приоритетов. В частности, КарГУ гарантирует обязательную (продолжительностью до трех месяцев) зарубежную стажировку для всех обучающихся в рамках магистратуры.

В настоящее время в составе физического факультета четыре кафедры:

- общей и теоретической физики (заведующий — к.ф.-м.н., доцент А.С.Кудусов);
- радиофизики и электроники (заведующий — к.ф.-м.н., доцент Ж.Т.Исмаилов);
- спектроскопии конденсированного состояния (заведующий — к.ф.-м.н., доцент В.Ч.Лауринас);
- инженерной теплофизики имени профессора Ж.С.Акылбаева (заведующий — д.т.н., профессор К.Кусаиынов);

Кафедра общей и теоретической физики — одна из старейших кафедр факультета и вуза, которая создана в 1972 г., в период образования Карагандинского государственного университета. Возглавила кафедру Лидия Федоровна Ильина — молодой кандидат наук. Она была приглашена из Алма-Аты первым ректором университета Евнеем Арстановичем Букетовым. Большинство преподавателей кафедры, совсем молодые в те годы, были лучшими выпускниками Педагогического института, на базе которого и основан университет. В разные годы кафедрой заведовали Л.Ф.Ильина, Ю.А.Сойников, С.С.Контаев, Т.Ж.Кунакбаев, Ю.Н.Антипов, М.К.Курманов, Т.М.Мукатов, А.Ж.Турмухамбетов, Н.Ж.Джайчибеков, К.М.Арынгазин, А.О.Саулебеков, С.Е.Сакипова.

На современном этапе большая часть учебно-методической работы лежит на плечах преподавателей кафедры — первые кейсы, УМК, переход на кредитную систему обучения, методические семинары при университете для учителей физики школ города и области по дидактическим принципам и новейшим образовательным технологиям, филиалы в школах и т.д.

На базе кафедры проведено несколько открытых олимпиад по физике для учащихся 10 и 11-х классов.

Кафедра располагает шестью учебными лабораториями: механики, молекулярной физики, электричества и магнетизма, методики преподавания физики, техники школьного эксперимента, физпрактикума для нефизических специальностей. Оборудование лабораторий кафедры широко используется не только в организации учебного процесса на факультете при проведении как общих, так и специальных курсов (кафедра стала выпускающей), при выполнении дипломных и курсовых работ, но и для проведения занятий учащихся профильных классов школ, при которых открыты филиалы кафедры (ШОД «Дарын», школа-гимназия № 93 г. Караганды, школа-гимназия № 92 г. Караганды), при проведении зачетных уроков студентами в период педагогической практики.

Кафедра радиофизики и электроники была организована на базе кафедры радиоэлектроники Карагандинского педагогического института, первым заведующим которой был к.п.н., доцент Б.М.Вахольский. Затем кафедру последовательно возглавляли к.т.н. Л.А.Краусс, к.ф.-м.н., профессор К.Т.Ермаганбетов, к.т.н., профессор Д.М.Муканов, к.х.н., доцент Т.М.Мукатов, к.т.н., профессор Л.В.Чиркова.

На начальной стадии в состав кафедры входило всего три лаборатории. В настоящее время студенты работают в 14 специализированных лабораториях. Подобное развитие за прошедшие годы было достигнуто благодаря тесным связям, установленным кафедрой с ведущими предприятиями Центрально-Казахстанского региона и научными регионами страны.

Одно из основных направлений деятельности кафедры — установление тесных связей с производством. Так, многолетнее сотрудничество с ОАО «Казчерметавтоматика» вылилось в организацию филиала кафедры при этой организации, инициатор — профессор К.Т.Ермаганбетов. Ведущие сотрудники ОАО непосредственно участвуют в организации учебного процесса, руководят курсовыми

и дипломными работами студентов. Эта организация является постоянной базой практики студентов, многие из которых получают впоследствии приглашения на работу.

Кафедра заключила договоры о техническом сотрудничестве с Карагандинским областным радиотелевизионным передающим центром, ЦЦ «Экоэксперт», ТОО «Тулпар», сотрудники которых также принимают непосредственное участие в организации учебного процесса.

Одной из первых кафедра начала внедрять в учебный процесс ЭВМ, были созданы лаборатории цифровой и микропроцессорной техники. Профессором К.Т.Ермаганбетовым были подготовлены первое в республике учебное пособие на казахском языке «Цифрлық электроника» и учебник «Электр және магнетизм» совместно с профессором Ж.С.Акылбаевым.

Большое внимание на кафедре уделяется работе со школьниками, пропаганде технических знаний. Силами кафедры были проведены 4 открытые городские и областные олимпиады школьников по электронике, которые затем получили статус республиканских, организован и проведен конкурс студенческих работ по электронике.

Политика кафедры в отношении формирования баз практики основана на создании условий для получения студентами практических навыков по всему комплексу изучаемых специальных дисциплин.

Логическим продолжением практики для многих студентов является выполнение курсовых и дипломных работ под руководством ведущих специалистов указанных организаций. После получения дипломов ряд выпускников получают приглашения на работу по специальности.

В 2008 г. на основании решения Ученого совета Карагандинского государственного университета им. Е.А.Букетова от 28 августа 2008 г. приказом ректора за № 793 были объединены кафедра физики твердого тела и кафедра оптики и спектроскопии. Объединенная кафедра была названа **кафедрой спектроскопии конденсированного состояния**.

Формально являясь самой молодой кафедрой физического факультета, кафедра спектроскопии конденсированного состояния вобрала в себя все то лучшее, что было создано за более чем 35-летнюю историю кафедр физики твердого тела и оптики и спектроскопии.

Кафедра физики твердого тела открыта приказом ректора Е.А.Букетова № 47 от 14 июля 1972 г. Заведовать кафедрой из Казахского педагогического института им. Абая был приглашен кандидат физико-математических наук Т.А.Кукетаев. На начальном этапе штат кафедры состоял из 4 преподавателей и одного лаборанта. По совету выдающегося ученого академика Ч.Б.Лущика, учитывая необходимость и важность привлечения учащейся молодежи к научным изысканиям, на кафедре была начата исследовательская работа в области физики диэлектриков и полупроводников.

Кафедра оптических методов исследования и анализа (первое название кафедры оптики и спектроскопии) также была открыта в Карагандинском государственном университете приказом ректора Е.А.Букетова № 47 от 14 июля 1972 г. Первым ее заведующим был назначен кандидат физико-математических наук, доцент А.И.Перевертун, который приехал из Алма-Аты по приглашению ректора университета Е.А.Букетова.

Кафедра — выпускающая, осуществляет фундаментальную подготовку молодых специалистов через бакалавриат, магистратуру, докторантуру.

Кафедра теплофизики была организована и создана в 1980 г. под руководством в то время декана, а позже ректора университета — академика МАН ВШ, доктора технических наук, профессора Ж.С.Акылбаева.

Открытие кафедры было обусловлено потребностями нашего достаточно холодного по климатическим условиям региона. Специалисты-теплофизики необходимы для решения проблем как фундаментальной теплофизической науки, так и прикладных задач: поиск новых нетрадиционных источников энергии, экономия энергоресурсов, оптимизация действующих технологий на предприятиях теплоэнергетики и т.д.

Первым заведующим кафедрой был назначен доцент (позже декан факультета профессор, д.ф.-м.н.) А.Ж.Турмухамбетов, чья трудовая деятельность неразрывно связана как с физическим факультетом, так и с кафедрой теплофизики. В разные годы кафедрой возглавляли профессора: Ж.С.Акылбаев, Н.Ж.Джайчибеков, К.К.Кусаиынов, Ю.Н.Антипов, М.К.Курманов, доцент Ю.Н.Щербаков. В июне 2008 г. кафедра была переименована в кафедру инженерной теплофизики им. профессора Ж.С.Акылбаева.

Студенты и магистранты кафедры принимают активное участие в научных исследованиях. Их работы не раз были удостоены грамот и дипломов международных и республиканских конференций и конкурсов студенческих работ.

Кафедра регулярно проводит международные научные конференции по теме «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». На базе кафедры и факультета состоялось пять международных конференций с участием ведущих ученых НИИ и вузов гг. Новосибирска, Томска, Кемерово, Екатеринбурга и т.д. Проводимая раз в 2 года конференция, вносит существенный вклад в развитие науки о нелинейных явлениях.

В завершение хотелось бы отметить не только высокую квалификацию профессорско-преподавательского состава физического факультета, но также уровень подготовки бакалавров, магистров и PhD докторов соответствующих специальностей, которые претендуют на различные стипендии и научные гранты.

Физический факультет нашего университета всегда был и остается незаменимой «кузницей» высококвалифицированных научных кадров, которые, как сегодня это, наконец, стало очевидным, и являются истинным богатством своей страны, способным принести ей процветание и гарантировать почетное место среди мировых держав с высоким уровнем научно-технологического развития.

Б.Р.Нусупбеков,
декан физического факультета
к.т.н., доцент

«Қарағанды университетінің хабаршысы» журналының «Физика» сериясы жайлы

О серии «Физика» журнала «Вестник Карагандинского университета»

Первый номер серии «Физика» журнала «Вестник Карагандинского государственного университета» в современном виде вышел в свет в 2004 г. (с апреля 1996 г. журнал выходил в двух сериях — по гуманитарным и естественным наукам).

С 2005 г. журнал входит в перечень изданий, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан для публикации результатов диссертационных исследований.

Тематика статей журнала была с самого начала достаточно разнообразна, отражает весь спектр научных направлений самой физической науки.

Само название серии «Физика» служит обоснованием для расширенного толкования его тематики в широком диапазоне актуальных разделов физики. В журнале традиционно публикуются статьи по физике конденсированного состояния, теплофизике и теоретической теплотехнике, радиофизике и электронике, ядерной физике, технической физике, методике физики. Поскольку физика суть наука экспериментальная, редколлегией серии сочла необходимым ввести в журнале также раздел «Приборы и техника эксперимента».

За время существования журнала на его страницах увидели свет статьи не только ученых университета, но и наших коллег из других вузов и научных учреждений Республики Казахстан и стран ближнего и дальнего зарубежья. Он стал общепризнанной трибуной актуальных физических и физико-технических проблем, таких как исследование фотофизических процессов в пленках, в том числе и наноразмеров, процессов массо- и теплопереноса, синергетических процессов в различных средах, альтернативных источников энергии и т.д.

На страницах серии детально изложены результаты многих исследований, ставших основой кандидатских, докторских диссертаций, а в настоящее время публикуются материалы диссертаций докторантов PhD и магистрантов.

Активно сотрудничают с журналом ученые физического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби, Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, Восточно-Казахстанского государственного университета им.С.Аманжолова, Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д.Серикбаева, Павлодарского государственного университета им. С.Торайгырова, Костанайского государственного университета им. А.Байтурсынова, Карагандинского государственного технического университета и других вузов Казахстана. Часто на страницах журнала появляются публикации сотрудников Томского государственного университета, Института угля СО РАН (г.Кемерово), Российского университета дружбы народов, Киевского национального университета им. Т.Г.Шевченко, Рязанского государственного радиотехнического университета, Института химии растворов РАН, Университета г. Тарту (Эстония), Института ядерной физики АН Чешской Республики.

В нашем журнале находят отражение наиболее значимые события научной жизни республики. Так, специальный выпуск журнала был посвящен международной научной конференции по аэрокосмическим исследованиям, вошла в практику публикация избранных докладов на традиционных международных научных конференциях «Хаос и структуры в нелинейных системах», каждые два года проводящихся в КарГУ им. Е.А.Букетова.

Большое внимание редакционная коллегия журнала уделяет воспитанию научной смены. На страницах журнала публикуют свои первые научные работы студенты и магистранты физического факультета КарГУ им. Е.А.Букетова и других вузов Казахстана.

Не обделены вниманием серии «Физика» ученые-педагоги, внесшие весомый вклад в развитие науки Казахстана и воспитание молодых специалистов. Материалы о них помещаются под рубрикой «Персоналии».

Откликаясь на современные требования к научным изданиям, среди которых одним из основных является наличие объективного численного показателя, такого, например, как импакт-фактор, руко-

водство университета поставило перед серией «Физика» задачу войти в базу данных The Thomson Reuters Journal — признанного мирового лидера в области научной информации, где публикуются индексы журналов.

В соответствии с импакт-фактором сегодня оценивается уровень журнала, качество опубликованных статей, выделяется финансовая поддержка исследователям, производится прием на работу научных сотрудников.

Для прохождения серией «Физика» процедуры оценки Thomson Reuters была проведена большая подготовительная работа: расширен состав редакционной коллегии, в которую входят сегодня и представители научной общественности стран дальнего зарубежья; требования к оформлению статей приведены в соответствие с основными издательскими стандартами; обеспечено большее международное многообразие авторов и т.д.

Таким образом, можно констатировать, что за время своего недолгого существования серия «Физика» журнала «Вестник Карагандинского государственного университета» состоялась как научное издание Республики Казахстан.

Пожелаем же в юбилейный год серии «Физика», детищу физического факультета Карагандинского государственного университета им. Е.А.Букетова, новых свершений и международного научного признания.

Л.В. Чиркова,
*ответственный секретарь
серии «Физика»,
канд. техн. наук, доцент*

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.9, 539.21:537.1

Применение модели Андерсона для описания фазового перехода металл-изолятор

Application of the Anderson model for describing the phase metal-insulator transition

Жарекешев И.Х.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы (E-mail: isa2020@mail.ru)

Тәртіпсіз реттелген металл-изолятордың фазалық ауысуы зерттелген. Жартылай өткізгіштер құрылымындағы ауысудың тәжірибелік бақылау мысалдары келтірілген. Жалпы Шредингер теңдігіне негізделген решетка үшін екінші кванттау формализмі қалыптасқан. Тәртіпсіз реттелген қатты денелердің электрондық қасиеттері үшін Андерсон моделін қолдану ұсынылған. Дискретті модельдердің қорытындыларын тәжірибемен салыстыру мүмкіндігі талқыланған.

The phase metal-insulator transition induced by disorder is investigated. The examples of experimental observation of the transition in semiconductor microstructures are presented. On the basis of the general Schrodinger equation the second-quantization formalism is developed for lattices. The application of the Anderson model for describing the electronic properties of conductivity in disordered solids is justified. The possibility of comparison between the results of the discrete model and experiment is discussed.

1. Введение

Согласно теореме Блоха электронные волновые состояния в идеальной кристаллической решетке распространены по всему объему. Это означает, что вероятность найти электрон является одинаковой по всему кристаллу. Такие распространенные состояния приводят к проводящему, или, другими словами, металлическому, поведению. Однако если в решетке присутствует беспорядок в форме хаотично расположенных в пространстве несовершенств, таких как примесные атомы или дислокации, то пространственная структура волновых функций модифицируется таким образом, что электронные состояния локализуются, т.е. становятся ограниченными в протяженности. Они не распространены по всему объему образца, а сосредоточены только в конечных его областях. Более точно, вероятность нахождения локализованного состояния не постоянна по координате: в одних областях она значительна, а в других — экспоненциально мала. Ясно, что тогда электронный транспорт (электрический ток) через такие локализованные состояния сильно затруднен. При дальнейшем увеличении беспорядка локализация состояний усиливается и, в конечном итоге, образец становится полностью непроводящим — превращается в изолятор. При этом говорят, что неупорядоченная система испытывает фазовый переход металл-изолятор. Таким образом, переход металл-изолятор — это переход между двумя различными фазовыми состояниями твердого тела, а именно между металлическим (проводящим) и изолирующим (непроводящим) состояниями. Следует заметить, что существует множество фазовых переходов между металлами и изоляторами, вызванных другими физическими механизмами, например, межэлектронным взаимодействием (переход Мотта) или обменными корреляциями (переход Хаббарда).

В отличие от указанного выше перехода переход, который обусловлен именно перестройкой структуры волновых функций электронных состояний за счет изменения степени беспорядка примесного потенциала, принято называть переходом Андерсона (по имени автора, объяснившего этот эффект), а само явление локализации электронных состояний — беспорядком, андерсоновской локализацией. Важно отметить, что превращение распространенного, т.е. делокализованного, состояния в локализованное в термодинамическом пределе не протекает непрерывно. По аналогии с критическими явлениями в статистической физике переход проводник-изолятор происходит практически скачкообразно, причем охватывая всю систему, при некотором определенном количестве беспорядка, характеризующем степень разбросанности примесных центров, их коррелированность в относительном положении и хаотичность или же амплитуду флуктуаций потенциалов примесных центров. Это фиксированное промежуточное количество беспорядка, при котором систему нельзя отнести ни к металлу, ни к изолятору, называют критической степенью беспорядка. Промежуточное между металлическим и изолирующим состояние системы точно при значении критического беспорядка принято называть критической точкой перехода металл-изолятор. Логично, что если степень беспорядка меньше критической, то система находится на «металлической» стороне перехода. И наоборот, если степень беспорядка превосходит критическую, то система принадлежит «диэлектрической» стороне перехода. Таким образом, две стороны перехода четко разделены одной границей, определяемой строго одним значением параметра, количественно характеризующего беспорядок примесного потенциала.

В настоящей работе рассматривается переход Андерсона в отсутствие как магнитного поля, так и сильного спин-орбитального взаимодействия.

2. Переход проводник-изолятор в эксперименте

В экспериментальных измерениях переход металл-изолятор наблюдается как резкое возрастание сопротивления образца при изменении каких-либо внешних или внутренних параметров. Например, при наложении магнитного поля удельное сопротивление сильно легированного полупроводника увеличивается на несколько порядков величины [1]. Аналогичное изменение происходит при сильном давлении, при изменении концентрации легирующей примеси [2] или при изменении толщины полупроводниковой пленки.

Отличие металлического поведения от изолирующего проявляется в различной температурной зависимости сопротивления. Как известно, если температура растет, то сопротивление металла увеличивается, в то время как сопротивление изолятора падает. По температурному закону проводимости можно заключить, находится ли данный экспериментальный образец в металлическом или изолирующем состоянии, в зависимости от какого-либо параметра, например, магнитного поля. Следовательно, изменение знака температурного эффекта на сопротивление ясно сигнализирует об изменении фазового состояния исследуемого образца, т.е. о наступлении в нем перехода металл-изолятор.

На рисунке 1 приведены графики температурной зависимости сопротивления ρ , измеренного в инверсионном двумерном слое полупроводникового МОП-транзистора для различной концентрации носителей [3]. Из рисунка видно, что при промежуточной концентрации $n_c = 8,70 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, которая является критической, сопротивление почти не зависит от температуры, указывая на переход металл-изолятор. Температурная независимость сопротивления, т.е. условие $d\rho/dT=0$, демонстрирует критическое поведение на переходе проводник-изолятор. Знак производной $d\rho/dT$ на металлической стороне не меняется на противоположный при переходе на изолирующую сторону. Такое поведение объясняется на языке флуктуаций плотностью состояний электронного спектра. При этом функция распределения межуровневых расстояний испытывает аналогичный переход, соответствующий переходу Андерсона. Вместо температуры теперь фигурирует линейный масштаб $l = \min\{L_\phi(T), L\}$, который определяется длиной фазовой когерентности:

$$L_\phi(T) = f(T^\alpha)$$

или размером исследуемой системы.

В полупроводниках при конечной концентрации примесей одного сорта вместо единичных примесных уровней возникает примесная зона, имеющая конечную энергетическую ширину. Термин «примесная зона» обозначает лишь совокупность дискретных энергетических уровней, возникающих благодаря примесным центрам. Важнейшей характеристикой примесной зоны является плотность состояний $g(E)$. Она определяется как число уровней, попадающих в малый интервал энергий, отнесенное к этому интервалу и к объему системы. Следует иметь в виду, что в макроскопической систе-

ме плотность состояний является непрерывной функцией энергии в некотором интервале, даже если речь идет о примесной зоне, которая представляет собой набор дискретных уровней. Таким образом, плотность состояний не содержит информации, позволяющей отличить истинную зону от набора дискретных уровней, не связанных между собой и случайно разбросанных по энергетической шкале. Расположение примесей случайно также и в пространстве. Пример образования примесной зоны в неупорядоченной структуре изображен схематически на рисунке 1 справа.

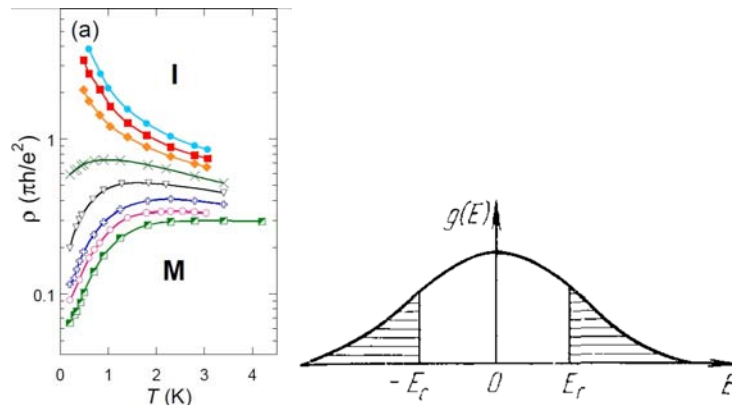


Рис. 1. Слева — удельное сопротивление как функция температуры, измеренное при разных плотностях электронов в кремниевой МОП-структуре. Наборы точек сверху вниз, cm^{-2} : $n_c = 7.24 \cdot 10^{10}$; $7.53 \cdot 10^{10}$; $7.83 \cdot 10^{10}$; $8.26 \cdot 10^{10}$; $8.70 \cdot 10^{10}$; $9.14 \cdot 10^{10}$; $9.58 \cdot 10^{10}$ и $9.87 \cdot 10^{10}$ из [3]. Буквами М и I обозначены металлическая и диэлектрическая фазы соответственно. Справа — плотность состояний в модели Андерсона. Локализованные состояния заштрихованы, и энергии E_c и $-E_c$, отделяющие области локализованных и делокализованных состояний, являются порогами подвижности.

В ситуации с примесной зоной под переходом Андерсона подразумевается возникновение внутри нее полосы делокализованных состояний. Однако в этот термин вкладывают и другой смысл. В примесной зоне, показанной на рисунке 1, существует резкая граница между локализованными и делокализованными состояниями, изображенная сплошными горизонтальными линиями. Она соответствует порогу подвижности носителей заряда. Если каким-либо образом изменять заполнение примесной зоны квазичастицами, то будет меняться и положение уровня Ферми ϵ_f . При этом изменении уровень Ферми может пересечь границу области локализации, называемую также краем подвижности, что приводит к существенным изменениям электронных свойств и проводимости системы. Это явление называют переходом Андерсона. Лежащий в его основе переход металл-изолятор, вызванный неупорядоченностью примесных центров, и является предметом исследования настоящей статьи.

3. Классификация неупорядоченных систем

Неупорядоченные системы в зависимости от вида и степени беспорядка в строении их каркаса можно разделить на два класса. К такому разделению можно естественно подойти, если учесть, что идеальный кристалл, состоящий, из общих соображений, из атомов нескольких сортов, характеризуется как геометрической правильностью положений всех точек каркаса, т.е. его трансляционной инвариантностью, так и регулярностью в расположении атомов разных сортов, т.е. композиционным порядком. В соответствии с этим к первому классу относятся такие неупорядоченные системы, в которых отсутствует лишь вторая из указанных двух упорядоченностей. Простейшим примером такой системы является неупорядоченный твердый раствор замещения. При этом если атомы растворяемого вещества имеют существенно отличающиеся от атомов растворителя радиусы, то параметры решетки раствора могут отличаться от параметров решетки чистого растворителя. Последнее относится также к случаю, когда дефектами, приводящими к неупорядоченности системы, являются межузельные атомы, или вакансии. В этом случае нарушения решетки в ближайшей, захватывающей несколько первых координационных сфер, окрестности дефекта могут быть весьма значительными. Однако в целом такие точечные дефекты не могут нарушить топологию и геометрию решетки, поэтому в среднем ее периодическая структура сохраняется. В силу этого при построении теоретической модели можно считать, что во всех

подобных случаях имеется идеальная кристаллическая решетка, а неупорядоченность обусловлена тем, что узлы такой решетки занимают объекты, которые могут быть описаны лишь статистически (например, атомы одной из двух компонент, вероятность обнаружения которых в каждом узле равна p и $1-p$, где p — концентрация растворяемого вещества). В этом случае говорят о беспорядке замещения, или композиционном беспорядке.

Второй класс неупорядоченных систем составляют такие, в которых отсутствует трансляционная симметрия каркаса, т.е. дальний порядок в расположении образующих его частиц, хотя ближний порядок обычно имеет место. Такой тип беспорядка характерен для аморфных, жидких и газообразных сред, его обычно называют структурным, или топологическим. Поэтому в достаточной мере структурно неупорядоченная система должна содержать дефекты, нарушающие топологию криволинейной сетки и имеющие либо одномерный характер типа дислокационных петель, либо двумерный — типа поверхностей разрыва, разграничивающих участки такой сетки с различающейся ориентацией. В более общем случае примером структурно неупорядоченной системы может служить хаотичная плотная упаковка сфер, в настоящее время широко используемая в качестве структурной модели аморфных тел — металлических стекол, представляющих собой состояния вещества, полученные в результате неадиабатических процессов (быстрой закалки из расплава, напыления на охлаждаемую подложку и т.п.). В дальнейшем мы будем иметь дело с первым типом неупорядоченности, т.е. с композиционным беспорядком.

4. Выбор и обоснование теоретической модели

В одночастичном приближении атомный остов заменяется статическим случайным полем, в котором движется квазичастица, в нашем случае электрон. Уравнением, описывающим его движение, является уравнение Шредингера

$$-\Delta\psi + V(r)\psi = E\psi, \quad (1)$$

в котором потенциал $V(r)$ является случайной функцией координаты. Общей формой для потенциала $V(r)$ является следующая:

$$V(r) = \sum_j v_j(r - r_j). \quad (2)$$

Гамильтониан, определяемый уравнением (1) с потенциалом (2), часто бывает удобно записать в смешанном (k, r) представлении, в более явной форме демонстрирующем его разбиение на трансляционно-инвариантную и неупорядоченную части:

$$H = E_s(k) + \sum_n a_n v(r - n), \quad (3)$$

где $E_s(k)$ — закон дисперсии оператора $-\Delta + V_n(r)$; s — номер зоны. Для исследования основных характеристик структуры энергетического спектра удобно рассматривать по возможности более простые модели. С этой целью ограничимся случаем, когда трансляционно-инвариантная часть H^0 полного гамильтониана (3) имеет лишь одну ветвь спектра, т.е. пренебрежем переходами между его различными разрешенными зонами, считая, например, что расстояние между ними достаточно велико. Гамильтониан в уравнении (3) заменяется на следующее выражение:

$$H = E(k) + V(\hat{n}), \quad \hat{n} = i \frac{\partial}{\partial k}. \quad (4)$$

Если оставить в (3) одну зону конечной ширины, т.е. заменить (3) на (4), то происходит фактически переход от непрерывного уравнения (1) с потенциалом (2) к дискретной системе вида

$$E(k) = \sum_n H_n^0 e^{ikn}, \quad \sum_m H_{n-m}^0 \psi_m + V_n \psi_n = E \psi_n, \quad (5)$$

где диагональные элементы V_n случайны. Дискретизация исходной непрерывной модели может быть достигнута иначе, путем использования известного в теории твердого тела приближения сильной связи [4, 5]. Случайный потенциал, отвечающий простейшей модели структурного беспорядка, получится из формулы (2), если считать, что точки r_j хаотически распределены по пространству со средней плотностью \bar{n} , а функции $v_j(r)$ все одинаковы и не случайны:

$$V(r) = \sum_j v(r - r_j). \quad (6)$$

Ряд физических причин приводит к хаотичности формы потенциала v_j , моделирующего действие отдельного атома каркаса на квазичастицу. В общем случае радиусы действия потенциалов и харак-

терные расстояния между точками r_j имеют один и тот же масштаб длин, а число параметров, задающих, в силу неупорядоченности системы, их статистическое описание, чрезвычайно велико. Выделим из потенциала $V(r)$ плавно изменяющуюся случайную составляющую, обусловленную перекрытием большого числа малых хвостов потенциалов $v_j(r)$ на расстояниях, больших межатомных. Тем самым оставим в компоненте v_j только лишь его локальную часть. Упрощенной и логической параметризацией слагаемых в уравнении (2) является следующая:

$$v_j(r - r_j) = v_j F(r - r_j), \tag{7}$$

в которой различие в форме функций v_j сведено к различию в каждой точке их амплитуд. Амплитуды v_j можно характеризовать их типичным значением V и величиной их флуктуаций W , которые в силу макроскопической пространственной однородности не зависят от номера узла j . Поэтому можно считать, что

$$V \sim \langle v_j \rangle, \quad W^2 \sim \langle v_j^2 \rangle - \langle v_j \rangle^2,$$

где W играет роль степени беспорядка хаотического примесного потенциала. Угловые скобки означают усреднение по реализациям фигурирующих в задаче случайных параметров, в данном случае по реализациям случайного примесного потенциала. В структурно неупорядоченной среде параметром, который может оказаться малым, является отношение радиуса r_0 функции $F(r)$ к среднему расстоянию $\bar{n}^{-1/3}$ между центрами r_j или к радиусу связанного состояния в одной яме (7), если эта величина больше. В примесной системе (например, в сплаве замещения) малость подобного параметра, представляющего собой концентрацию примесных атомов, соответствует в некоторых случаях реализуемой ситуации. Кроме того, можно проследить, как по мере увеличения этого параметра ее упорядоченное поведение сменяется на неупорядоченное. При достаточно малых концентрациях атомы настолько удалены друг от друга, что вызываемый перекрытием волновых функций отдельных атомов сдвиг некоторого одноатомного уровня E при характерных изменениях r_j , а также его сдвиг за счет флуктуаций v_j малы по сравнению с расстоянием от E до других уровней. В этом случае оправданна применимость приближения сильной связи, что позволяет заменить произведения $F(r - r_j)\psi(r)$ в уравнении (1) их проекциями на связанное состояние:

$$\psi_{j_j}^{(0)}(r) = \psi^{(0)}(r - r_j), \quad \int \psi_{j_j}^{(0)2}(r) dr = 1$$

отдельного центра, где величины $\psi_j = \int \psi(r)\psi_j(r) dr$ играют роль амплитуд волновой функции на центре r_j . Тогда мы имеем

$$-\Delta\varphi + \sum u_j \varphi_j \varphi_j(r) = E\psi. \tag{8}$$

Систему уравнений (8) можно привести к обычной форме спектральной задачи, в которую энергетический параметр входит линейно. Например, выводится следующее уравнение:

$$\sum_{i \neq j} H_{r_j - r_i}^0 \psi_i + v_j \psi_j = \epsilon \psi_j. \tag{9}$$

Предполагается, что величины v_n являются статистически независимыми при различных n . При этом обычно используют некоторую однопараметрическую форму их плотности вероятностей $P(v)$, например:

$$P(v) = \begin{cases} 1/W, & |v| \leq W/2, \\ 0, & |v| > W/2. \end{cases} \tag{10}$$

Модель, в которой учитывались такая форма распределения «затравочных» потенциалов v_n и только взаимодействие ближайших соседей, была впервые рассмотрена Андерсоном [6] в связи с проблемой локализации носителей заряда в неупорядоченных твердых телах. Явление перехода проводник-изолятор, обусловленное разупорядочением, как раз и объясняется на основе этой модели Андерсона. Точное решение модели Андерсона в общем случае невозможно, за исключением редких предельных случаев, например, очень слабого беспорядка W . Поэтому в физической ситуации, где степень беспорядка существенна, в особенности вблизи перехода проводник-изолятор, вместо аналитических методов прибегают к точному численному моделированию. При численном моделировании часто применяется формула (10) для распределения локальных энергий узлов.

5. Заключение

Модель Андерсона (9) с потенциалом (10) применяется для вычисления статистических свойств электронного спектра мезоскопических образцов в различных физических случаях, а именно: в при-

сутствии симметрии к обращению времени, сильного спин-орбитального взаимодействия и магнитного поля. Для многих из этих ситуаций в настоящий момент имеются экспериментальные измерения, проведенные в различных лабораториях. Результаты этих экспериментальных измерений можно сравнить с нашими теоретическими результатами в тех диапазонах параметров, которые учитываются решеточной моделью. Многие из этих результатов хорошо согласуются друг с другом, подтверждая тем самым, что теоретический подход адекватно объясняет рассматриваемое явление фазового перехода металл-изолятор. Наиболее яркой и убедительной проверкой предлагаемого в настоящей работе аналитического исследования является отличное согласие экспериментальных данных по статистике дискретных уровней в наноструктурных МОП-транзисторах с результатами вычислений, проведенных в условиях сильного спин-орбитального взаимодействия [7]. Представляется возможным привести прямое сравнение графиков для функций распределения уровней энергии из теоретической модели и из эксперимента, что и будет сделано в будущих работах.

References

1. *Waffenschmidt S., Pfleiderer C., Loehneysen H.V.* Critical behavior of the conductivity of Si:P at the metal-insulator transition under uniaxial stress // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Vol. 83. — P. 3005–3008.
2. *Loehneysen H.V.* Metal-insulator transition in heavy doped semiconductors // *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* — 1998. — Vol. 3. — № 1. — P. 5–15.
3. *Anissimova S., Kravchenko S.V. et al.* Flow diagram of the metal-insulator transition in two dimensions // *Nature Physics.* — 2007. — Vol. 3. — P. 707–710.
4. *Madelung O.* Physics of a solid state: the Localized conditions: the lane with English / Under the editorship of V.M.Agranovich. — M.: Science, 1985. — 184 p.
5. *Paierls R.* The quantum theory of solid states: The lane with English. IL — M., 1956. — 476 p.
6. *Anderson P.W.* Absence of Diffusion in Certain Random Lattices // *Phys. Rev.* — 1958. — Vol. 109. — P. 1492–1505.
7. *Schweitzer L., Zharekeshv I.Kh.* Critical level spacing distribution of two-dimensional disordered systems with spin-orbit coupling // *J.Phys.: Condens. Matter.* — 1995. — Vol. 7. — P. L377–L382.

УДК 535.37:535.34:539.19

Природа пиков ТСЛ в кристаллах K_2SO_4 -Sm

The nature of TL peaks in K_2SO_4 -Sm crystals

Ким Л.М.¹, Кокетайтеги Т.А.¹, Салькеева А.К.², Балтабеков А.С.¹, Тагаева Б.С.¹

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

²Карагандинский государственный технический университет (E-mail: abskargu@mail.ru)

K_2SO_4 -Sm кристалдарындағы рекомбинациялық люминесценцияға зерттеу жүргізілді. ТСЛ қисығында максимумдары 100 К, 135 К және 220 К жаңа жарқырау шыңдары пайда болады. Үлгілерді термиялық өңдеуден кейін максимумдары 100 К және 220 К жарқырау шыңдары жоғалып кетеді. Ол кристалдарда су молекулаларының бар болуына байланысты. 135 К және 220 К ТСЛ шыңдары радиациядан пайда болған қоспалық орталықтардың ыдырауына негізделген. Қоспалық иондар 135 К аймақта рекомбинация орталықтары болып табылмайды. Су молекулалары радиациядан пайда болған қоспалық орталықтардың термиялық деңгейінің артуына әкеледі.

An investigation of the recombination luminescence of K_2SO_4 -Sm is done. Three new peaks of the luminescence at 100K, 135K and 220K appear on the TL curve. As a result of thermal treatment of samples the luminescence peaks at 100K and 220K disappear. Hence, they are connected with presence of water molecules in crystals. The TL peaks at 135K and 220K are caused by the disintegration of the impurity radiation-induced centers. The impurity ions in the area 135K aren't the centers of recombination. The water molecules lead to increase of level thermal stability for impurity radiation-induced centers.

Ионы редкоземельных элементов (РЗЭ) являются стандартными люминесцентными зондами при изучении различных процессов при фото- и радиационном возбуждении кристаллов (см., например, [1]). Сульфаты щелочных металлов образуют обширный класс соединений. По своему строению и

типам химической связи они являются аналогами почти 2000 химических соединений [2]. С этой точки зрения сульфат калия, как типичный представитель, является удобной модельной системой для изучения процессов взаимодействия излучения с веществом. Анализ литературных данных показал, что радиационные процессы в этих кристаллах, активированных РЗЭ, изучены недостаточно. В работах [3–5] приводится ряд сведений об оптических и фотолюминесцентных свойствах сульфата калия, активированного ионами самария и гадолиния. В кристаллах $K_2SO_4-Sm^{3+}$ при температуре жидкого азота наблюдается три полосы поглощения с максимумами при 4.35, 4.54 и 5.32 эВ [5], в которых возбуждается фотолюминесценция. В спектре излучения имеется две полосы излучения. В [5] показано, что эти полосы излучения связаны с примесными центрами, различающимися по своему строению. Одна из них связана с центром свечения, возмущенного молекулой воды, компенсирующей избыточный заряд примесных ионов. После термической обработки образца одна из полос свечения подавляется, а другая усиливается. По имеющимся литературным данным [6] кристаллы сульфата калия не гидратируются. Появление молекул воды связано с тем, что при их активации гетеровалентными ионами в исходной матрице возникают дополнительные вакансии, компенсирующие избыточный заряд. Поскольку образцы выращивались из водных растворов, то при росте в эти вакансии могут захватываться молекулы воды.

Наличие неконтролируемой примеси, в данном случае молекул воды, должно оказывать заметное влияние на протекание радиационно-стимулированных процессов.

На рисунке 1 приведена типичная кривая термостимулированной люминесценции K_2SO_4-Sm . Доза облучения рентгеновскими квантами при температуре жидкого азота составляла 50 кГр. Для монокристалла получена достаточно сложная картина рекомбинационных процессов. Кривая ТСЛ имеет выраженные максимумы свечения при температурах 145, 190, 220 и 280–300 К. Из рисунка видно, что первый пик рекомбинационной люминесценции с максимумом при 145 К является сложным. На его низкотемпературном крыле имеется перегиб, свидетельствующий о наличии еще одного пика свечения в области 100 К. Изотермический отжиг при температуре 100 К предварительно облученного рентгеновскими квантами образца позволяет показать, что максимум рекомбинационной люминесценции наблюдается в области 135 К. Пики ТСЛ с максимумами при 190 К и 280–300 К характерны для чистых кристаллов K_2SO_4 [7]. Кроме того, в высокотемпературной группе пиков ТСЛ перераспределилась светосумма. В чистых кристаллах доминирующим пиком свечения является излучение с максимумом при 300 К. Таким образом, в активированном ионами самария монокристалле сульфата калия появились новые пики рекомбинационного свечения при 100 К, 135 К и 220 К.

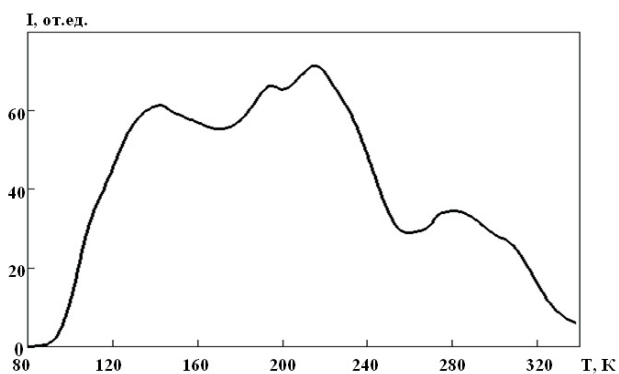


Рис. 1. Кривая ТСЛ кристалла $K_2SO_4-Sm^{3+}$ после облучения рентгеновскими лучами с дозой 50 кГр

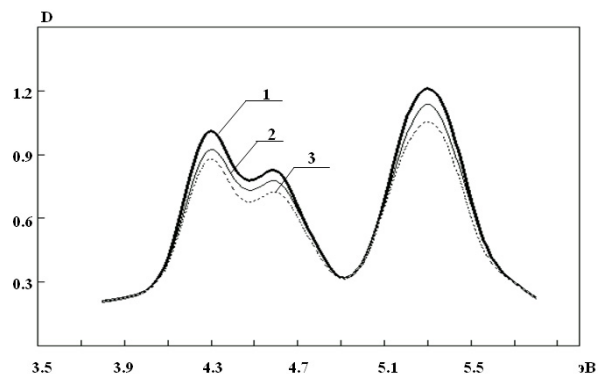


Рис. 2. Спектр поглощения кристалла $K_2SO_4-Sm^{3+}$ при температуре 80 К до (1) и после облучения рентгеновскими квантами с дозой 100 кГр (2) и 150 кГр (3)

На рисунке 2 приведены спектры поглощения для монокристаллов K_2SO_4-Sm при температуре жидкого азота до и после облучения рентгеновскими квантами. При температуре 80 К примесное поглощение не претерпевает качественных изменений. В спектре наблюдаются те же три полосы поглощения, только при понижении температуры произошло смещение их максимумов в сторону более коротких длин волн. В результате облучения рентгеновскими квантами новых полос поглощения не обнаружено. При облучении ионизирующим излучением наблюдается уменьшение оптической плотности в полосах примесного поглощения. Как видно из рисунка 2, изменения в спектре поглощения увеличиваются с ростом дозы облучения. Подобное поведение оптического поглощения объясняется уменьшением концентрации трехвалентных примесных ионов, т.е. в результате облучения ионизи-

рующей радиацией происходит изменение их зарядового состояния. Оказалось, что рекомбинационные процессы в кристаллах K_2SO_4-Sm зависят от предыстории образцов.

На рисунке 3 приведена кривая ТСЛ для порошкообразного образца сульфата калия, активированного ионами самария. Перед измерением образец был подвергнут термической обработке. Исходные монокристаллы, перетертые в порошок, в течение 3 часов выдерживались при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$. В результате такой термической обработки кривые ТСЛ с максимумом при 100 К и 220 К исчезли. Проявились пики рекомбинационной люминесценции при 135 К. Известно, что после нагревания сульфата калия до температуры полиморфного фазового перехода из α -структуры кристаллической решетки в β при фотовозбуждении появляется люминесценция в зеленой области спектра, которую авторы работы [8] связывают с возникновением молекулярных центров свечения S_2 . Поскольку мы не нагревали образцы до температуры структурного фазового перехода, следовательно, изменения на кривой ТСЛ не могут быть связаны с центрами типа S_2 . После нагревания образцы медленно охлаждались, т.е. не производилась их закалка. Поэтому нельзя связать изменения рекомбинационных процессов после термической обработки с появлением дополнительных вакансий в узлах кристаллической решетки.

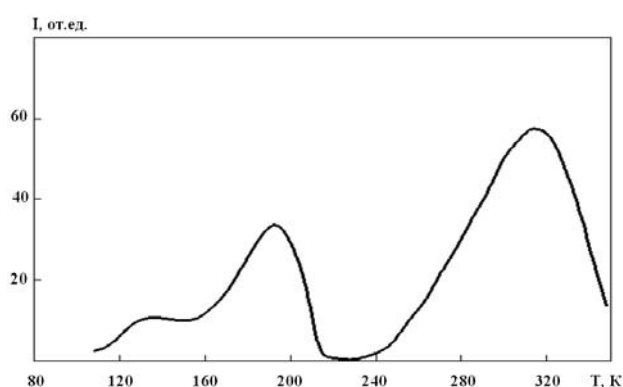


Рис. 3. Кривая ТСЛ кристалла $K_2SO_4-Sm^{3+}$ после предварительной термической обработки при $600\text{ }^\circ\text{C}$. Доза облучения — $50\text{ }\mu\text{Гр}$

Качественные изменения вида кривых ТСЛ, приведенных на рисунках 1 и 3, мы связываем с удалением из кристалла молекул структурной воды. Как показано в работе [3], при указанных выше условиях предварительной термической обработки образцов происходит исчезновение одного типа примесных центров люминесценции. Резкие изменения вида кривых температурной зависимости рекомбинационного свечения свидетельствуют об изменении состава изучаемых объектов.

Следовательно, можно утверждать, что рекомбинационная люминесценция в температурных областях 100 К и 220 К происходит с участием продуктов радиолиза молекул структурной воды. Кроме того, происходит перераспределение светосуммы в пиках ТСЛ 280–300 К. До термической обработки в этом температурном диапазоне доминирующим был пик свечения с максимумом при 280 К, после термической обработки образца — 300 К. Подобное перераспределение светосумм наблюдалось ранее для кристаллов сульфата калия, активированных двухвалентными ионами металлов [9, 10]. Это явление объяснялось возникновением дополнительных катионных вакансий, возникающих при локальной компенсации избыточных зарядов. Единственным установленным электронно-избыточным центром в сульфатах щелочных металлов является ион O^- [11]. Данный дефект возникает в результате диссоциативного захвата сульфатными анионами свободных электронов [11,12]. Дефект O^- стабилизируется в решетке рядом с ионами SO_3^{2-} . Квантово-химическими расчетами показано, что уровень термической стабильности этого электронно-избыточного центра по отношению к миграции определяется его катионным окружением [7, 8]. Появление дополнительных вакансий приводит к перераспределению данных дефектов по уровням термической стабильности и, соответственно, к перераспределению светосумм по пикам рекомбинационной люминесценции. Исходя из этого наблюдаемое изменение распределения светосумм по пикам свечения в результате термической обработки связано с возникновением катионных вакансий. Поскольку после нагревания охлаждение происходило медленно, образец не закалялся, т.е. термообработка не приводит к появлению избыточных вакансий. Они возникают в результате удаления молекул структурной воды.

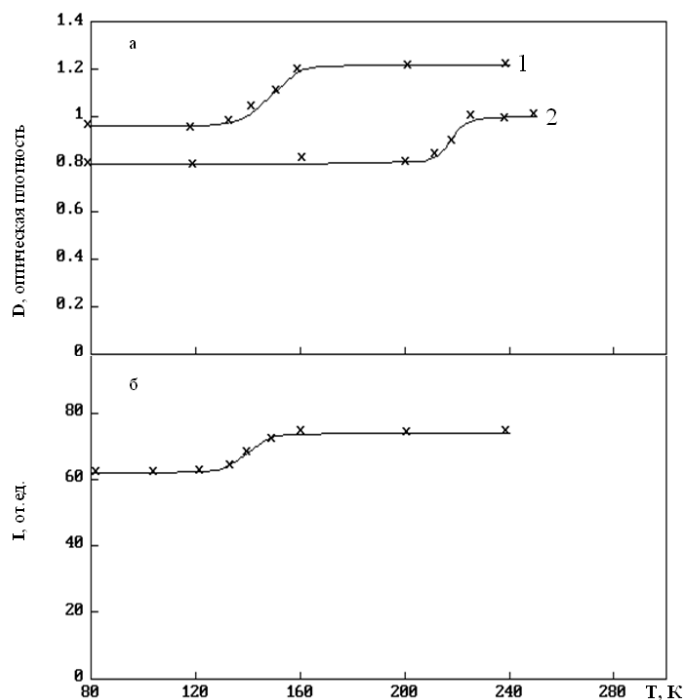


Рис. 4. (а) — температурная зависимость оптической плотности в примесных полосах поглощения 5.49 эВ (1) и 4.3 эВ (2) после облучения рентгеновскими квантами при 80 К дозой 150 кГр для монокристалла K_2SO_4 -Sm; (б) — температурная зависимость выхода фотолюминесценции для порошкообразного K_2SO_4 -Sm после термической обработки

На рисунке 4(а) представлена температурная зависимость оптической плотности монокристалла K_2SO_4 -Sm, предварительно облученного рентгеновскими лучами при 80 К. Измерения оптической плотности проводились при 80 К, после нагревания образца до температур, указанных на рисунке, с последующим охлаждением до исходного состояния. При таком подходе исключены возможные температурные влияния на оптическое поглощение кристалла. Из рисунка видно, что оптическая плотность в полосах примесного поглощения восстанавливается в области 130–140 К и 210–215 К, т.е. при температурах наблюдения пиков ТСЛ. Следовательно, пики рекомбинационного свечения с максимумами при 135 К и 220 К связаны с распадом радиационно-наведенных примесных центров. Пик ТСЛ с максимумом при 220 К связан с распадом радиационно-наведенных примесных центров, где полная или частичная локальная компенсация избыточного заряда реализуется молекулами структурной воды, а рекомбинационная люминесценция с максимумом при 135 К — с распадом радиационно-наведенных примесных центров с локальной компенсацией заряда катионными вакансиями.

На рисунке 4(б) приведена температурная зависимость выхода фотолюминесценции для порошкообразного K_2SO_4 -Sm, предварительно облученного рентгеновскими лучами при 80 К. Данный образец был подвергнут термической обработке, при которой один из типов примесных центров люминесценции исчезает. Поскольку для порошков измерение спектров поглощения невозможно, в эксперименте регистрировалась интенсивность люминесценции примесных центров при фотовозбуждении в полосе 5.4 эВ. Все измерения проводились при 80 К. Как и в предыдущем случае, перед каждым измерением образец нагревался до определенной температуры, а затем охлаждался до исходного состояния. Выход фотолюминесценции примесных центров испытывает температурное тушение. Измерение при постоянной температуре позволяет избежать данного эффекта. Из рисунка 4(б) видно, что выход фотолюминесценции ионов трехвалентного самария в области 130–140 К увеличивается. Поскольку все измерения проводились при 80 К, этот факт имеет единственное объяснение. В этой температурной области в предварительно облученном рентгеновскими квантами образце происходит увеличение количества центров, дающих наблюдаемую фотолюминесценцию.

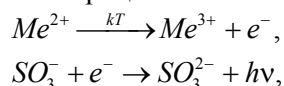
Измерение кривых накопления светосумм в пиках ТСЛ показало, что примесные ионы трехвалентных редкоземельных элементов являются ловушками для электронов.

Нами были измерены спектральные составы пиков ТСЛ для монокристалла K_2SO_4 -Sm. Спектральный состав рекомбинационного излучения при 135 К имеет вид одиночной полосы излучения с

максимумом при 3.1 эВ. Для того чтобы на результат не оказывали влияния рекомбинационные процессы в области 100 К, монокристалл K_2SO_4-Sm , предварительно облученный рентгеновскими лучами при 80 К, был подвергнут изотермическому отжигу при 100 К, с последующим охлаждением до исходной температуры. Излучения примесных центров здесь нет. Для ионов трехвалентного самария в монокристаллах характерная люминесценция имеет максимумы при 3.12 и 3.54 эВ [5]. Длинноволновое излучение связано с центрами, возмущенными молекулами структурной воды. Следовательно, спектральный состав рекомбинационного излучения в области 135 К однозначно показывает, что радиационно-наведенные примесные центры типа Sm^{2+} не являются центрами рекомбинации. Наблюдаемое излучение 3.1 эВ характерно для рекомбинационных процессов в матрице и связано с распадом дефектов SO_3^- [7].

Для измерения спектрального состава излучения пика ТСЛ при 220 К предварительно облученный монокристалл сульфата калия, активированный ионами самария, подвергался изотермическому отжигу при 190 К. Наблюдаются полоса излучения с максимумом при 3.1 эВ и слабое излучение в области 2.5 эВ. Поскольку примесный центр, возмущенный молекулами структурной воды, имеет характерное излучение при 3.12 эВ, приведенный результат не позволяет однозначно сказать об отсутствии или наличии люминесценции примесных центров.

Радиационно-наведенные примесные дефекты не являются центрами рекомбинации. Молекулы структурной воды приводят к повышению уровня термической стабильности радиационно-наведенных примесных дефектов. Совокупность экспериментальных результатов дает возможность предложить следующий рекомбинационный процесс:



где Me — примесный ион. При нагревании происходит термическая ионизация ионов Me^{2+} . Рекомбинация свободного электрона с дырочным дефектом SO_3^- дает наблюдаемое излучение 3.1 эВ.

Предложенный рекомбинационный процесс не противоречив и согласуется с имеющимися литературными данными и экспериментальными результатами данной работы.

Таким образом, при росте образцов из водных растворов на кривой ТСЛ кристалла K_2SO_4-Sm появляется два новых пика рекомбинационной люминесценции — при 135 К и 220 К. Первый связан с примесным радиационно-наведенным центром Sm^{2+} , второй — с этим же центром, возмущенным молекулами воды. В области 135 К примесные ионы не являются центрами рекомбинации. В области 220 К этого заявить пока нельзя. Возникновение двух типов примесных радиационно-наведенных центров связано с существованием в сульфате калия двух типов примесных ионов, различающихся ближайшим окружением.

Работа выполнена по гранту Фонда фундаментальных исследований МОН РК.

References

1. *Marphunin A.S.* Introduction in physics of minerals. — М., 1974. — 324 p.
2. *Aleksandrov K.S., Beznosikov B.V.* Structural phase transitions in crystals (family of potassium sulphate). — Novosibirsk, 1993. — 287 p.
3. *Salkeeva A.K., Kim L.M., Kuketaev T.A.* Influence of thermal processing on recombination luminescence of potassium sulphate doped by threevalence gadolinium ions // News of HIGH SCHOOLS. — Series of the Physicist. — 2006. — Vol. 49. — № 6. — P. 89–90.
4. *Salkeeva A.K., Kim L.M.* Luminescent properties of potassium sulphate doped by ions of a gadolinium // Works of the international scientific conference «Science and education — the leading factor of strategy «Kazakhstan-2030». — Karaganda, 2006. — P. 389–391.
5. *Salkeeva A.K.* Influence of samarium and gadolinium ions on optical and radiation properties of crystals K_2SO_4 and $LiKSO_4$: The dissertation abstracts of the candidate science. — Almaty, 2008. — 16 p.
6. *Rabinovich V.A., Havin Z.J.* Short a chemical directory. — L., 1991. — 432 p.
7. *Makhmetov T.S.* Mechanisms of recombination luminescence in K_2SO_4 and $K_2SO_4-Cu^{2+}$: The dissertation abstracts of the candidate science. — Karaganda, 1998. — 17 p.
8. *Sheludko V.I., Nedilko S.G., Bojko V.V.* Post-annealing green luminescence of sulphate crystals // Funct. Matter. — 2003. — 10,1. — P. 93–97.

9. Kuketaev T.A., Kim L.M., Mahmetov T.S. Recombination luminescence in $K_2SO_4-Cu^{2+}$ // Solid-state detectors of ionizing radiation: Theses of reports of the international conference. — Ekaterinburg, 1997. — P. 113.
10. Kuketaev T.A., Murashova Z.F., Sagyndykova G.E. The thermal stimulation luminescence of potassium sulphate doped by mercury similar ions // Chaos and structures in nonlinear systems // The theory and experiment: Materials of 3rd international scientific conference. — Karaganda: Publ. KarSU, 2002. — P. 136–139.
11. Byberg J.L. O^- detected by EPR as a primary electron-excess defect in x-irradiated K_2SO_4 // Chem. Phys. — Vol. 84. — № 11. — P. 6083–6085.
12. Kim L.M. Defect formation by radiation in sulphates on the mechanism of dissociation capture electrons // Problems of a modern science: an urgency, directions, prospects: Materials of the 3-d Republican scientific-technical. conferences. — Ust-Kamenogorsk, 2002. — P. 250–252.

УДК 539.3

Движение периодической нагрузки по внутренней поверхности двухслойной оболочки в упругом полупространстве

Movement of the periodic load on an internal surface of the two-layer shell in elastic half-space

Украинец В.Н., Тлеулесов А.К.

Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова (E-mail: vitnikukr@mail.ru)

Серпінді жартылай кеңістікте екі қабатты қабықшаға қозғалмалы мерзімдік жүктеменің әрекеті туралы есептің толық аналитикалық шешімі шығарылды. Қабықшаның жуан ішкі қабатын сипаттау үшін серпінділік теорияның динамикалық тендеулері қолданылады, жіңішке сыртқы қабаттың тербелісі координаттардың қозғалмалы жүйесінде жіңішке қабықша теорияның классикалық тендеулерімен сипатталады. Шешім айнмалылардың толық емес бөлінуінің әдісіне негізделген. Есепті санмен есептеу кезінде жүйелі шағылудың (жуықтаудың) әдісін пайдалану ұсынылған.

The exact analytical solution of the problem about an action of the mobile periodic loading on a two-layer shell in elastic half-space is received. For the description of a thick inside layer of the shell the dynamic equations of the theory of elasticity are used, fluctuations of a thin external layer are described by the classical equations of the theory of thin shells in a mobile system of coordinates. The solution is based on a method of the incomplete division of variables. At numerical realization of the problem it is recommended to apply a method of successive approximations.

Рассмотрим в линейно-упругом, однородном и изотропном полупространстве, отнесенном к декартовой (x, y, z) или цилиндрической (r, θ, z) неподвижной системе координат, бесконечно длинную круговую цилиндрическую двухслойную оболочку, наружным слоем которой является тонкостенная упругая оболочка толщиной h_0 и радиусом срединной поверхности R_1 , а внутренним — толстая упругая оболочка радиусом внутренней поверхности R_2 (рис.). В силу малости h_0 принимаем, что тонкостенная оболочка контактирует с толстой оболочкой и окружающей упругой средой (массивом) вдоль своей срединной поверхности. Условимся внутренний слой двухслойной оболочки называть несущим, а наружный — ограждающим. Контакт между слоями оболочки, а также между ограждающим слоем и массивом будем полагать либо жёстким, либо скользящим при двусторонней связи в радиальном направлении.

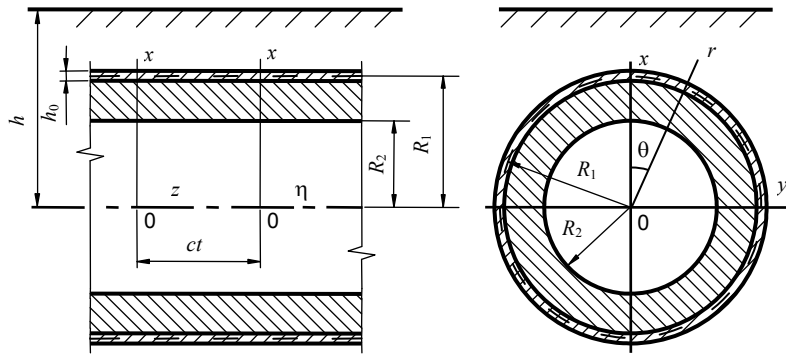


Рис. Двухслойная оболочка в упругом полупространстве

Пусть на внутреннюю поверхность оболочки действует периодическая по её оси нагрузка интенсивностью P , движущаяся с постоянной скоростью c в направлении оси z , а граница полупространства $x = h$ свободна от нагрузок. Введём ограничение на величину скорости движения нагрузки, принимая её меньше скоростей распространения волн сдвига в несущем слое и массиве (дозвуковой случай). Физико-механические свойства материала массива и несущего слоя характеризуются следующими постоянными: $\nu_1, \mu_1, \rho_1; \nu_2, \mu_2, \rho_2$,

где ν_k — коэффициент Пуассона; μ_k — модуль сдвига; ρ_k — плотность ($k = 1, 2$). Здесь и в дальнейшем индекс $k = 1$ относится к массиву, а $k = 2$ — к несущему слою.

Для описания движения массива и несущего слоя используем динамические уравнения теории упругости в подвижной системе координат $\eta = z - ct$ [1]:

$$(M_{pk}^{-2} - M_{sk}^{-2}) \text{grad div } u_k + M_{sk}^{-2} \nabla^2 u_k = \partial^2 u_k / \partial \eta^2, \quad k = 1, 2, \quad (1)$$

где $M_{pk} = c/c_{pk}$, $M_{sk} = c/c_{sk}$ — числа Маха; $c_{pk} = \sqrt{(\lambda_k + 2\mu_k)/\rho_k}$, $c_{sk} = \sqrt{\mu_k/\rho_k}$ — скорости распространения волн расширения-сжатия и сдвига в массиве и несущем слое, $\lambda_k = 2\mu_k \nu_k / (1 - 2\nu_k)$; u_k — векторы смещений точек массива и несущего слоя, ∇^2 — оператор Лапласа.

Для описания движения ограждающего слоя воспользуемся классическими уравнениями теории тонких оболочек, которые в подвижной системе координат имеют подобный [2] вид:

$$\begin{aligned} \left[1 - \frac{(1 - \nu_0) \rho_0 c^2}{2\mu_0} \right] \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \eta^2} + \frac{1 - \nu_0}{2R^2} \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \theta^2} + \frac{1 + \nu_0}{2R} \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \eta \partial \theta} + \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial u_{0r}}{\partial \eta} &= \frac{1 - \nu_0}{2\mu_0 h_0} (q_{\eta 2} - q_{\eta 1}), \\ \frac{1 + \nu_0}{2R} \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \eta \partial \theta} + \frac{(1 - \nu_0)}{2} \left(1 - \frac{\rho_0 c^2}{\mu_0} \right) \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial u_{0r}}{\partial \theta} &= \frac{1 - \nu_0}{2\mu_0 h_0} (q_{\theta 2} - q_{\theta 1}), \\ \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial u_{0\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial u_{0\theta}}{\partial \theta} + \frac{h_0^2}{12} \nabla^2 \nabla^2 u_{0r} + \frac{(1 - \nu_0) \rho_0 c^2}{2\mu_0} \frac{\partial^2 u_{0r}}{\partial \eta^2} + \frac{u_{0r}}{R^2} &= -\frac{1 - \nu_0}{2\mu_0 h_0} (q_{r 2} - q_{r 1}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $R = R_1$; $u_{0\eta}$, $u_{0\theta}$, u_{0r} — перемещения точек срединной поверхности ограждающего слоя; ν_0, μ_0, ρ_0 — соответственно коэффициент Пуассона, модуль сдвига и плотность его материала; $q_{j1} = \sigma_{ij1}|_{r=R_1}$, $q_{j2} = \sigma_{ij2}|_{r=R_1}$ — составляющие реакции массива и несущего слоя; σ_{ij1} , σ_{ij2} — компоненты тензоров напряжений в массиве и несущем слое, $j = \eta, \theta, r$.

Выражая u_k через потенциалы Ламе [1]:

$$u_k = \text{grad } \varphi_{1k} + \text{rot}(\varphi_{2k} e_\eta) + \text{rot rot}(\varphi_{3k} e_\eta), \quad k = 1, 2, \quad (3)$$

преобразуем уравнения (1) к виду:

$$\nabla^2 \varphi_{jk} = M_{jk}^2 \partial^2 \varphi_{jk} / \partial \eta^2, \quad j = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2. \quad (4)$$

Здесь e_η — орт оси η , $M_{1k} = M_{pk}$, $M_{2k} = M_{3k} = M_{sk}$.

Используя (3) и закон Гука, получаем выражения для компонент векторов u_k и тензоров напряжений в массиве ($k = 1$) и несущем слое ($k = 2$) в подвижной цилиндрической системе координат:

$$u_{rk} = \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \varphi_{3k}}{\partial \eta \partial r}, \quad u_{\eta k} = \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \eta} + m_{sk}^2 \frac{\partial^2 \varphi_{3k}}{\partial \eta^2}, \quad u_{\theta k} = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \theta} - \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_{3k}}{\partial \eta \partial \theta}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\eta \eta k} = (2\mu_k + \lambda_k M_{pk}^2) \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \eta^2} + 2\mu_k m_{sk}^2 \frac{\partial^3 \varphi_{3k}}{\partial \eta^3},$$

$$\sigma_{\theta \theta k} = \lambda_k M_{pk}^2 \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \eta^2} + \frac{2\mu_k}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \varphi_{2k}}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \varphi_{3k}}{\partial \theta^2 \partial \eta} + \frac{\partial^2 \varphi_{3k}}{\partial r \partial \eta} \right),$$

$$\sigma_{rrk} = \lambda_k M_{pk}^2 \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \eta^2} + 2\mu_k \left(\frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_{2k}}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \theta} + \frac{\partial^3 \varphi_{3k}}{\partial r^2 \partial \eta} \right),$$

$$\sigma_{r\eta k} = \mu_k \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \eta \partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_{2k}}{\partial \theta \partial \eta} + (1 + m_{sk}^2) \frac{\partial^3 \varphi_{3k}}{\partial \eta^2 \partial r} \right), \quad (6)$$

$$\sigma_{\eta \theta k} = \mu_k \left(\frac{2}{r} \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \theta \partial \eta} - \frac{\partial^2 \varphi_{2k}}{\partial r \partial \eta} + \frac{(1 + m_{sk}^2)}{r} \frac{\partial^3 \varphi_{3k}}{\partial \theta \partial \eta^2} \right),$$

$$\sigma_{r\theta k} = 2\mu_k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_{1k}}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \varphi_{2k}}{\partial r^2} - \frac{m_{sk}^2}{2} \frac{\partial^2 \varphi_{2k}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \varphi_{3k}}{\partial r \partial \eta \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_{3k}}{\partial \eta \partial \theta} \right),$$

где $m_{sk}^2 = 1 - M_{sk}^2$.

В подвижных декартовых координатах выражения для компонент напряжённно-деформированного состояния (НДС) массива имеют вид

$$u_{x1} = \frac{\partial \varphi_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_{21}}{\partial y} + \frac{\partial^2 \varphi_{31}}{\partial x \partial \eta}, \quad u_{\eta 1} = \frac{\partial \varphi_{11}}{\partial \eta} + m_{s1}^2 \frac{\partial^2 \varphi_{31}}{\partial \eta^2}, \quad u_{y1} = \frac{\partial \varphi_{11}}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_{21}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \varphi_{31}}{\partial y \partial \eta}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\eta \eta 1} = (2\mu_1 + \lambda_1 M_{p1}^2) \frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial \eta^2} + 2\mu_1 m_{s1}^2 \frac{\partial^3 \varphi_{31}}{\partial \eta^3},$$

$$\sigma_{yy1} = \lambda_1 M_{p1}^2 \frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial \eta^2} + 2\mu_1 \left(\frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \varphi_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^3 \varphi_{31}}{\partial y^2 \partial \eta} \right),$$

$$\sigma_{xx1} = \lambda_1 M_{p1}^2 \frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial \eta^2} + 2\mu_1 \left(\frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^3 \varphi_{31}}{\partial x^2 \partial \eta} \right),$$

$$\sigma_{x\eta 1} = \mu_1 \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial \eta \partial x} + \frac{\partial^2 \varphi_{21}}{\partial y \partial \eta} + (1 + m_{s1}^2) \frac{\partial^3 \varphi_{31}}{\partial \eta^2 \partial x} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{y\eta 1} = \mu_1 \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial y \partial \eta} - \frac{\partial^2 \varphi_{21}}{\partial x \partial \eta} + (1 + m_{s1}^2) \frac{\partial^3 \varphi_{31}}{\partial y \partial \eta^2} \right),$$

$$\sigma_{xy1} = 2\mu_1 \left(\frac{\partial^2 \varphi_{11}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \varphi_{21}}{\partial x^2} - \frac{m_{s1}^2}{2} \frac{\partial^2 \varphi_{21}}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^3 \varphi_{31}}{\partial x \partial y \partial \eta} \right).$$

Таким образом, для определения компонент НДС несущего слоя и массива необходимо решить уравнения (4), используя граничные условия.

Рассмотрим случай, когда подвижная нагрузка представима в виде синусоидальной нагрузки с произвольной зависимостью от угловой координаты:

$$P(\theta, \eta) = p(\theta) e^{i\xi \eta}, \quad p(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n e^{in\theta}, \quad (9)$$

$$P_j(\theta, \eta) = p_j(\theta) e^{i\xi \eta}, \quad p_j(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{nj} e^{in\theta}, \quad j = r, \theta, \eta,$$

где константа ξ определяет период $T = 2\pi/\xi$ действующей нагрузки; $P_j(\theta, \eta)$ — составляющие интенсивности нагрузки $P(\theta, \eta)$.

Потенциалы φ_{jk} будем искать в аналогичном виде:

$$\varphi_{jk}(r, \theta, \eta) = \Phi_{jk}(r, \theta) e^{i\xi \eta}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (4), получим видоизменённые уравнения Гельмгольца:

$$\nabla_2^2 \Phi_{jk} - m_{jk}^2 \xi^2 \Phi_{jk} = 0, \quad j=1,2,3, \quad k=1,2, \quad (11)$$

где ∇_2^2 — двумерный оператор Лапласа, $m_{jk}^2 = 1 - M_{jk}^2$, $m_{1k} \equiv m_{pk}$, $m_{2k} = m_{3k} \equiv m_{sk}$.

Выражения (5)–(8), с учётом (10), переписутся в виде

$$\begin{aligned} u_{rk} &= \left(\frac{\partial \Phi_{1k}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial \theta} + \xi \frac{\partial \Phi_{3k}}{\partial r} i \right) e^{i\xi\eta}, \\ u_{\theta k} &= \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_{1k}}{\partial \theta} - \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial r} + \frac{\xi}{r} \frac{\partial \Phi_{3k}}{\partial \theta} i \right) e^{i\xi\eta}, \\ u_{\eta k} &= \left(\xi \Phi_{1k} i - \xi^2 m_s^2 \Phi_{3k} \right) e^{i\xi\eta}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta\eta k} &= -\mu \left[\left(2 + \frac{\lambda}{\mu} M_p^2 \right) \xi^2 \Phi_{1k} + 2m_s^2 \xi^3 \Phi_{3k} i \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{\theta\theta k} &= \mu \left[-\frac{\lambda}{\mu} M_p^2 \xi^2 \Phi_{1k} + \frac{2}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi_{1k}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \Phi_{1k}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \Phi_{2k}}{\partial r \partial \theta} + \frac{\xi}{r} \frac{\partial^2 \Phi_{3k}}{\partial \theta^2} i + \xi \frac{\partial \Phi_{3k}}{\partial r} i \right) \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{rrk} &= \mu \left[-\frac{\lambda}{\mu} M_p^2 \xi^2 \Phi_{1k} + 2 \left(\frac{\partial^2 \Phi_{1k}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi_{2k}}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial \theta} + \xi \frac{\partial^2 \Phi_{3k}}{\partial r^2} i \right) \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{r\eta k} &= \mu \left[2\xi \frac{\partial \Phi_{1k}}{\partial r} i + \frac{\xi}{r} \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial \theta} i - \xi^2 (1 + m_s^2) \frac{\partial \Phi_{3k}}{\partial r} \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{\eta\theta k} &= \mu \left[\frac{2\xi}{r} \frac{\partial \Phi_{1k}}{\partial \theta} i - \xi \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial r} i - \frac{\xi^2 (1 + m_s^2)}{r} \frac{\partial \Phi_{3k}}{\partial \theta} \right] e^{i\xi\eta}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{r\theta k} &= \mu \left(\frac{2}{r} \frac{\partial^2 \Phi_{1k}}{\partial \theta \partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \Phi_{1k}}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi_{2k}}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 \Phi_{2k}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_{2k}}{\partial r} + \frac{2\xi}{r} \frac{\partial^2 \Phi_{3k}}{\partial r \partial \theta} i - \frac{2\xi}{r^2} \frac{\partial \Phi_{3k}}{\partial \theta} i \right) e^{i\xi\eta}; \\ u_{x1} &= \left(\frac{\partial \Phi_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_{21}}{\partial y} + \xi \frac{\partial \Phi_{31}}{\partial x} i \right) e^{i\xi\eta}, \quad u_{y1} = \left(\frac{\partial \Phi_{11}}{\partial y} - \frac{\partial \Phi_{21}}{\partial x} + \xi \frac{\partial \Phi_{31}}{\partial y} i \right) e^{i\xi\eta}, \quad u_{\eta 1} = \left(\xi \Phi_{11} i - \xi^2 m_s^2 \Phi_{31} \right) e^{i\xi\eta}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta\eta 1} &= -\mu \left[\left(2 + \frac{\lambda}{\mu} M_p^2 \right) \xi^2 \Phi_{11} + 2m_s^2 \xi^3 \Phi_{31} i \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{yy1} &= \mu \left[-\frac{\lambda}{\mu} M_p^2 \xi^2 \Phi_{11} + 2 \left(\frac{\partial^2 \Phi_{11}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Phi_{21}}{\partial x \partial y} + \xi \frac{\partial^2 \Phi_{31}}{\partial y^2} i \right) \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{xx1} &= \mu \left[-\frac{\lambda}{\mu} M_p^2 \xi^2 \Phi_{11} + 2 \left(\frac{\partial^2 \Phi_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{21}}{\partial x \partial y} + \xi \frac{\partial^2 \Phi_{31}}{\partial x^2} i \right) \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{x\eta 1} &= \mu \left[2\xi \frac{\partial \Phi_{11}}{\partial x} i + \xi \frac{\partial \Phi_{21}}{\partial y} i - \xi^2 (1 + m_s^2) \frac{\partial \Phi_{31}}{\partial x} \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{\eta y 1} &= \mu \left[2\xi \frac{\partial \Phi_{11}}{\partial y} i - \xi \frac{\partial \Phi_{21}}{\partial x} i - \xi^2 (1 + m_s^2) \frac{\partial \Phi_{31}}{\partial y} \right] e^{i\xi\eta}, \\ \sigma_{xy1} &= \mu \left(2 \frac{\partial^2 \Phi_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Phi_{21}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Phi_{21}}{\partial x^2} + 2\xi \frac{\partial^2 \Phi_{31}}{\partial x \partial y} i \right) e^{i\xi\eta}. \end{aligned} \quad (15)$$

В дозвуковом случае $M_{sk} < 1$ ($m_{sk} > 0$, $k=1,2$), и решения уравнений (11) можно представить в виде [1]

$$\Phi_{jk} = \Phi_{jk}^{(1)} + \Phi_{jk}^{(2)}, \quad j=1,2,3, \quad k=1,2, \quad (16)$$

где:

– для массива

$$\Phi_{j1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} K_n(k_{j1} r) e^{in\theta}, \quad \Phi_{j1}^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\xi, \zeta) \exp\left(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_{j1}^2}\right) d\zeta; \quad (17)$$

– для несущего слоя

$$\Phi_{j2}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj+3} K_n(k_{j2}r) e^{in\theta}, \quad \Phi_{j2}^{(2)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj+6} I_n(k_{j2}r) e^{in\theta}. \quad (18)$$

Здесь $I_n(k_j r), K_n(k_j r)$ — соответственно модифицированные функции Бесселя и функции Макдональда, $k_{j1} = |m_{j1} \xi|, k_{j2} = |m_{j2} \xi|, j = 1, 2, 3; g_j(\xi, \zeta), a_{n1}, \dots, a_{n9}$ — неизвестные функции и коэффициенты, подлежащие определению.

Как показано в [1], представление потенциалов для полупространства в форме (16) приводит к их следующим выражениям в декартовой системе координат:

$$\Phi_{j1} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-xf_j}}{2f_j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} \Phi_{nj} + g_j(\xi, \zeta) e^{(x-h)f_j} \right] e^{iy\zeta} d\zeta, \quad (19)$$

где $f_j = \sqrt{\zeta^2 + k_{j1}^2}, \Phi_{nj} = [(\zeta + f_j)/k_{j1}]^n, j = 1, 2, 3.$

Воспользуемся с учётом (19) граничными условиями на свободной от нагрузок поверхности полупространства:

$$\text{при } x = h \quad \sigma_{xx1} = \sigma_{xy1} = \sigma_{x\eta1} = 0. \quad (20)$$

Выделяя коэффициенты при $e^{iy\zeta}$ и приравнявая, в силу произвольности y , их нулю, получим систему трёх уравнений, из которой выражаем функции $g_j(\xi, \zeta)$ через неизвестные коэффициенты a_{n1}, a_{n2}, a_{n3} :

$$g_j(\xi, \zeta) = \frac{1}{\Delta_*} \sum_{l=1}^3 \Delta_{jl}^* e^{-hf_l} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nl} \Phi_{nl}, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_* &= (2\rho_*^2 - \beta^2)^2 - 4\rho_*^2 \sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2} \sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}, \\ \Delta_{11}^* &= \frac{\Delta_*}{2\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}} - \frac{(2\rho_*^2 - \beta^2)^2}{\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}}, \quad \Delta_{12}^* = -2\zeta(2\rho_*^2 - \beta^2), \quad \Delta_{13}^* = 2\xi(2\rho_*^2 - \beta^2)\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}, \\ \Delta_{21}^* &= -\frac{M_{s1}^2}{m_{s1}^2} \Delta_{12}^*, \quad \Delta_{22}^* = -\frac{\Delta_{**}}{2\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}}, \quad \Delta_{23}^* = -4\xi\zeta \frac{M_{s1}^2}{m_{s1}^2} \sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2} \sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}, \\ \Delta_{31}^* &= -\frac{\Delta_{13}^*}{m_{s1}^2 \xi^2}, \quad \Delta_{32}^* = \frac{\Delta_{21}^*}{\beta^2}, \quad \Delta_{33}^* = -\frac{\Delta_{**}}{2\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}} + \frac{(2\rho_*^2 - \beta^2)^2}{\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}}, \end{aligned}$$

$$\alpha = M_{p1} \xi, \quad \beta = M_{s1} \xi, \quad \rho_*^2 = \xi^2 + \zeta^2, \quad \Delta_{**} = (2\rho_*^2 - \beta^2)^2 - 4\rho_*^2 \sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2} \sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}, \quad \rho_{**}^2 = \xi^2 + (2/m_{s1}^2 - 1)\zeta^2.$$

Заметим, что $\Delta_*(\rho_*)$ — определитель Рэлея, который обращается в нуль при $\rho_{*R}^2 = \xi^2 M_R^2$ или в двух точках $\pm \zeta_R = \pm |\xi| \sqrt{M_R^2 - 1}$, где $M_R = c/c_R$ — число Маха, c_R — скорость поверхностных волн Рэлея [1], которую условимся называть рэлеевской скоростью. Из последнего следует, что $\Delta_*(\rho_*)$ не обращается в нуль на действительной оси, если $M_R < 1$, или $c < c_R$, т.е. при дорэлеевских скоростях движения нагрузки. В этом случае потенциалы (19) можно представить в виде

$$\Phi_{j1} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-xf_j}}{2f_j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} \Phi_{nj} + e^{(x-h)f_j} \sum_{l=1}^3 \frac{\Delta_{jl}^*}{\Delta_*} e^{-hf_l} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nl} \Phi_{nl} \right] e^{iy\zeta} d\zeta. \quad (22)$$

Следует отметить, что рэлеевская скорость c_R несколько ниже (на 5÷10 %) скорости волн сдвига в массиве [3].

Подставляя (22) в (14), (15), получим формулы для вычислений компонент напряженно-деформированного состояния массива в декартовых координатах при $c < c_R$:

$$u_{i1} = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^3 (U_{lj}^{(1)} F_{nj}^{(1)} + U_{lj}^{(2)} F_{nj}^{(2)}) e^{i(y\zeta + \xi\eta)} d\zeta, \quad (23)$$

$$\frac{\sigma_{lm1}}{\mu_1} = \int \sum_{j=1}^3 \left(S_{lmj}^{(1)} F_{nj}^{(1)} + S_{lmj}^{(2)} F_{nj}^{(2)} \right) e^{i(y\zeta + \xi\eta)} d\zeta.$$

Здесь: $l = x, y, \eta$, $m = x, y, \eta$;

$$\begin{aligned} F_{nj}^{(1)} &= \frac{e^{-xf_j}}{2f_j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} \Phi_{nj}, & F_{nj}^{(2)} &= e^{(x-h)f_j} \sum_{l=1}^3 \frac{\Delta_{jl}^*}{\Delta_*} e^{-hf_l} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nl} \Phi_{nl}, \\ U_{x1}^{(1)} &= -U_{x1}^{(2)} = -f_1, & U_{x2}^{(1)} &= U_{x2}^{(2)} = -\zeta, & U_{x3}^{(1)} &= -U_{x3}^{(2)} = f_3 \xi, \\ U_{y1}^{(1)} &= U_{y1}^{(2)} = i\zeta, & U_{y2}^{(1)} &= -U_{y2}^{(2)} = if_2, & U_{y3}^{(1)} &= U_{y3}^{(2)} = -i\xi\zeta, \\ U_{\eta 1}^{(1)} &= U_{\eta 1}^{(2)} = i\xi, & U_{\eta 2}^{(1)} &= U_{\eta 2}^{(2)} = 0, & U_{\eta 3}^{(1)} &= U_{\eta 3}^{(2)} = -im_{s1}^2 \xi^2, \\ S_{xx1}^{(1)} &= S_{xx1}^{(2)} = n_2 + 2(f_1^2 - \xi^2 m_{p1}^2), & S_{xx2}^{(1)} &= -S_{xx2}^{(2)} = 2\zeta f_2, & S_{xx3}^{(1)} &= S_{xx3}^{(2)} = -2f_3^2 \xi, \\ S_{yy1}^{(1)} &= S_{yy1}^{(2)} = n_2 - 2(\zeta^2 + \xi^2 m_{p1}^2), & S_{yy2}^{(1)} &= -S_{yy2}^{(2)} = -2f_2 \zeta, & S_{yy3}^{(1)} &= S_{yy3}^{(2)} = 2\xi \zeta^2, \\ S_{\eta\eta 1}^{(1)} &= S_{\eta\eta 1}^{(2)} = n_2 - 2n_1, & S_{\eta\eta 2}^{(1)} &= S_{\eta\eta 2}^{(2)} = 0, & S_{\eta\eta 3}^{(1)} &= S_{\eta\eta 3}^{(2)} = 2m_{s1}^2 \xi^3, \\ S_{xy1}^{(1)} &= -S_{xy1}^{(2)} = -2f_1 \zeta i, & S_{xy2}^{(1)} &= S_{xy2}^{(2)} = -(f_2^2 + \zeta^2) i, & S_{xy3}^{(1)} &= -S_{xy3}^{(2)} = 2f_3 \xi \zeta i, \\ S_{\eta y 1}^{(1)} &= S_{\eta y 1}^{(2)} = -2\xi \zeta, & S_{\eta y 2}^{(1)} &= -S_{\eta y 2}^{(2)} = -\xi f_2, & S_{\eta y 3}^{(1)} &= S_{\eta y 3}^{(2)} = n_2 \zeta, \\ S_{x\eta 1}^{(1)} &= -S_{x\eta 1}^{(2)} = -2f_1 \xi i, & S_{x\eta 2}^{(1)} &= S_{x\eta 2}^{(2)} = -\xi \zeta i, & S_{x\eta 3}^{(1)} &= -S_{x\eta 3}^{(2)} = n_2 f_3 i, \end{aligned}$$

$n_1 = (1 + m_{p1}^2) \xi^2$, $n_2 = (1 + m_{s1}^2) \xi^2$.

Используя известное при $x < h$ соотношение [1]:

$$\exp\left(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(k_j r) e^{in\theta} \left[\left(\zeta + \sqrt{\zeta^2 + k_j^2} \right) / k_j \right]^n e^{-h\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}},$$

представим Φ_{j1} (16) в цилиндрической системе координат:

$$\Phi_{j1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(a_{nj} K_n(k_{j1} r) + I_n(k_{j1} r) \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\xi, \zeta) \Phi_{nj} e^{-hf_j} d\zeta \right) e^{in\theta}.$$

Подставляя в последнее выражение из (21) $g_j(\xi, \zeta)$, для $c < c_R$ получим:

$$\Phi_{j1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(a_{nj} K_n(k_{j1} r) + b_{nj} I_n(k_{j1} r) \right) e^{in\theta}, \quad (24)$$

где $b_{nj} = \sum_{l=1}^3 \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_{ml} A_{nj}^{ml}$, $A_{nj}^{ml} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta_{jl}^*}{\Delta_*} \Phi_{ml} \Phi_{nj} e^{-h(f_l + f_j)} d\zeta$.

Подставляя (24) в (12), (13), получаем формулы для вычислений компонент напряженно-деформированного состояния массива в цилиндрических координатах при $c < c_R$:

$$u_{l1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^3 \left[U_{lj1}^{(1)} (K_n(k_{j1} r)) a_{nj} + U_{lj1}^{(2)} (I_n(k_{j1} r)) b_{nj} \right] e^{i(\xi\eta + n\theta)}, \quad (25)$$

$$\frac{\sigma_{lm1}}{\mu_1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^3 \left[S_{lmj1}^{(1)} (K_n(k_{j1} r)) a_{nj} + S_{lmj1}^{(2)} (I_n(k_{j1} r)) b_{nj} \right] e^{i(\xi\eta + n\theta)}.$$

Здесь $l = r, \theta, \eta$, $m = r, \theta, \eta$.

$$\begin{aligned} U_{r11}^{(1)} &= k_{11} K_n'(k_{11} r), & U_{r21}^{(1)} &= -\frac{n}{r} K_n(k_{21} r), & U_{r31}^{(1)} &= -\xi k_{31} K_n'(k_{31} r), \\ U_{\theta 11}^{(1)} &= \frac{n}{r} K_n(k_{11} r) i, & U_{\theta 21}^{(1)} &= -k_{21} K_n'(k_{21} r) i, & U_{\theta 31}^{(1)} &= -\frac{n}{r} \xi K_n(k_{31} r) i, \\ U_{\eta 11}^{(1)} &= \xi K_n(k_{11} r) i, & U_{\eta 21}^{(1)} &= 0, & U_{\eta 31}^{(1)} &= -k_{31}^2 K_n(k_{31} r) i, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{rr11}^{(1)} &= 2 \left(k_{11}^2 + \frac{n^2}{r^2} - \frac{\lambda_1 M_{p1}^2 \xi^2}{2\mu_1} \right) K_n(k_{11}r) - \frac{2k_{11}K'_n(k_{11}r)}{r}, \quad S_{rr21}^{(1)} = \frac{2n}{r^2} K_n(k_{21}r) - \frac{2k_{21}K'_n(k_{21}r)}{r}, \\
 S_{rr31}^{(1)} &= -2\xi \left(k_{31}^2 + \frac{n^2}{r^2} \right) K_n(k_{31}r) + \frac{2\xi k_{31}K'_n(k_{31}r)}{r}, \quad S_{\theta\theta 11}^{(1)} = -2 \left(\frac{n^2}{r^2} + \frac{\lambda_1 M_{p1}^2 \xi^2}{2\mu_1} \right) K_n(k_{11}r) + \frac{2k_{11}K'_n(k_{11}r)}{r}, \\
 S_{\theta\theta 21}^{(1)} &= -\frac{2nK_n(k_{21}r)}{r^2} + \frac{2nk_{21}K'_n(k_{21}r)}{r}, \quad S_{\theta\theta 31}^{(1)} = \frac{2\xi n^2 K_n(k_{31}r)}{r^2} - \frac{2\xi k_{31}K'_n(k_{31}r)}{r}, \\
 S_{\eta\eta 11}^{(1)} &= -2\xi^2 \left(\frac{1 + \lambda_1 M_{p1}^2}{2\mu_1} \right) K_n(k_{11}r), \quad S_{\eta\eta 21}^{(1)} = 0, \quad S_{\eta\eta 31}^{(1)} = 2m_{31}^2 \xi^3 K_n(k_{31}r), \\
 S_{r\theta 11}^{(1)} &= \left(-\frac{2nK_n(k_{11}r)}{r^2} + \frac{2nk_{11}K'_n(k_{11}r)}{r} \right) i, \quad S_{r\theta 21}^{(1)} = \left(-\left(k_{21}^2 + \frac{2n^2}{r^2} \right) K_n(k_{21}r) + \frac{2k_{21}K'_n(k_{21}r)}{r} \right) i, \\
 S_{r\theta 31}^{(1)} &= \left(\frac{2n\xi K_n(k_{31}r)}{r^2} - \frac{2n\xi k_{31}K'_n(k_{31}r)}{r} \right) i, \\
 S_{\theta\eta 11}^{(1)} &= -\frac{2n\xi K_n(k_{11}r)}{r}, \quad S_{\theta\eta 21}^{(1)} = \xi k_{21} K'_n(k_{21}r), \quad S_{\theta\eta 31}^{(1)} = \frac{n\xi^2 (1 + m_{31}^2) K_n(k_{31}r)}{r}, \\
 S_{r\eta 11}^{(1)} &= 2\xi k_{11} K'_n(k_{11}r) i, \quad S_{r\eta 21}^{(1)} = -\frac{\xi n K_n(k_{21}r) i}{r}, \quad S_{r\eta 31}^{(1)} = -\xi^2 k_{31} (1 + m_{31}^2) K'_n(k_{31}r) i; \\
 K'_n(k_{j1}r) &= \frac{dK_n(k_{j1}r)}{d(k_{j1}r)}; \quad U_{lj1}^{(2)}, \quad S_{lmj1}^{(2)} \text{ получаются из } U_{lj1}^{(1)}, \quad S_{lmj1}^{(1)} \text{ заменой } K_n \text{ на } I_n.
 \end{aligned}$$

Подставляя Φ_{j2} (16) в (12), (13), получаем формулы для вычислений компонент напряженно-деформированного состояния несущего слоя при $c < c_R$:

$$\begin{aligned}
 u_{l2} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^3 \left[U_{lj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}r)) a_{nj+3} + U_{lj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}r)) a_{nj+6} \right] e^{i(\xi\eta+n\theta)}, \\
 \frac{\sigma_{lm2}}{\mu_2} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^3 \left[S_{lmj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}r)) a_{nj+3} + S_{lmj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}r)) a_{nj+6} \right] e^{i(\xi\eta+n\theta)}.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Здесь $l = r, \theta, \eta$, $m = r, \theta, \eta$.

$$\begin{aligned}
 U_{r12}^{(1)} &= k_{12} K'_n(k_{12}r), \quad U_{r22}^{(1)} = -\frac{n}{r} K_n(k_{22}r), \quad U_{r32}^{(1)} = -\xi k_{32} K'_n(k_{32}r), \\
 U_{\theta 12}^{(1)} &= \frac{n}{r} K_n(k_{12}r) i, \quad U_{\theta 22}^{(1)} = -k_{22} K'_n(k_{22}r) i, \quad U_{\theta 32}^{(1)} = -\frac{n}{r} \xi K_n(k_{32}r) i, \\
 U_{\eta 12}^{(1)} &= \xi K_n(k_{12}r) i, \quad U_{\eta 22}^{(1)} = 0, \quad U_{\eta 32}^{(1)} = -k_{32}^2 K_n(k_{32}r) i, \\
 S_{rr12}^{(1)} &= 2 \left(k_{12}^2 + \frac{n^2}{r^2} - \frac{\lambda_2 M_{p2}^2 \xi^2}{2\mu_2} \right) K_n(k_{12}r) - \frac{2k_{12}K'_n(k_{12}r)}{r}, \quad S_{rr22}^{(1)} = \frac{2n}{r^2} K_n(k_{22}r) - \frac{2k_{22}K'_n(k_{22}r)}{r}, \\
 S_{rr32}^{(1)} &= -2\xi \left(k_{32}^2 + \frac{n^2}{r^2} \right) K_n(k_{32}r) + \frac{2\xi k_{32}K'_n(k_{32}r)}{r}, \quad S_{\theta\theta 12}^{(1)} = -2 \left(\frac{n^2}{r^2} + \frac{\lambda_2 M_{p2}^2 \xi^2}{2\mu_2} \right) K_n(k_{12}r) + \frac{2k_{12}K'_n(k_{12}r)}{r}, \\
 S_{\theta\theta 22}^{(1)} &= -\frac{2nK_n(k_{22}r)}{r^2} + \frac{2nk_{22}K'_n(k_{22}r)}{r}, \quad S_{\theta\theta 32}^{(1)} = \frac{2\xi n^2 K_n(k_{32}r)}{r^2} - \frac{2\xi k_{32}K'_n(k_{32}r)}{r}, \\
 S_{\eta\eta 12}^{(1)} &= -2\xi^2 \left(\frac{1 + \lambda_2 M_{p2}^2}{2\mu_2} \right) K_n(k_{12}r), \quad S_{\eta\eta 22}^{(1)} = 0, \quad S_{\eta\eta 32}^{(1)} = 2m_{32}^2 \xi^3 K_n(k_{32}r), \\
 S_{r\theta 12}^{(1)} &= \left(-\frac{2nK_n(k_{12}r)}{r^2} + \frac{2nk_{12}K'_n(k_{12}r)}{r} \right) i, \quad S_{r\theta 22}^{(1)} = \left(-\left(k_{22}^2 + \frac{2n^2}{r^2} \right) K_n(k_{22}r) + \frac{2k_{22}K'_n(k_{22}r)}{r} \right) i,
 \end{aligned}$$

$$S_{r\theta 32}^{(1)} = \left(\frac{2n\xi K_n(k_{32}r)}{r^2} - \frac{2n\xi k_{32}K_n'(k_{32}r)}{r} \right) i,$$

$$S_{\theta\eta 12}^{(1)} = -\frac{2n\xi K_n(k_{12}r)}{r}, \quad S_{\theta\eta 22}^{(1)} = \xi k_{22}K_n'(k_{22}r), \quad S_{\theta\eta 32}^{(1)} = \frac{n\xi^2(1+m_{32}^2)K_n(k_{32}r)}{r},$$

$$S_{r\eta 12}^{(1)} = 2\xi k_{12}K_n'(k_{12}r)i, \quad S_{r\eta 22}^{(1)} = -\frac{\xi n K_n(k_{22}r)i}{r}, \quad S_{r\eta 32}^{(1)} = -\xi^2 k_{32}(1+m_{32}^2)K_n'(k_{32}r)i; \quad K_n'(k_{j2}r) = \frac{dK_n(k_{j2}r)}{d(k_{j2}r)};$$

$U_{ij2}^{(2)}, S_{lmj2}^{(2)}$ получаются из $U_{ij2}^{(1)}, S_{lmj2}^{(1)}$ заменой K_n на I_n .

При действии на оболочку бегущей синусоидальной нагрузки в установившемся состоянии зависимость всех величин от η имеет вид (9), поэтому

$$u_{0j}(\theta, \eta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u_{0nj} e^{in\theta} e^{i\xi n \eta}, \quad j = r, \theta, \eta. \quad (27)$$

Подставляя (27) в (2), для n -го члена разложения получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^2 u_{0m\eta} + v_{02} n \xi_0 u_{0n\theta} - 2i v_0 \xi_0 u_{0nr} &= G_0 (q_{m\eta 2} - q_{m\eta 1}), \\ v_{02} n \xi_0 u_{0m\eta} + \varepsilon_2^2 u_{0n\theta} - 2i n u_{0nr} &= G_0 (q_{n\theta 2} - q_{n\theta 1}), \\ 2i v_0 \xi_0 u_{0m\eta} + 2i n u_{0n\theta} + \varepsilon_3^2 u_{0nr} &= G_0 (q_{nr 2} - q_{nr 1}), \end{aligned} \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^2 &= \alpha_0^2 - \varepsilon_0^2, \quad \varepsilon_2^2 = \beta_0^2 - \varepsilon_0^2, \quad \varepsilon_3^2 = \gamma_0^2 - \varepsilon_0^2, \quad \xi_0 = \xi R, \\ \alpha_0^2 &= 2\xi_0^2 + v_{01} n^2, \quad \beta_0^2 = v_{01} \xi_0^2 + 2n^2, \quad \gamma_0^2 = \chi^2 (\xi_0^2 + n^2)^2 + 2, \quad \varepsilon_0^2 = v_{01} \xi_0^2 M_{s0}^2, \\ v_{01} &= 1 - v_0, \quad v_{02} = 1 + v_0, \quad M_{s0} = c / c_{s0}, \quad c_{s0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\rho_0}}, \quad \chi^2 = \frac{h_0^2}{6R^2}, \quad G_0 = -\frac{v_{01} R^2}{\mu_0 h_0}; \end{aligned}$$

при $r = R_1$: $q_{nj1} = (\sigma_{rj1})_n, q_{nj2} = (\sigma_{rj2})_n, j = \eta, \theta, r$.

Разрешая (28) относительно $u_{0m\eta}, u_{0n\theta}, u_{0nr}$, находим:

$$u_{0m\eta} = \frac{G_0}{\delta_n} \sum_{j=1}^3 \delta_{\eta j} (q_{nj2} - q_{nj1}), \quad u_{0n\theta} = \frac{G_0}{\delta_n} \sum_{j=1}^3 \delta_{\theta j} (q_{nj2} - q_{nj1}), \quad u_{0nr} = \frac{G_0}{\delta_n} \sum_{j=1}^3 \delta_{rj} (q_{nj2} - q_{nj1}). \quad (29)$$

Здесь $\delta_n = \delta_{|n|} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3)^2 - (\varepsilon_1 \xi_1)^2 - (\varepsilon_2 \xi_2)^2 - (\varepsilon_3 \xi_3)^2 + 2\xi_1 \xi_2 \xi_3$,

$$\delta_{\eta 1} = (\varepsilon_2 \varepsilon_3)^2 - \xi_1^2, \quad \delta_{\eta 2} = \xi_1 \xi_2 - \xi_3 \varepsilon_3^2, \quad \delta_{\eta 3} = i(\varepsilon_2^2 \xi_2 - \xi_1 \xi_3),$$

$$\delta_{\theta 1} = \delta_{\eta 2}, \quad \delta_{\theta 2} = (\varepsilon_1 \varepsilon_3)^2 - \xi_2^2, \quad \delta_{\theta 3} = i(\varepsilon_1^2 \xi_1 - \xi_2 \xi_3),$$

$$\delta_{r1} = -\delta_{\eta 3}, \quad \delta_{r2} = -\delta_{\theta 3}, \quad \delta_{r3} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2)^2 - \xi_3^2, \quad \xi_1 = 2n, \quad \xi_2 = 2v_0 \xi_0, \quad \xi_3 = v_{02} \xi_0 n;$$

для q_{nj1} и q_{nj2} индекс $j = 1$ соответствует индексу $\eta, j = 2$ — $\theta, j = 3$ — r .

Для определения входящих в выражения (23), (25), (26) коэффициентов a_{n1}, \dots, a_{n9} воспользуемся следующими граничными условиями.

При скользящем контакте слоёв оболочки:

– для скользящего контакта оболочки с массивом

$$\text{при } r = R_1 \quad u_{r1} = u_{r2}, u_{r2} = u_{0r}, \quad \sigma_{r\eta 2} = 0, \quad \sigma_{r\theta 2} = 0, \quad \sigma_{r\eta 1} = 0, \quad \sigma_{r\theta 1} = 0,$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \sigma_{rj2} = P_j(\theta, \eta), \quad j = r, \theta, \eta, \quad (30)$$

– для жёсткого контакта оболочки с массивом

$$\text{при } r = R_1 \quad u_{r1} = u_{r2}, \quad \sigma_{r\eta 2} = 0, \quad \sigma_{r\theta 2} = 0, \quad u_{j1} = u_{0j},$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \sigma_{rj2} = P_j(\theta, \eta), \quad j = r, \theta, \eta. \quad (31)$$

При жёстком сопряжении слоёв оболочки:

– для скользящего контакта оболочки с массивом

$$\text{при } r = R_1 \quad u_{r1} = u_{r2}, \quad u_{j2} = u_{0j}, \quad \sigma_{r\eta1} = 0, \quad \sigma_{r\theta1} = 0,$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \sigma_{rj2} = P_j(\theta, \eta), \quad j = r, \theta, \eta, \quad (32)$$

– для жёсткого контакта оболочки с массивом

$$\text{при } r = R_1 \quad u_{j1} = u_{j2}, \quad u_{j1} = u_{0j}, \quad (33)$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \sigma_{rj2} = P_j(\theta, \eta), \quad j = r, \theta, \eta.$$

Подставляя в любое из граничных условий (30)–(33) соответствующие выражения и приравнявая коэффициенты рядов при $e^{in\theta}$, получим бесконечную систему ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) линейных алгебраических уравнений, для решения которой рекомендуется использовать метод последовательных отражений (приближений) [4]. Согласно этому методу граничные условия можно представить в виде бесконечной системы линейных алгебраических уравнений блочно-диагонального типа с матрицами (9×9) вдоль главной диагонали:

– граничные условия (30)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^3 \left[U_{rj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} - U_{rj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} - U_{rj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \\ & = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 U_{rj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\ & \sum_{j=1}^3 \left\{ \delta_{r3} S_{rrj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} + \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{rj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) - \tau \delta_{r3} S_{rrj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) \right] a_{nj+3}^{(2K)} + \right. \\ & \left. + \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{rj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) - \tau \delta_{r3} S_{rrj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) \right] a_{nj+6}^{(2K)} \right\} = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 \left[\delta_{r3} S_{rrj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) \right] a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\ & \sum_{j=1}^3 \left[S_{r\eta j2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} + S_{r\eta j2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = 0, \\ & \sum_{j=1}^3 \left[S_{r\theta j2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} + S_{r\theta j2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = 0, \\ & \sum_{j=1}^3 S_{r\eta j1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 S_{r\eta j1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\ & \sum_{j=1}^3 S_{r\theta j1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 S_{r\theta j1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\ & \sum_{j=1}^3 \left[\tau S_{rmj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+3}^{(2K)} + \tau S_{rmj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \begin{cases} P_{nm}/\mu_1 & \text{при } K = 0, \\ 0 & \text{при } K \neq 0; \end{cases} \end{aligned}$$

– граничные условия (31)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^3 \left[U_{rj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} - U_{rj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} - U_{rj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \\ & = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 U_{rj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\ & \sum_{j=1}^3 \left[S_{r\eta j2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} + S_{r\eta j2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^3 \left[S_{r\theta j 2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} + S_{r\theta j 2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = 0, \\
 & \sum_{j=1}^3 \left\{ \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{mj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) + \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) \right] a_{nj}^{(2K)} - \right. \\
 & \quad \left. - \tau \delta_{m3} S_{rrj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} - \tau \delta_{m3} S_{rrj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right\} = \\
 & = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{mj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) + \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) \right] a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\
 & \sum_{j=1}^3 \left[\tau S_{rmj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+3}^{(2K)} + \tau S_{rmj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \begin{cases} P_{nm} / \mu_1 & \text{при } K = 0, \\ 0 & \text{при } K \neq 0; \end{cases} \\
 & \text{– граничные условия (32)} \\
 & \sum_{j=1}^3 \left[U_{rj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} - U_{rj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} - U_{rj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \\
 & = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 U_{rj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\
 & \sum_{j=1}^3 \left\{ \delta_{m3} S_{rrj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} + \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{mj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) - \tau \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) \right] a_{nj+3}^{(2K)} + \right. \\
 & \left. + \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{mj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) - \tau \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) \right] a_{nj+6}^{(2K)} \right\} = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 \left[\delta_{m3} S_{rrj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) \right] a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\
 & \sum_{j=1}^3 S_{rvj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 S_{rvj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\
 & \sum_{j=1}^3 S_{r\theta j 1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 S_{r\theta j 1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\
 & \sum_{j=1}^3 \left[\tau S_{rmj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+3}^{(2K)} + \tau S_{rmj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \begin{cases} P_{nm} / \mu_1 & \text{при } K = 0, \\ 0 & \text{при } K \neq 0; \end{cases} \\
 & \text{– граничные условия (33)} \\
 & \sum_{j=1}^3 \left[U_{mj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K)} - T_{mj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} - U_{mj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \\
 & = \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 U_{mj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases} \\
 & \sum_{j=1}^3 \left\{ \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{mj1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) + \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij1}^{(1)}(K_n(k_{j1}R_1)) \right] a_{nj}^{(2K)} - \right. \\
 & \quad \left. - \tau \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+3}^{(2K)} - \tau \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_1)) a_{nj+6}^{(2K)} \right\} =
 \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{при } K = 0, \\ -\sum_{j=1}^3 \left[\frac{\delta_n}{G_0 \mu_1} U_{mj1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) + \sum_{i=1}^3 \delta_{mi} S_{rij1}^{(2)}(I_n(k_{j1}R_1)) \right] a_{nj}^{(2K-1)} & \text{при } K \neq 0, \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^3 \left[\tau S_{rmj2}^{(1)}(K_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+3}^{(2K)} + \tau S_{rmj2}^{(2)}(I_n(k_{j2}R_2)) a_{nj+6}^{(2K)} \right] = \begin{cases} P_{nm}/\mu_1 & \text{при } K = 0, \\ 0 & \text{при } K \neq 0. \end{cases}$$

Здесь $m = r, \theta, \eta$, $\tau = \mu_2/\mu_1$; для S_{rij} $i = 1 = \eta$, $i = 2 = \theta$, $i = 3 = r$.

Если определитель, соответствующий определённым граничным условиям системы уравнений, не равен нулю, окончательно получим: $a_{nJ} = a_{nJ}^{(0)} + a_{nJ}^{(2)} + a_{nJ}^{(4)} + \dots$, $J = 1, 2, \dots, 9$.

После определения коэффициентов a_{nJ} ($J = 1, 2, \dots, 9$) компоненты напряжённо-деформированного состояния массива и несущего слоя можно вычислить по формулам (23), (25), (26).

В случае произвольной периодической по η нагрузки, разлагая ее в ряд Фурье, для каждой составляющей ряда получим рассмотренную выше задачу.

Решение аналогичной задачи для упругого пространства можно получить из данного решения, если исключить из (16) $\Phi_{j1}^{(2)}$ и рассматривать граничные условия только при $K = 0$.

References

1. *Erzhanov Zh.S., Aitaliev Sh.M., Alekseyeva L.A.* Dynamics of tunnels and underground pipelines. — Alma-Ata: Science, 1989. — 240 p.
2. *Alekseyeva L.A., Ukrainets V.N.* Problem of permanent traffic load in elastically supported cylindrical cavity in elastic half-space // International Applied Mechanics. — 2009. — № 9. — P. 75–85.
3. *Timoshenko S.P., Goodier J.N.* Theory of Elasticity. — M.: Science, 1979. — 560 p.
4. *Ukrainets V.N.* Dynamics of shallow tunnels and underground pipelines under moving loads. — Pavlodar: The scientific publishing center of PSU named after S.Toraigurov, 2006. — 123 p.

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 658.26:001.891.574

Системы теплоснабжения с энергосберегающими радиаторами и эффективными теплоносителями

Heat supply systems with energy saving radiators and effective heat-transfer materials

Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Ким П.М., Белик Г.А.

Карагандинский государственный технический университет (E-mail: barton.kz@mail.ru)

Тиімді жылу шығаратын заты бар электр вакуум радиаторлары көмегімен адамдар тұратын және өнеркәсіп ғимараттарының жылумен жабдықталу жүйелеріндегі қуат жинағының инновациялық технологияларын қолданудың өзектілігі осы мақалада дәлелденді. Түпкі мақсат электр энергиясының ең төменгі шығындарында олардың жылытқыш жүйелерінің қолдануы үшін тиімді жылу шығаратын заттың ішкі энергиясын қолданудың әдістерін өңдеу болып табылады. Біздің жұмыс энергия сақтау радиаторлар және тиімді жылу шығаратын заттардың қолдануы тұрғын үйлердің жылытуында энергияның тұтынуын түбегейлі қысқартуға бағытталған. Жылу шығаратын заттың белсенділігі және жылулық қуаттың алуы жүйенің жұмысының барлық тиімділігі жұмыс затының ішкі энергиясы қолдану есебінен табылады. Жылыту радиаторында жылу шығаратын зат ретінде электрожылытқыш пайдаланылады.

In this article the topicality of using the innovational energy saving technologies in residential and industrial buildings' heat supply with a help of electrical vacuum radiators with effective heat-transfer material is proved. The main aim is developing the methods of using the effective heat-transfer material's internal energy with minimum electric power expenses for applying in heating systems. Our work is aimed at considerable reduction of energy consumption for housings' heating by using the energy saving radiators and effective heat-transfer materials. The whole effectiveness of system's work is in heat-transfer material stirring up and thermal power obtaining by using the internal energy of working material. In the heating radiator the electric heater is used as a source of the heat-transfer material's heating.

Рост потребления энергоресурсов сопряжен с экологической проблемой, напрямую связанной с загрязнением окружающей среды и истощением минеральных ресурсов. Существует острая необходимость сокращения выбросов CO₂. При игнорировании этих обстоятельств человечество может оказаться на пороге глобальной катастрофы. Чтобы избежать возможных последствий, необходимо уделить внимание развитию энергосберегающих технологий и их использованию в сфере энергетики. Это позволит обеспечить решение важных научных задач оптимального и рационального энергопотребления, а на практике — реализовать принцип сокращения потерь энергии при ее производстве, транспортировке и потреблении. Рациональнее сократить потерю одного киловатт/часа выработанной энергии, чем его выработать, особенно это обстоятельство касается систем теплоснабжения городов и населенных пунктов.

Нет необходимости доказывать актуальность использования технологий энергосбережения в системах тепло- и энергообеспечения жилых зданий и промышленных сооружений, так как они уже реализуются в различных устройствах повсеместно на практике. Примерно до 60 % энергопотребления городов в зимний период приходится на системы теплоснабжения.

На сегодняшний день в Казахстане системы теплоснабжения работают за счет сжигания на тепловых станциях каменного угля для нагрева воды, которая является теплопередающей средой, циркулирует в тепловых магистралях и обеспечивает работу приборов отопления жилых помещений. Теплоносителю приходится преодолевать расстояния в десятки километров — от тепловой станции до радиаторов отопления в жилых помещениях. При значительной протяженности магистральных и внутриквартальных тепловых сетей и удаленности тепловой станции потери тепловой энергии, с учетом утечек и неудовлетворительной тепловой изоляции трубопроводов, составляют 30–40 %. Немаловажным фактором являются затраты электроэнергии на работу насосов с энергоемкими приводами, обеспечивающих циркуляцию теплоносителя в системе и поддержание его рабочих параметров [1].

С учетом отмеченного выше появляется необходимость в создании новой концепции при построении систем теплоснабжения, позволяющих значительно сократить энергопотребление. Звеном этой системы может стать вакуумный энергосберегающий радиатор с эффективным теплоносителем (тепловой реагент на основе эфирных масел). Работа энергосберегающего вакуумного радиатора (ЭВР) основана на использовании внутренней энергии паров эффективного теплоносителя, активизированной нагретой поверхностью электронагревателем, что позволяет при минимальных затратах электроэнергии обеспечить необходимые теплотехнические параметры. Основной целью внедрения автономного автоматического ЭВР с эффективным теплоносителем в системы теплоснабжения является возможность значительно сократить потребление энергии на отопление жилых помещений.

На сегодняшний день существуют системы отопления, в которых используются электродкотлы с автоматической регулировкой параметров нагрева теплоносителя, что позволяет практически полностью исключить участие человека в процессе эксплуатации. Можно привести еще множество положительных доводов, касающихся использования электродкотлов, но использование электрического тока для обогрева жилых помещений на сегодняшний день будет обходиться дороже использования каменного угля [1]. Также немаловажными факторами являются перегрузка электросети и существование возможности повреждения кабельной линии. В то же время необходимо отметить, что система теплоснабжения с использованием ЭВР для жилого помещения не имеет энергоёмкого электродкотла, системы трубопроводов и циркуляционного насоса. В качестве приборов отопления используются стандартные радиаторы с созданным вакуумом во внутренней полости, изготовленные из алюминия, чугуна или стали (что в принципе неважно), которые могут наполняться эффективным теплоносителем. В качестве источника для нагрева теплоносителя и его активизации используется электронагреватель, работающий от сети 220–380 В. Тогда у оппонентов возникает вопрос: разве эта система может быть экономична, ведь промышленностью серийно выпускаются различные типы электронагревателей. К примеру, масляный электрорадиатор, состоящий из 8 секций, способен обогреть помещение примерно площадью 16 м², при этом энергозатраты составят около 2 кВт/час.

Если рассмотреть работу водяного радиатора отопления, то для обеспечения необходимых параметров, согласно ГОСТу 31311 РК от 2005 г., затрачивается энергия котельного агрегата в соотношении 120 Вт на 1 ребро, что обеспечивает обогрев 2-х квадратных метров жилой площади. Соответственно, потребление стандартного 7-секционного чугунного радиатора отопления марки МС-90 составит 840 Вт, без учета потерь тепла в системе трубопроводов и котельном агрегате. Водные системы отопления имеют ряд недостатков, связанных с внутренней коррозией проточных частей и возможностью возникновения утечки теплоносителя из системы теплоснабжения. Затраты на поддержание технического состояния водных систем отопления и необходимость систематического проведения профилактических и ремонтных работ указывают на их невысокую технико-экономическую эффективность. На основании отмеченного выше можно судить о необходимости поиска более эффективного варианта теплоснабжения зданий и сооружений. Эту задачу возможно решить, используя автономный источник тепловой энергии с эффективным теплоносителем, который не будет иметь недостатков традиционных систем теплоснабжения и иметь низкое энергопотребление, в отличие от электрообогревателей.

Предлагаемый энергосберегающий вакуумный радиатор способен обеспечить те же теплотехнические параметры, как и отмеченные выше радиаторы отопления, при энергопотреблении не более 300 Вт. Вся эффективность работы системы кроется в активизации теплоносителя и получении тепловой мощности за счет использования внутренней энергии рабочего вещества. Конструктивно электрический энергосберегающий радиатор схож с водными радиаторами отопления, во внутренней полости которого создан вакуум (10⁻² Торр). Для активизации эффективного теплоносителя используется электронагреватель мощностью 300 Вт. Этого вполне достаточно для его активизации и эффектив-

ной теплоотдачи. Хочется отметить следующее важное обстоятельство: ЭВР полностью автоматизировано и не требует ручного управления, контроль температуры в помещении и внутри ЭВР осуществляется при помощи встроенного полупроводникового температурного реле [2; 182, 183]. Учитывая преимущества ЭВР в низком потреблении энергии перед традиционными водными радиаторами отопления и масляными электрическими обогревателями, можно судить об их технической и экономической эффективности.

Конструктивно ЭВР отопления выполнен как обычный радиатор отопления, но внутри него не протекает нагретая вода. В его полости создается вакуум и помещен эффективный теплоноситель, активизированный электронагревателем. Внешний вид и конструктивное исполнение исследованного прототипа энергосберегающего радиатора отопления приведены на рисунке 1 (а, б).

Для повышения эффективности работы ЭВР оснащается внешними и внутренними температурными датчиками, подключенными к термореле. Это конструктивное решение позволяет выполнять контроль температуры нагрева рабочих поверхностей ЭВР по внешним и внутренним тепловым параметрам и обеспечивать его экономичный режим работы устройства.

Внешний температурный датчик осуществляет контроль температуры внутри помещения и не допускает ненужной работы при нормальной внутрикомнатной температуре, а внутренний — контролирует нагрев теплоносителя и не допускает его перегрева. При этом рабочая температура поверхностей нагрева ЭВР не превышает допустимых 80°C , но остается способность обогревать одной секцией радиатора 2 м^2 жилого помещения при затратах электроэнергии до $0,05\text{ кВт/час}$.

Хочется отметить несколько положительных факторов, повышающих показатели надежности работы ЭВР — отсутствие циркулирующей под давлением рабочей жидкости и жесткой привязки к системе трубопроводов. Важны также практически нулевая вероятность износа проточной части и возникновения утечки, отсутствие подвижных и вращающихся частей, циркуляционного насоса. Примерный ресурс работы данной системы составляет около 15–20 лет без дозаправки. Все эти обстоятельства позволяют разработать полностью автоматизированную интеллектуальную систему с низким энергопотреблением и высокой эффективностью работы.

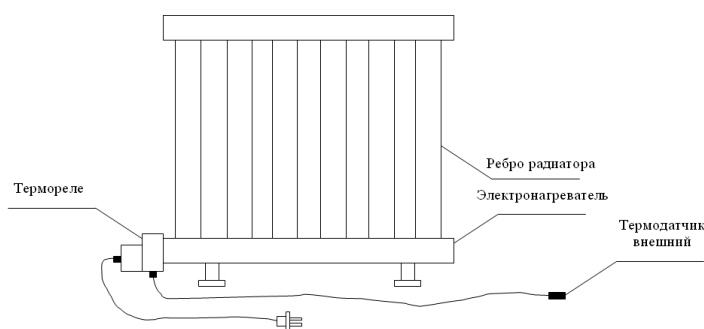


Рис. 1 (а). Конструктивное исполнение ЭВР

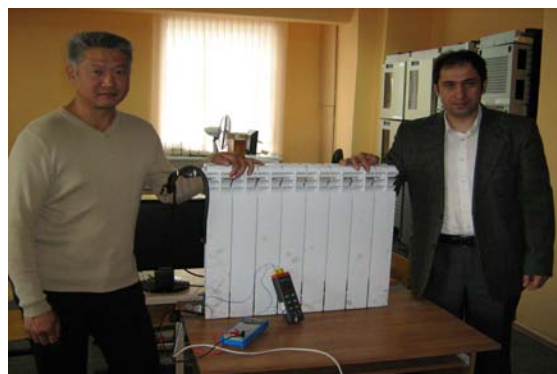


Рис. 1 (б). Экспериментальный образец ЭВР

Проведенные многочисленные исследования рабочих параметров ЭВР позволили достигнуть эффективности технических показателей его работы, оптимизировать форму и конструктивное исполнение электронагревателя с термокамерой, конвективных каналов поверхности нагрева, внутренней полости ребра, а также химическую формулу теплоносителя. Наилучший результат работы ЭВР достигается при наличии вакуума в его внутренней полости. При этом возрастает скорость набора рабочей температуры, равномерно нагреваются конвективные поверхности ЭВР и отсутствует шум, что является важными условиями комфортности при его эксплуатации [3].

Проведены исследования режимов работы данного ЭВР при нарушении вакуума во внутренней полости. При этом эффективный теплоноситель продолжает работать, но прогрев поверхностей нагрева становится неравномерным из-за скопления воздуха, возникают шумы в пределах 30–40 дБ. При изменении мощности электронагревателя от 200 до 300 Вт прослеживается зависимость изменения внутреннего давления от $0,6$ до $1,4\text{ кг/см}^2$. Следует отметить и такой фактор, серьезно влияющий на ресурс работы эффективного теплоносителя: увеличение температуры от 100°C до 150°C приво-

дит к сокращению его ресурса примерно втрое, а при температуре 200 °С он может составлять около 600 часов.

Энергосберегающие радиаторы отопления имеют значительный срок службы и отвечают всем требованиям и нормам ГОСТа 31311 РК от 2005 г. Проведенные опыты показали, что набор необходимой температуры (80 °С) обеспечивается при мощности электронагревателя 200 Вт. Естественно, скорость прогрева поверхности радиатора увеличивается при повышении электрической мощности до 300 Вт, с учетом нарушения вакуума. Результаты исследований, представленные графиками зависимости нагрева поверхностей радиатора от времени при мощности электронагревателя 200–300 Вт, с нарушением вакуума (рис. 2, 3), позволяют сделать выводы о высокой надежности и эффективности работы ЭВР отопления. Даже при аварийных утечках вакуума работоспособность радиатора сохраняется. На данный момент разработан экспериментальный образец энергосберегающего радиатора, работающего от однофазной электрической сети с потребляемой мощностью 200 Вт.

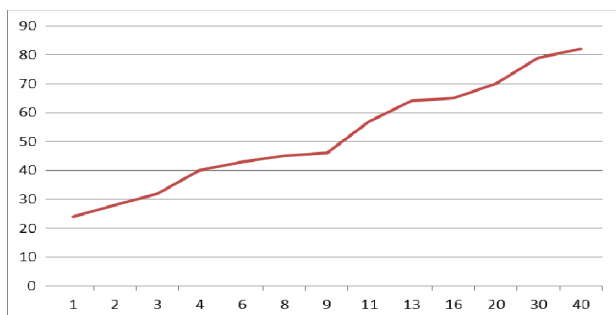


Рис. 2. Зависимость нагрева поверхностей радиатора от времени при мощности электронагревателя 200 Вт, с нарушением вакуума

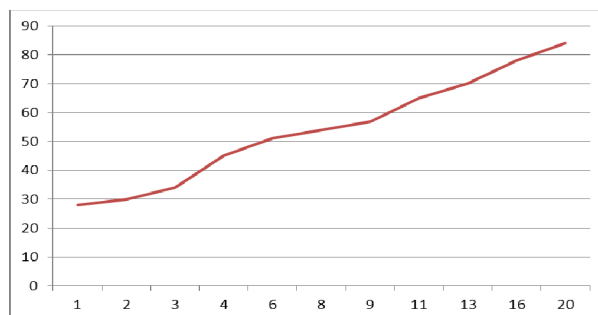


Рис. 3. Зависимость нагрева поверхностей радиатора от времени при мощности электронагревателя 300 Вт, с нарушением вакуума

Несложный математический расчет позволяет доказать экономическое преимущество от использования данной разработки. К примеру, затраты на отопление двухкомнатной квартиры в городе Караганде на 2011 г. жилой площадью 46 м² составляют примерно 3500 тенге, а при переходе на отопление с использованием трех энергосберегающих радиаторов — 2500 тенге. Разница довольно существенная, при этом стоимость энергосберегающего радиатора из 10 секций составляет примерно 15 тыс. тенге.

На основании проведенных исследований можно сделать выводы о том, что низкое энергопотребление позволяет заложить основы принципиально новой концепции развития высокоэффективных электрических систем теплоснабжения зданий и сооружений города без использования циркулирующей по трубопроводам нагретой воды, что приводит к значительным потерям тепла через их стенки, к коррозии и засорению проточной части труб, образованию воздушных пробок и необходимости продувки перед запуском системы.

Для доставки энергии радиаторам отопления используется электрический кабель и, возможно, возникает необходимость в модернизации электрической сети и прокладки дополнительных кабельных линий, однако отпадает необходимость в магистральных, районных и внутриквартальных трубопроводах, а также в энергоемких насосных станциях. Перспективным остается направление использования предложенного радиатора совместно с солнечными и аккумуляторными батареями.

Проведенные исследования показали высокую эффективность, низкое энергопотребление, надежность и безопасность работы ЭВР. Продолжается работа по совершенствованию ЭВР, что позволит использовать электронагреватель мощностью 200 Вт, способный обеспечить требуемые тепло-технические параметры с наибольшим ресурсом работы эффективного теплоносителя.

References

1. *Sotnikova O.A., Melkumov V.N.* Heat supply: Studying handbook // Published by the Association of civil engineering universities, 2009. — 296 p.
2. *Mekhtiyev A.D., Eirikh V.I., et al.* The perspectives of energy saving radiators with effective heat-transfer materials // Labors of International science conference «Science and education-leading factor of Kazakhstan-2030 strategy» (Saginov readings № 3). — Karaganda: Publ. KarSTU, 2011. — 461 p.
3. *Mekhtiyev A.D., Rakhimberlinova Zh.B., et al.* Modeling of the heat supply system // Materials of the VII International science-practical conference «Real researches and development — 2011». (January 17–25, 2011). — P. 56–58.

УДК 53:004

Синтез электрического фильтра для системы автоматического регулирования

Synthesis of the electric filter for the system of automatic regulation

Исмаилов Ж.Т.¹, Шелухин Е.Н.², Сериков Т.М.¹, Закиев Д.М.¹

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: ismailov.zharaskan@mail.ru);

²Томский политехнический университет, Россия

Мақалада сызықты функцияларымен берілген математикалық модельдер негізінде актив электр сүзгілерінің синтездеу сұлбасы ұсынылған. Әр сүзгі операциялық күшейткіштер, резисторлар мен конденсаторлар негізінде жиналған. Сүзгілердің барлық элементтері — сызықты, уақыт бойынша инвариантты болып келеді. Сүзгілердің синтезін жүргізу үшін типтік динамикалық буындардың амплитуда-жиіліктік сипаттамаларының қиылу жиіліктер мәндері мен олардың жиіліктер осіне көлбеулік бұрыштары (дБ/дек) беріледі. Сүзгілерді есептеу үшін бастапқы мәліметтер ретінде сәйкес файлда сақталған конденсаторлардың номиналдық мәндері қолданылады. Құрастырылып отырған жүйе актив сүзгілерінің элементар ұяшықтарының принципіалдық сұлбалары мен конденсаторлар сыйымдылығының номиналдық шамаларын қамтитын файлдарды жанарту арқылы кеңейту мүмкіндігі бар.

The article presents a synthesis system of active electric filters on the basis of their mathematical models provided by the linear transfer functions. Each filter is implemented with operational amplifiers, resistors and capacitors. All filter elements are linear, concentrated and invariant over time. The initial data for the synthesis filters are the cut-off frequency response model of dynamic links and angles of inclination to the axis (dB/decade). Initial data for calculation of filters are the nominal values of capacitors stored in the corresponding file. The developed system has the ability to be expanded by updating files that contain the concepts of the unit cells of active filters and nominal values of capacitors.

Обеспечение электромагнитной совместимости электронных средств представляет собой сложную техническую задачу, для решения которой не существует универсальных приемов. Более того, ввиду комплексного характера проблемы в целом эту задачу можно эффективно решить только одновременным применением системотехнических, схемотехнических, конструкторских и технологических приемов, направленных на совершенствование характеристик радиоэлектронных и электротехнических средств.

При обеспечении электромагнитной совместимости важную роль играет фильтрация. В источниках помех фильтрация осуществляется с целью предотвращения распространения нежелательных электромагнитных колебаний за пределы устройства — источника помех в любых внешних соединениях. Особенностью фильтрации являются широкий частотный диапазон возможных помех и связанные с этим трудности реализации фильтров. Успехи технологии микроминиатюризации радиоэлектронных устройств обусловили смещение интересов разработчиков аппаратуры от обычных пассивных фильтров к активным, реализуемым, как правило, на базе операционных усилителей, что обеспечивает большую точность и помехоустойчивость аппаратуры и позволяет достигнуть существенного выигрыша в ее объемно-массовых характеристиках.

Как известно, электрический фильтр проектируется для выделения и пропускания требуемого сигнала из смеси полезных и нежелательных сигналов. Фактически электрические фильтры распро-

странены в современной технике настолько, что невозможно представить любой электронный прибор средней сложности, в котором бы не использовался фильтр в том или ином виде.

Проектирование и разработка фильтра в значительной мере зависят от того, какие его характеристики необходимо получить, в особенности частотные. Реально достижимая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) обязательно должна быть гладкой, без разрывов и без строго горизонтальных участков, в том числе и нулевых.

Решение задачи синтеза фильтра было разбито на два этапа [1]:

- нахождение передаточной функции $W(s)$ реализуемого фильтра, обеспечивающего заданные требования к АЧХ;
- разработка структуры и самой принципиальной схемы фильтра.

Второй этап значительно сложнее, и, кроме того, он неоднозначен. Одной и той же передаточной функции соответствует множество структур фильтров, основанных на тех или иных схемотехнических идеях и использующих разные элементные базы [2].

Несмотря на большой объем существующих программных продуктов, направленных на облегчение деятельности разработчика электронных устройств, разработка электрических фильтров до настоящего времени не автоматизирована, требует значительных временных затрат и ведется, как правило, методом анализа, при котором разработчик принимает за основу некоторую базовую схему, анализирует ее характеристики и, внося последовательно определенные корректировки, добивается, в конечном итоге, требуемого результата.

В связи с этим задача разработки системы синтеза электрических фильтров, обеспечивающей получение необходимой электронной схемы по ее математической модели, продолжает оставаться актуальной и требует своего решения. Именно она и является предметом исследования данной статьи, в результате которого должна быть разработана автоматическая система синтеза активных электрических фильтров на основании их математических моделей, предоставленных линейными передаточными функциями, удобными для алгоритмической реализации. Каждый фильтр должен быть реализован на операционных усилителях, резисторах и конденсаторах. Все элементы фильтров должны быть линейными, сосредоточенными и инвариантными во времени. Для достижения указанной цели были разработаны:

- модуль синтеза принципиальной схемы фильтра;
- модуль расчета параметров элементов фильтра;
- руководство пользователя системой.

Математическая модель фильтра представлена в виде двух систем уравнений. Первая система является собственно математической моделью проектируемого фильтра в виде линейных дифференциальных уравнений. Её решение позволяет определить действующие в схеме фазовые переменные. Вторая система уравнений определяет зависимость выходных параметров фильтра от фазовых переменных [3].

Базовые элементы электрических типовых динамических звеньев приведены в таблице.

Передаточную функцию фильтра W_0 представляем в виде

$$W_0(s) = W_1(s) * W_2(s) * \dots * W_n(s), \quad (1)$$

где $W_i(s)$ — передаточная функция i -того типового динамического звена.

При синтезе фильтра используется не АЧХ фильтра, а логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ), единицей измерения в которой является децибел (дБ).

ЛАЧХ фильтра выражается через ЛАЧХ типовых динамических звеньев в виде

$$20 \lg |W_0(j\omega)| = 20 \lg |W_1(j\omega)| + 20 \lg |W_2(j\omega)| + \dots + 20 \lg |W_n(j\omega)|. \quad (2)$$

Calculatings			1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
C1	3.нФ	(556К)1/с	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
C2	1.нФ	(556К)1/с	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
C3	5.6мкФ	(234)1/с	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
C5	2.2мкФ	(234)1/с	100	110	120	130	150	160	180	200	220	240	270	300
			330	360	390	430	470	510	560	620	680	750	820	910

мкФ (1-10К)1/с
 нФ (10К-1М)1/с
 пФ Более (1М)1/с

Расчет

Вхождение тех или иных типовых динамических звеньев в состав математической модели фильтра определяется по углам наклона α (дБ/дек.) ЛАЧХ типовых динамических звеньев к оси частот, частотам среза $\omega_{ср}$ (точкам излома ЛАЧХ типовых динамических звеньев) и общему коэффициенту усиления фильтра K , являющимися входными параметрами математической модели.

Используя полулогарифмическую плоскость с частотной осью — осью абсцисс и амплитудной осью — осью ординат, разбиваемой на поддиапазоны в заданных частотах среза, и проводя на ней геометрическое сложение ЛАЧХ типовых динамических звеньев, получаем ЛАЧХ всего фильтра [4].

Расчет параметров элементов, образующих фильтр, осуществляется в соответствии с принципиальной схемой фильтра, синтезированного на базе принципиальных схем элементарных ячеек. После запуска приложения FilterSyntesis на экране монитора появится главное окно программы, представленное на рисунке 1.

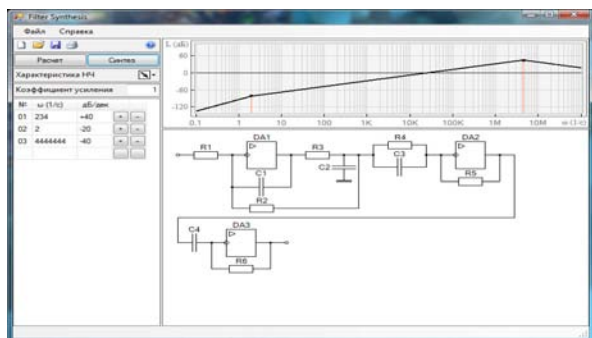


Рис. 1. Главное окно программы

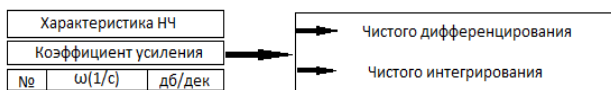


Рис. 2. Выпадающий список характеристик на нижних частотах

На начальном этапе проектирования пользователю предлагается ввести следующие исходные данные:

- наличие в передаточной функции фильтра звеньев чистого дифференцирования или чистого интегрирования (опция может быть выбрана из выпадающего списка, представленного на рис. 2);
- коэффициент усиления фильтра (рис. 3), причем вводимое значение должно лежать в диапазоне от 0.1 до 10;
- частоты среза и углы наклона логарифмических амплитудно-частотных характеристик типовых динамических звеньев, образующих передаточную функцию фильтра (рис. 4). При этом частота среза каждого последующего введенного звена должна быть больше частоты предыдущего (исключение составляют звенья чистого дифференцирования и чистого интегрирования, которые вводятся в первую очередь), а суммарный угол наклона не может быть больше нуля.

После того как все параметры введены, можно приступить непосредственно к синтезу фильтра. Для этого необходимо нажать кнопку «Синтез» (рис. 1).

Характеристика НЧ				
Коэффициент усиления				1
№	ω (1/с)	дБ/дек		
01	234	+40	+	-
02	1000	-20	+	-
03	555555	-40	+	-

Рис. 3. Ввод параметров передаточной функции синтезируемого фильтра

В случае некорректно введенных данных на экране монитора появится диалоговое окно «Ошибка» с описанием ошибки. Для простоты исправления неправильно введенные данные будут выделены красным цветом. Если исходные данные верны и фильтр реализуем, то инструментальная среда синтезирует фильтр и выводит полученные результаты на экран монитора в виде принципиальной электрической схемы фильтра и его логарифмической амплитудно-частотной характеристики (вид выводимой информации представлен на рис. 4, 5).

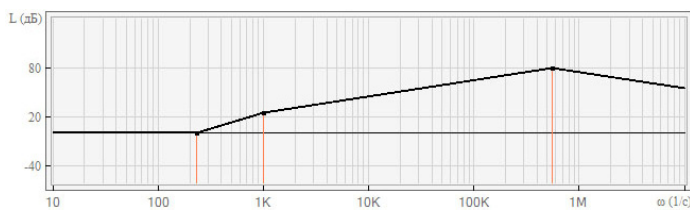


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика фильтра

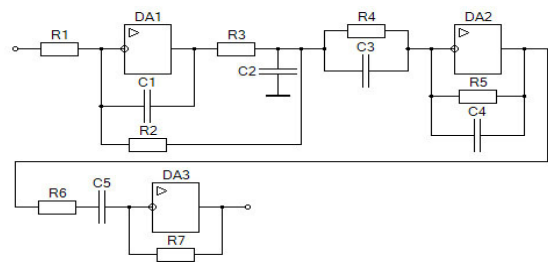


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема фильтра

После завершения синтеза фильтра пользователь имеет возможность произвести расчет параметров элементов, входящих в его состав. Для этого необходимо нажать кнопку «Расчет» (рис. 1). В этом случае на экране монитора появляется окно ввода номиналов конденсаторов, относительно которых осуществляется расчет параметров остальных элементов схемы. В таблице, расположенной в левой части окна, указаны порядковые номера конденсаторов синтезированной схемы, необходимые для ввода с частотами среза ячеек, в состав которых они входят. Номиналы конденсаторов можно ввести вручную непосредственно в таблицу либо двойным щелчком мыши выбрать из таблицы номиналов, представленной в правой части окна. При этом рекомендуемые номиналы конденсаторов для частот среза в диапазоне (1–10к)1/с составляют мкФ, для частот среза (10к–1М)1/с — нФ, а для частот среза >1М1/с — пФ.

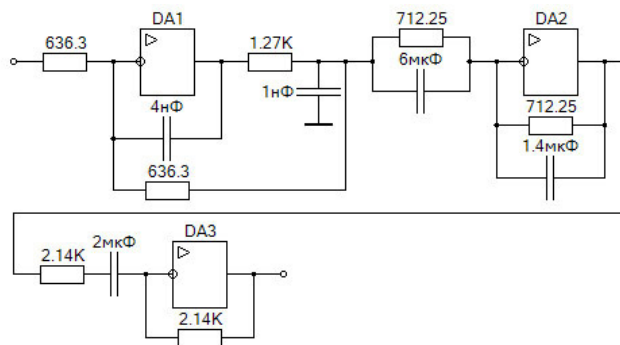


Рис. 6. Принципиальная схема фильтра с указанием параметров элементов

После нажатия кнопки «Расчет» инструментальная среда вычисляет параметры остальных элементов фильтра и выводит их на ранее полученную принципиальную схему (рис. 6).

В соответствии с поставленной задачей в процессе выполнения данной работы была разработана инструментальная среда, предназначенная для автоматизации процесса синтеза линейных активных электрических фильтров по заданным передаточным функциям, т.е. по их частотам среза, углам наклона логарифмических амплитудно-частотных характеристик и коэффициентам усиления.

Разработанная инструментальная среда позволяет в автоматическом режиме:

- строить амплитудно-частотные характеристики проектируемых фильтров;
- получать схемные решения фильтров;
- осуществлять расчет параметров элементов фильтра.

В результате проведенного литературного обзора прямых аналогов разрабатываемой инструментальной среды выявлено не было. Работа большинства из наиболее близких к разрабатываемой инструментальных сред — Electronic Workbench, MATLAB, DesignLab 8,0, Super-Compact, APLAC 7.0, Micro-Cap — основана на анализе хранящихся в библиотеках готовых схемных решений и по решаемым задачам не обеспечивает достижения целей, поставленных в начале данной статьи.

Представленный в работе алгоритм позволяет синтезировать RC-фильтры, но при дальнейшем расширении базы элементарных ячеек появится возможность реализовывать схемные решения фильтров любой структуры, как активных, так и пассивных.

В качестве языка программирования использован язык C#, характеризующийся широкими функциональными возможностями и доступностью.

Реализация решений не требует использования специального дорогостоящего оборудования, а достигается на персональном компьютере стандартной конфигурации с использованием операционной системы Microsoft Windows XP SP2 и базового программного обеспечения Visual Studio 2008 Professional Edition, позволяющего быстро создавать подключенные приложения и обеспечивающего широкие возможности для работы пользователя.

Разработанная инструментальная среда проста в использовании и не требует от пользователя глубоких специальных знаний в области схемотехники электронных устройств.

References

1. *Volovich G.I.* Circuit design of analog and mixed-signal devices. — М.: Publishing house «Dodeka-XXI», 2005.
2. *Lamb G.* Analog and digital filters. — М.: Publishing house «Mir», 1983.
3. *Ivashchenko N.N.* Automatic regulation. Theory and elements of systems. — М.: Engineering, 1973.
4. *Tronin Yu.V., Gursky O.V.* Synthesis filters. — М.: Moscow Aviation Institute Publ., 1990.

АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАЛАРЫ ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 533.601

Экспериментальное исследование аэродинамики системы из двух вращающихся цилиндров

Experimental study of aerodynamics of the system of two rotating cylinders

Дюсембаева А.Н.¹, Кусаиынова А.², Тургунов М.М.¹, Тансыкбаева Н.К.¹

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: nazgulya_tans@mail.ru);

²Школа для одаренных детей «Дарын» (E-mail: asia0804@mail.ru)

Мақалада айналмалы қозғалыстағы цилиндрдің ауа ағыны көлденең бағытта аққан кездегі аэродинамикалық сипаттамаларын зерттеу нәтижелері келтірілген. Олар тәуелділік графиктер түрінде: маңдайлық кедергі және көтеру күші коэффициентінің ағын бағытының және айналмалы цилиндрлердің беттері арасындағы арақашықтықтан тәуелділігі. Тәжірибелік мағлұматтардан коэффициенттердің тиімді мәні анықталды. Цилиндрлер арасындағы қашықтықтан тәуелді алынған коэффициенттер максималды тарту күшімен қамтамасыздандыратын желқозғалтқыш қалақшаларының тиімді санын анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері Магнус эффектісі негізіндегі желқозғалтқыштардың жаңа түрін жасауда қолданылуы мүмкін.

This article presents the results of experimental investigations of aerodynamic characteristics of two rotating cylinders in crossflow air flow. Results are presented in the form of graphic dependences of the coefficients of drag and lift of the flow direction and the distance between the surfaces of rotating cylinders. From experimental data the optimal values of the coefficients are determined. Identified coefficients depending on the distance between the cylinders take the possibility to determine the optimal number of wind turbine for maximum traction. The results can be used for development of a new generation wind turbine based on Magnus effect.

С целью экономии топливно-энергетических ресурсов, снижения негативного влияния на окружающую среду, а также обеспечения электроэнергией регионов требуется развитие возобновляемых источников энергии. Республика Казахстан обладает огромным их потенциалом. Так, например, на большей части территории Республики Казахстан среднегодовая скорость ветра составляет 4 м/с, в связи с чем актуальной задачей является разработка ветродвигателя. Особый интерес представляет ветродвигатель на основе вращающихся цилиндров переменного сечения, который может эффективно работать даже при низких значениях скорости ветра. Для повышения эффективности работы такого ветродвигателя необходимо изучение аэродинамических характеристик его элементов — системы вращающихся цилиндров переменного сечения. Следовательно, данная задача является актуальной как в научном плане, так и с точки зрения практического использования.

Аэродинамические характеристики при поперечном обтекании неподвижных одиночных цилиндров в бесконечном потоке достаточно хорошо исследованы в работах С.И. Исатаева, А.А. Жукаускаса [1, 2]. Влияние загромождения потока на закономерности обтекания бесконечного цилиндра на аэродинамическое и гидравлическое сопротивления исследованы и систематизированы в работе Ж.С. Акылбаева [3]. Аэродинамика коротких цилиндров, достаточно широко встречающихся в элементах энергетических агрегатов и установок, изучена экспериментальными и теоретическими методами в работе С.И. Исатаева, О.Н. Жангунова [4].

Однако работ, посвященных исследованию аэродинамики сложного характера обтекания одиночного и системы вращающихся цилиндров — элементов разрабатываемого нами ветродвигателя, сопровождающихся турбулентным потоком группы взаимодействующих вихрей, в настоящее время крайне мало. Известные работы Н.М. Бычкова [5, 6] относятся к определению аэродинамических параметров вращающихся одиночных цилиндров в потоке воздуха.

На основании проведенного анализа имеющихся исследований была поставлена задача — экспериментальное исследование усложненной модели — аэродинамики системы из двух вращающихся цилиндров, являющихся взаимовлияющими элементами ветродвигателя с использованием эффекта Магнуса.

Использование эффекта Магнуса при вращении цилиндра в потоке известно с давних времен [7], однако возможность практического использования в качестве движущей силы ветродвигателей нового поколения для малых скоростей потока систематизированно изучается только в последние годы.

Авторами статьи в Лаборатории аэродинамических измерений кафедры инженерной теплофизики им. проф. Ж.С. Акылбаева собран опытный макет из двух вращающихся цилиндров, который в последующем исследовался в поперечном потоке воздуха различной скорости (см. рис. 1). Макет закреплялся в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М с помощью тонких металлических растяжек к раме трехкомпонентных аэродинамических весов. Трехкомпонентные аэродинамические весы с достаточно высокой степенью точности позволяют измерять подъемную силу (4, 5) и силу лобового сопротивления (3).

Схема расположения основных элементов установки в рабочей части аэродинамической трубы показана на рисунке 1.

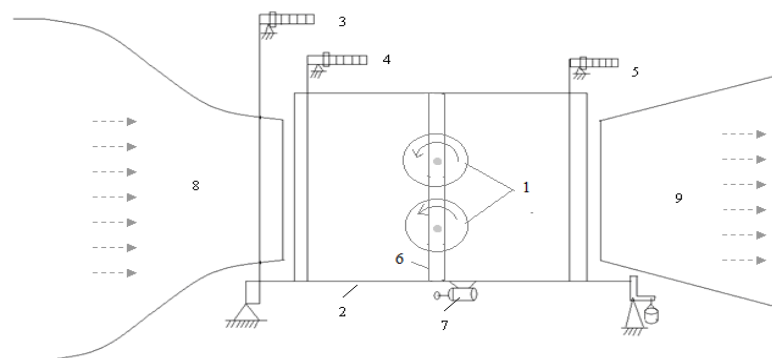


Рис. 1. Схема экспериментальной установки двух вращающихся цилиндров для исследования аэродинамических характеристик: 1 — исследуемые цилиндры; 2 — рама для крепления макета с аэродинамическими весами; 3 — весы, измеряющие силу лобового сопротивления; 4,5 — весы, измеряющие подъемную силу; 6 — стойка для крепления цилиндров; 7 — двигатель для вращения цилиндров; 8,9 — диффузор и конфузор аэродинамической трубы

Силу лобового сопротивления и подъемную силу измеряли динамическими весами, установленными в рабочей части аэродинамической трубы.

Поток воздуха, набегающий на лобовую часть цилиндров, прикладывает силу, которая отражается на весах (рис. 1).

Экспериментальный макет обтекался поперечным воздушным потоком, создаваемым в рабочей части аэродинамической трубы. Цилиндры приводились во вращение с помощью электродвигателя (7).

Испытания проходили с двумя вращающимися цилиндрами диаметром 100 мм. При этом скорость набегающего потока и частота вращения цилиндров оставались неизменными.

Лабораторные исследования проводились при разных расстояниях между цилиндрами.

Согласно [8] формула для определения коэффициента лобового сопротивления

$$C_x = \frac{F_{л.с.}}{\rho \frac{u^2}{2} S}, \quad (1)$$

где $F_{л.с.}$ — сила лобового сопротивления; u — скорость потока воздуха; ρ — плотность воздуха; S — площадь лобовой части исследуемого тела.

Формула для определения коэффициента подъемной силы [8]

$$C_y = \frac{F_{n.c.}}{\rho \frac{u^2}{2} S} \quad (2)$$

где $F_{n.c.}$ — подъемная сила.

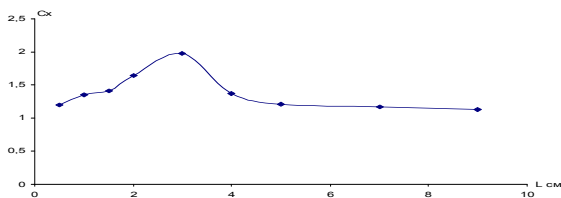
При исследовании аэродинамических характеристик двух вращающихся цилиндров были рассмотрены два случая вращения цилиндров:

- 1) оба цилиндра вращаются в одну сторону, против потока воздуха;
- 2) цилиндры вращаются противоположно друг другу.

Эти зависимости приведены на рисунках 2 (a, b), 3 (a, b).

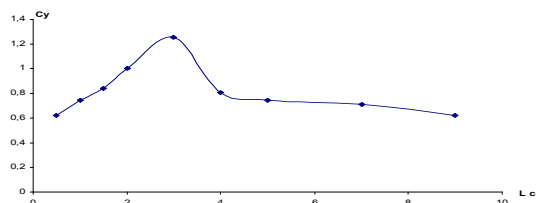
В первом варианте цилиндры вращались в одном направлении против потока воздуха. Во время эксперимента были получены экспериментальные данные и построены графики зависимости коэффициентов аэродинамических характеристик от расстояния между цилиндрами L .

На графиках, которые показаны на рисунке 2 (a, b), приведены результаты измерения коэффициента лобового сопротивления и коэффициента при вращении против потока подъемной силы.



a

Рис. 2 a. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от расстояния между цилиндрами при вращении против потока воздуха



b

Рис. 2 b. Зависимость коэффициента подъемной силы от расстояния между цилиндрами при вращении против потока воздуха

Из рисунка 2 видно, что коэффициент подъемной силы и коэффициент лобового сопротивления вращающихся цилиндров повышаются до определенного расстояния между цилиндрами (в нашем случае $L=3$ см), после чего коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления уменьшаются. Причина заключается в следующем: если расстояние между цилиндрами минимально, то возникающие спутные потоки в области протекания потоков между цилиндрами создают пониженное давление, что приводит к уменьшению кинетической энергии потока.

Если расстояние между цилиндрами увеличить, то влияние спутных потоков будет значительно уменьшаться, соответственно, кинетическая энергия потока повышается до расстояния, на котором пограничный слой первого вращающегося цилиндра достигает поверхности второго цилиндра. После срыва пограничных слоев вращающиеся цилиндры не будут влиять друг на друга, что приводит к уменьшению коэффициента подъемной силы и коэффициента лобового сопротивления.

В следующем варианте цилиндры вращаются противоположно друг другу, т.е. нижний цилиндр вращается против набегающего потока, а верхний — по потоку.

В этом случае возникающие в следе за вращающимися цилиндрами вихри будут приближаться друг к другу, затем сливаться, как бы создавая область, похожую на хорошо обтекаемое тело.

Полученные данные второго варианта исследования приведены в виде графической зависимости на рисунке 3 (a, b).

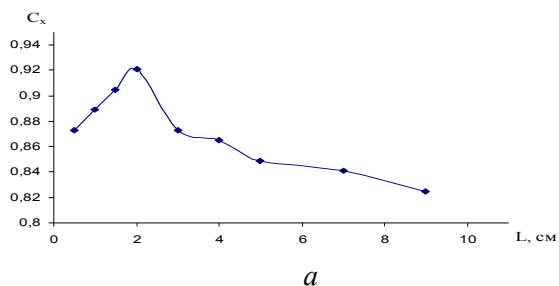


Рис. 3 а. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от расстояния между цилиндрами, вращающимися в противоположном направлении

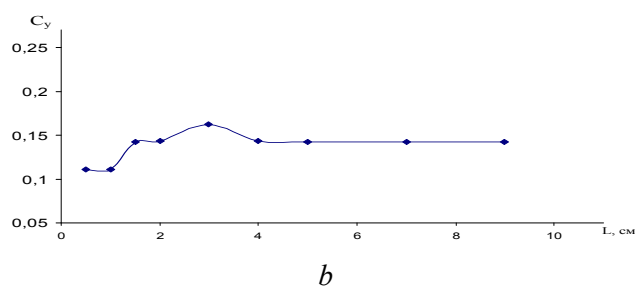


Рис. 3 б. Зависимость коэффициента подъемной силы от расстояния между цилиндрами, вращающимися в противоположном направлении

Если сравнить результаты исследования двух приведенных серий экспериментов, то увидим, что были получены схожие графики, отличающиеся численными значениями. Полученные численные значения измеряемых аэродинамических характеристик для цилиндров, которые вращаются противоположно друг другу, против набегающего потока, меньше, чем когда цилиндры вращались в одном направлении, против потока воздуха. Эту разницу можно объяснить тем, что когда два цилиндра вращаются противоположно друг другу, то возникающие на поверхности спутные потоки, протекая между цилиндрами к встречному набегающему потоку, будут взаимодействовать и увеличивать кинетическую энергию. Взаимодействующие спутные потоки будут сопротивляться основному набегающему потоку, что приведет к уменьшению давления набегающего потока, действующего на поверхности цилиндров. В связи с этим аэродинамические коэффициенты исследуемых вращающихся цилиндров будут увеличиваться до расстояния срыва пограничных слоев исследуемого макета. После полного срыва пограничного слоя цилиндров спутные потоки не будут взаимодействовать между собой, что объясняет уменьшение аэродинамических коэффициентов с увеличением расстояния между цилиндрами.

Таким образом, на основе полученных результатов можно будет использовать данную методику для определения оптимального расстояния L между поперечно обтекаемыми цилиндрами, при котором эффект Магнуса способствует максимальному увеличению подъемной силы, что, в свою очередь, позволяет увеличить коэффициент полезного действия ветродвигателя.

References

1. Isatayev S.I., Akylbaev J.S., Turmuhambetov A.J. Aerohydrodynamics and heat transfer of curved bodies. — Almaty: Gylym, 1996. — 437 p.
2. Jukauskas A.A. The convective transport of heat exchangers. — M.: Science, 1982. — 191 p.
3. Akylbaev J.S. Aerodynamics and heat transfer in the flow of bodies of finite sizes. — Almaty, 1984. — P. 87.
4. Isatayev S.I., Jangunov O.N. Effect of the face and the relative lengths of short cylinders on exchange rate // Diffusion and convective transport of gases and liquids. — Almaty, 1986. — P. 62–68.
5. Bychkov N.M. Magnus wind turbine // Thermophysics and Aeromechanics. — 2005. — Vol. 12. — № 1. — P. 59–175.
6. Bychkov N.M. Features a rotating cylinder // Thermophysics and Aeromechanics. — 2005. — Vol. 12. — № 1. — P. 59–175.
7. Fateev E.M. Wind turbines and wind turbine. — London, 1948 — 203 p.
8. Krassnov N.F. Fundamentals of aerodynamics calculations: Aerodynamics of bodies of rotation, the bearing and turn control. Aerodynamics of aircraft. — M., 1981. — 496 p.

УДК 622.673.1

**Оптимальный алгоритм построения структурной схемы
приоритетного развития горного машиностроения**

**Optimal algorithm for designing of structural scheme of priority
development of the mining machinery**

Акашев З.Т., Мехтиев А.Д.

Карагандинский государственный технический университет (E-mail: barton.kz@mail.ru)

Тау машина жасауды қазіргі дамытудың негізгі шарттары, бәсекеге қабілеттілік және осы саладағы жұмыс тиімділігінің көкейкесті мәселелері қарастырылған. Өндірістік процестердің технологиясын әбден жетілдіруі және саланың тау-кен жабдығының техникалық деңгейінің жоғарлатуы бойынша ұсыныстар жасалды. Мақалада, энергия сақталуы заңы негізінде, балама ретінде тау-кен машина жасау саласында жұмыстар ақысы келтірілген. Сонымен бірге тау-кен машина жасаудың басымды дамуына негізделген құрылымдық сұлбаның оңтайлы алгоритмін блоктық жүйелер бойынша жұмысты кезеңдерге бөлуде уақытты тиімді үлестіру қарастырылған.

The basic conditions for development of modern mining machinery and actual questions of competitiveness and efficiency of the industry are reviewed. The recommendations for improving the production processes technology and raising the technical level of the mining industry equipment are given. In the article, based on the law of energy conservation, the cost of mining machinery works is used as an alternative. The reasons of the optimal algorithm using necessity for the mining machinery priority development structure scheme constructing are proved. The optimization of the successive stages time distribution is considered, the realization of the work is correlated with the blocks: "Mining Equipment", "Mechanical Engineering", "Scientific Basis", "Production and technical base."

Введение

В современных условиях развития горного машиностроения весьма актуальны вопросы конкурентоспособности и эффективности работы отрасли: совершенствование технологии производственных процессов и повышение технического уровня оборудования горной отрасли, соответствие общемировым приоритетам научно-технического и социально-экономического развития. Экономический эффект может быть усилен благодаря подготовке и внедрению принципиально новых научных разработок и методов, которые позволят существенно повысить надежность механического оборудования горнодобывающих предприятий.

Диалектичность развития современной технологии выражается в том, что сегодня главная задача состоит не в поддержании технологий на достигнутом высоком уровне, а в необходимости постоянно и оперативно ее изменять. При этом наиболее существенные изменения происходят не на пути модернизации, а за счет принципиального преобразования их в наукоемкие технологии [1].

Как известно, независимо от способа разработки полезных ископаемых, при взрывном разрушении массива технология производства горных работ состоит из следующих этапов: разбуривание горного массива; взрывание горного массива; выделение и дробление негабарита взрывным или механическим способом; погрузка кондиционной части рядовой горной массы в транспортные средства;

доставка горной массы до места назначения и перегрузка ее в приемный бункер обогатительной фабрики или укладка в штабель (отвал).

На основании исходных требований, предъявляемых к объекту исследования, исходя из потребностей производства, формируется конечная цель и намечаются рациональные этапы реализации, т.е. разрабатывается программа научных исследований [1]. Последняя должна предусматривать оптимизацию структуры исследуемых процессов и режимов функционирования оборудования, реализующего эту технологию, что обеспечит наилучшие технико-экономические показатели объекта управления. Поэтому цель управления (минимум времени, минимум энергии и т.д.) можно рассматривать как минимизацию некоторого критерия оптимальности (время, энергия и т.д.).

Решение системы дифференциальных уравнений на экстремум является одним из способов математической оптимизации по критерию быстродействия системы определяет функциональный критерий объекта управления, который играет существенную роль в дальнейших исследованиях. Во-первых, он определяет основной (функциональный) признак классификации объекта управления, во-вторых, функциональный критерий используется для оценки качества научно-технической продукции по комплексному показателю (техническому уровню).

Для этого исходя из нужд производства разрабатываются исходные требования к объекту управления, благодаря которым резко сокращается количество структурных схем, пригодных к реализации [2].

В качестве единичных показателей принимаются показатели, каким-либо способом влияющие на функциональный критерий. В количественном отношении единичных показателей не должно быть более пяти (по количеству эффективных коэффициентов весомости [3], доля которых выше 1 %).

Важное значение имеет правильное ранжирование единичных показателей, т.е. присвоение им коэффициентов весомости. Ранжирование единичных показателей, как правило, производится согласно ГОСТу 2.116–84 и ГОСТу 4.21–85 — «Качество продукции» и «Номенклатура показателей», по которым находятся показатели назначения, надежности, эффективности, экологической и технической безопасности, технологичности.

Оптимальный алгоритм построения структурной схемы приоритетного развития горного машиностроения

Проблема развития машиностроения в регионе может иметь двойное значение: служить основным производством или же исполнять роль вспомогательного производства. Но при этом построение структуры машиностроения должно соответствовать тем требованиям и задачам, которые были поставлены перед отраслью. Следовательно, строительство объектов, например, горного машиностроения, следует оптимизировать как по структуре, объему производства, режиму работы, так и по стоимости работы.

Угольная промышленность, как наиболее механизированная и автоматизированная отрасль индустрии, составила базовую часть национальной межотраслевой программы «Научно-техническая проблема машиностроения и создание новых высокоэффективных машин и аппаратов», реализуемой по линии Министерства науки и новых технологий Республики Казахстан. Поэтому развитие угольного машиностроения рассматривается как основа развития общего горного машиностроения всех смежных отраслей горнодобывающей промышленности.

В связи с этим независимое (локальное) решение указанной межотраслевой проблемы невозможно без учета потребностей всех смежных отраслей горной промышленности по следующим причинам:

- проблема развития угольного машиностроения, как вспомогательного производства отрасли, не должна рассматриваться без учета перспективы развития и установления потребностей основного производства в горном оборудовании (ГО);
- перспективы развития угольного машиностроения должны быть ориентированы на общую потребность в горной технике всех смежных отраслей горной промышленности, использующих однотипное ГО;
- основные направления развития угольного машиностроения должны определяться с учетом мощностей заводов смежных отраслей горной промышленности, в том числе и конверсионных заводов военно-промышленного комплекса, объединенных общностью законов экономического стимулирования при рыночных отношениях в общеструктурную единицу по горному машиностроению;

- разрабатываемая концепция развития угольного машиностроения должна составить генеральное направление (линию) приоритетного развития заводов горного машиностроения, с некоторой доверительной областью отклонений вокруг него, учитывающей специфику развития смежных отраслей горной промышленности;
- любые локальные решения, принимаемые по развитию конкретных заводов горного машиностроения, не должны выходить за пределы доверительной области отклонений и тем самым максимально содействовать реализации общей программы приоритетного развития горного машиностроения в регионе.

Приведенные исходные требования, предъявляемые к развитию собственной базы угольного машиностроения, обуславливают необходимость уточнения формулировки разрабатываемой проблемы (объекта исследования) с целью охвата всех подлежащих при этом решению задач. Тогда, согласно исходным требованиям, объектом исследования (ОИ) будет производственно-техническая база (ПТБ) угольной промышленности, а целью — разработка программы приоритетного развития ПТБ горного машиностроения на период планирования.

Очевидно, разработка последней будет значительно упрощена и может быть легче реализована при анализе ОИ по модульному составу, на основе критерия независимости, т.е. с переходом на блочный принцип исследования. Такой анализ показывает, что программа развития ПТБ горного машиностроения, как информационно-зависимая система, состоит из четырех обособленных блоков (модулей): «Горное оборудование», «Машиностроение», «Научная база» и «Развитие ПТБ» с входными и выходными параметрами. При этом каждый блок является самостоятельной единицей и имеет свой алгоритм, а выходные данные каждого предыдущего блока — входные параметры для последующего.

В то же время программа и общий алгоритм развития ОИ определяются его функциональным признаком (назначением), т.е. выполняемой им работой, поэтому структурно-математическую модель функционирования информационно-зависимой системы следует формализовать из предпосылки, что общая (удельная) работа, выполняемая ПТБ отрасли, или предприятием, или машиной и системой машин, или станками и инструментами и другими приспособлениями, по стоимости адекватна общим (удельным) приведенным затратам на производство этой работы. При этом в установившемся непрерывном режиме работы ОИ она определяется при непрерывном учете фактора времени [4] как:

$$A_{уд} = \int_0^L \frac{F}{Q} dL = \int_0^T \frac{Fv}{Q} d\tau = \int_0^T \frac{1}{Q} \cdot (E_H K + U) \cdot (1 + E_{НП})^{-\tau} d\tau, \quad (1)$$

где T — принятый период оценки, лет; L — перемещение, м; τ — интервал дискретности, ед. времени ($\tau = 1, 2, \dots, T$); F и v — сила тяги (Н) и скорость движения (м/с) ОИ в установившемся режиме работы (состояние статического равновесия); E_H , $E_{НП}$ — нормативные коэффициенты: эффективности использования капитальных вложений и для приведения разновременности затрат; K , U — текущие капитальные и эксплуатационные затраты.

При этом разрабатываемая таким образом программа должна быть рациональной, содержать минимум необходимых работ и в то же время не упустить важные по значимости работы.

Очевидно, такая задача является задачей вариационного исчисления, поэтому математическую модель ОИ необходимо привести к виду, удобному для использования метода математической оптимизации. Поскольку $F \cdot v = N$ — мгновенная производственная мощность, потребляемая ОИ при выполнении заданного объема работы Дж/с, то из условия (1) следует:

$$N = (E_H K + U) \cdot (1 + E_{НП})^{-\tau}. \quad (2)$$

Для установления вида экстремали, получаемой при оптимизации, возьмем первую и вторую производные из условия (2) по интервалу дискретности, как из произведения двух сопряженных величин, тогда

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{d\tau} &= -B(1 + E_{НП})^{-\tau}; \\ \frac{d^2 N}{d\tau^2} &= -B_1(1 + E_{НП})^{-\tau} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $B = (E_H K + U) \cdot \ln(1 + E_{НП}) = \text{const}$; $B_1 = B \cdot \ln(1 + E_{НП}) = \text{const}$.

Следовательно, критерием оптимальности (параметром, характеризующим состояние ОИ) будет минимум мгновенной производственной мощности, потребляемой ОИ при выполнении заданного объема работы в установившемся режиме движения (состоянии статического равновесия):

$$N = x_1; B_1(1 + E_{\text{НП}})^{-\tau} = x_2; \dot{x}_2 = u\varepsilon = u = u(\tau).$$

Уравнение (3) запишем как систему дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dx_1}{d\tau} = x_2; \frac{dx_2}{d\tau} = B_1(1 + E_{\text{НП}})^{-\tau} = u, \quad (4)$$

где u — управляющее воздействие.

Систему уравнений (4) решим на оптимум, используя «принцип максимума» Л.С.Понтрягина, тогда промежуточной функцией системы (4) будет

$$H = \Psi_1 x_2 + \Psi_2 U_0, \quad (5)$$

где Ψ_1 и Ψ_2 — вспомогательные переменные.

Из условий «принципа максимума»

$$\dot{\Psi}_i = -\frac{\partial H}{\partial x_i}; \frac{\partial H(\Psi, x, u)}{\partial u} = 0, \quad (6)$$

$$u = u(\tau).$$

Из (5) имеем: $\Psi_1 = 0$; $\Psi_2 = -\Psi_1$. Откуда $\Psi_1 = C_1$; $\Psi_2 = C_2 - C_1 \tau$.

При $\tau=0$, $\Psi_2^{\max} = C_2$, но $\Psi_2 = -C_1$, следовательно, из уравнения (6)

$$u_0 = \text{sign } \Psi_2 = \pm 1, \quad (7)$$

где C_2 и C_1 — постоянные интегрирования.

Это означает, что в качестве управляющего воздействия могут применяться только конечные значения общих приведенных затрат за конкретные периоды дискретности по одновременности их вложения, что является необходимым и достаточным основанием для классификации затрат по данному признаку и установления периодов дискретности их вложения.

Программа и структура приоритетного развития производственно-технической базы горного машиностроения

Классификация приведенных затрат по данному признаку и ее анализ позволяют сделать следующие выводы:

- критерий оптимальности — минимум мгновенной производственной мощности, потребляемой ОИ в установившемся режиме движения при выполнении заданного объема работы;
- управляющее воздействие — конечные значения приведенных затрат за периоды дискретности по одновременности их вложения;
- общий признак классификации приведенных затрат на любые виды работ — распределение по принципу одновременности их вложения;
- периоды дискретности приведенных затрат по одновременности их вложения — это уровни затрат на текущее производство, воспроизводство и перепроизводство (развитие производства).

Наличие в каждом блоке «Программы» трех уровней приведенных затрат по одновременности их вложения, согласно алгоритму математической оптимизации «золотая пропорция» [2], обуславливает достаточность наличия 5 этапов работ на каждом уровне, что обеспечивает минимально необходимый объем работы, а следовательно, рациональность всей «Программы приоритетного развития ПТБ горного машиностроения на период планирования».

Аналогично наличие в «Программе» трех производственных блоков: «Горное оборудование» (ГО), «Машиностроение» (М), «Развитие ПТБ» (Р) и трех возможных способов их реализации — изготовление совместно с иными фирмами (-), изготовление его по кооперации (+) или изготовление на собственной базе (.) — позволяют осуществить классификацию ПТБ отрасли по принципу структурного построения (табл.), пользуясь троичной системой классификации [1] проф. Г.И.Солода, которая устанавливает неповторяющиеся, рациональные (основные и комбинированные) пути развития ПТБ. Очевидно, выбор классификации того или иного пути развития для конкретного завода должен обосновываться технико-экономическим анализом, сущность которого заключается в установлении необ-

ходимого дополнительного количества материалов, оборудования и производственных площадей, требующихся для реализации программы выпуска изделий и сравнительной оценки их себестоимости и сроков окупаемости при альтернативных вариантах организации производства.

И наконец, реализация «Программы приоритетного развития ПТБ горного машиностроения на период планирования» требует детальнейшей разработки методологии прогнозирования развития ПТБ на основе ее полного математического обеспечения, разработки программы и алгоритмов расчета искомых параметров на ПЭВМ, системного анализа и привлечения других методов научных исследований. В связи с этим требуются высококвалифицированные специалисты различных отраслей науки и производства.

Анализ структурной схемы развития ПТБ отрасли (см.табл.) показывает, что если отрасль создается впервые, то она первоначально базируется только на импортной поставке (группа II), а затем дальнейшее ее развитие необходимо основывать на кооперации (группа III) и частично на импортной поставке (группа IV). В это же время закладывается основа собственной базы машиностроения (группа V), способная первоначально освоить выпуск ряда наиболее многочисленных и несложных изделий, а в последующем, с расширением ее мощности и повышением технического уровня, освоить выпуск технически более сложных новых изделий. При этом недостающая часть потребностей отрасли в ГО покрывается импортными поставками (группа VI) или же поставками по кооперации (группа VII). Очевидно, что конечной целью создания собственной базы машиностроения является полное удовлетворение потребностей отрасли в ГО и собственных нужд машиностроения.

Современное состояние горного машиностроения республики по степени освоения выпуска различных изделий характеризуется группами V–VII, поэтому большое значение имеет правильный, обоснованный выбор направления (способа) их реализации.

Необходимо знать четкие граничные условия перехода от одного способа выпуска изделий к другому, которые определяются следующим образом. Все способы выпуска изделий располагают в ряд, в порядке убывания степени их значимости: изготовление на собственной базе; изготовление по кооперации; организация совместного предприятия и закупка по импорту. Им соответственно присваиваются коэффициенты значимости по известной методике сравнительной оценки объектов управления [1]. При этом если каждое изделие рассматривать в отдельности, то значения его функционального критерия и единичных показателей (способов реализации выпуска изделий) будут приняты за базовые и в относительных единицах измерения будут равны единице.

Поэтому общее значение приведенных затрат по каждому единичному показателю, определяемое как произведение трех величин, из которых две равны единице, а третья — коэффициенту весомости, будет равно последнему. Это дает основание для следующих выводов:

- если 62 % и более элементов данного изделия выпускается на собственной базе, то его выпуск предпочтительно организовывать на собственной базе машиностроения;
- если доля собственной базы в выпуске изделия составляет от 23,5 до 62 %, то предпочтительно организовать выпуск по кооперации;
- если доля собственной базы в выпуске изделия составляет от 9 до 23,5 %, то предпочтительно организовать совместное предприятие с инофирмами;
- если доля собственной базы в выпуске изделия менее 9 %, то предпочтительна поставка по импорту.

Очевидно, что для установления доли собственной базы машиностроения в выпуске каждого изделия в отдельности необходимы не только четкое представление о состоянии и номенклатуре выпускаемой продукции на заводах-изготовителях горного оборудования, но и сведения о режимах работы, направлениях приоритетного развития отрасли в целом на ближайшую и более отдаленную перспективу.

Структурное построение объектов машиностроения

Принципы построения структурных формул	Согласование			Сочленение			Совмещение																				
	с вырождением двух элементов	с вырождением одного элемента	базовая формула	с вырождением элементов	с согласованием элементов	всех элементов	с вырождением элементов	с согласованием элементов	с сочленением элементов	всех элементов																	
Структурные формулы	Г	М	Р	Г-М	Г-Р	М-Р	Г-М-Р	Г+М	Г+Р	М+Р	Г+М-Р	Г+Р-М	М+Р-Г	Г+М+Р	Г.М	Г.Р	М.Р	Г.М-Р	Г.Р-М	М.Р-Г	Г.М+Р	Г.Р+М	М.Р+Г	Г.М.Р			
№ формулы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
Этапы перспективного развития ПТБ отраслей промышленности	Модули ПТБ отраслей промышленности			Начальная стадия организации производства			Промежуточная стадия организации производства				Собственная производственно-техническая база отраслей промышленности																
Особенности развития ПТБ отраслей промышленности	Обособленные модули			Функционально неполно укомплектованные ПТБ			Укомплектованные ПТБ			Функционально неполно укомплектованные ПТБ			В комплекте с индивидуальными модулями			Укомплектованные ПТБ			Функционально неполно укомплектованные ПТБ			В комплекте с индивидуальными модулями			Укомплектованные ПТБ		

По режиму работы во времени деятельность отрасли подразделяется на два основных вида: на режим устойчивой, стабильной деятельности и переходной режим, который, в свою очередь, состоит из режима «текущего совершенствования» и режима «приоритетного развития» производственно-технической базы отрасли. Характерной чертой периода устойчивой (основной) деятельности отрасли является относительная стабильность заданных проектом условий эксплуатации, за исключением случаев выявления и целенаправленного использования внутренних резервов производства, не приводящих, однако, к моральному износу производственно-технической базы отрасли.

В связи с этим основная деятельность отрасли характеризуется функционированием только двух производственных блоков — «Горного оборудования» и «Машиностроения» на двух уровнях затрат по разновременности их вложения — «текущая эксплуатация» (производство) и «воспроизводство». И наоборот, переходной период деятельности отрасли характеризуется частичным или полным изменением условий эксплуатации по сравнению с проектными, и поэтому целью деятельности отрасли в этом режиме работы является совершенствование производства или же развитие производства до уровня мировых стандартов. В зависимости от поставленной перед отраслью конкретной цели переходной режим различается как режим «текущего совершенствования», или «приоритетного развития» ПТБ отрасли. При этом в режиме «текущего совершенствования ПТБ» производственные блоки основной деятельности функционируют уже на трех уровнях, хотя на третьем уровне затрат «развития производства» деятельность их ограничена частичным совершенствованием горного и заводского оборудования. Кроме того, подключается блок «Научная база» на первом и втором уровнях разновременности затрат, т.е. функции его ограничены использованием известных математических аппаратов или частичным их совершенствованием, которые являются сигналами управляющих воздействий.

В режиме «приоритетного развития ПТБ» к деятельности отрасли подключается блок «развитие ПТБ», в результате чего все четыре блока функционируют на всех трех уровнях одновременности затрат по полной программе работы. Очевидно, наличие в программе работ множества прямых и обратных межблочных и внутриблочных связей и связей управления значительно усложняет исследование объекта. При математическом моделировании ОИ все эти связи становятся неявными, и поэтому оценка степени влияния каждой из них на состояние ОИ невозможна. В связи с этим для эксплуатации ОИ в оптимальных на всех этапах деятельности режимах более предпочтителен метод структурного моделирования, который позволяет усиливать или снижать степень влияния тех или иных связей на состояние ОИ и, тем самым, каждый раз оптимизировать режимы деятельности ОИ соответственно происшедшим изменениям в первоначально заданных условиях эксплуатации.

Выводы

В горном машиностроении критерием оптимальности приведенных затрат на выполнение заданного объема работ является минимум мгновенной производственной мощности, потребляемой объектом исследования в структурах разновременных работ.

Программа приоритетного развития горного машиностроения является информационно-зависимой системой, состоящей из трех производственных блоков: «Горное оборудование», «Машиностроение», «Развитие базы машиностроения» и «Научная база», которая выполняет роль управляющего воздействия.

Программа приоритетного развития горного машиностроения на основании «Универсальной оптимальной закономерности дискретного распределения вероятностей появления значений случайной величины» распределяется по объему работ между организационными способами изготовления изделий следующим образом:

- если доля собственной базы машиностроения в изготовлении изделия более 62 %, то предпочтительно его полное освоение;
- если доля собственной базы машиностроения в изготовлении изделия в пределах 23,5...62 %, то предпочтительно изготовление его по кооперации;
- если доля собственной базы машиностроения 9...23,5 %, то предпочтительно создание совместных предприятий с инофирмами;
- если доля собственной базы машиностроения ниже 9 %, то предпочтительна закупка изделия по импорту.

Таким образом, программа приоритетного развития горного машиностроения является оптимальной как по содержанию и структуре, так и по способу ее реализации, поэтому может быть принята за основу при создании и совершенствовании собственной базы горного машиностроения.

Ключевые слова: оптимальный алгоритм, структурная схема, горное оборудование, структура производственного развития, производственно-техническая база, структура приоритетного развития, критерий оптимальности распределения.

References

1. Akashev Z.T. Methodology of improving and choosing the structure of mining companies' technology processes // M.: Heavy engineering. — 2005. — № 12. — P. 17–19.
2. Akashev Z.T., Daniyarov N.A., Malybayev N.S. Expertless method of quarry transport systems' evaluation according to the technical level // Heavy engineering. — 2003. — № 8. — P. 18–22.
3. Akashev Z.T., Malybayev N.S., Akashev A.Z. Searching and realization of science products in industry and transport. — Karaganda: Publ. KarSTU, 2006. — 197 p.
4. Ignatov S.N. Choosing of parameters and optimization of diamond instrument's work modes for rocks' destruction and hard materials' processing. — Almata: Kazgos. INTI, 1993. — 53 p.

Математическое моделирование комбинированной схемы проветривания сети выработок угольной шахты

Mathematical modeling of combined schemes of airing network workings of a coal mine

Васенин И.М.¹, Шрагер Э.Р.¹, Крайнов А.Ю.¹, Палеев Д.Ю.²,
Лукашов О.Ю.², Костеренко В.Н.³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия (E-mail: sher@ftf.tsu.ru);

²Институт угля СО РАН, Кемерово, Россия (E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru);

³Сибирская угольная энергетическая компания, Москва, Россия

Шахта куыстарын желдетудің математикалық моделі жасалған. Модельдеу газ динамикасына негізделген. Тендеу сандық әдіспен шешілген. Шахта куыстарында метанның тасымалдану заңдылығы, сондай-ақ желдетудің әр түрлі күйлері қарастырылған.

The mathematical model of non-stationary ventilation of mine is developed. The model is based on the equations of gas dynamics. The results of numerical solution of the problem of ventilation of mines are presents. The dynamics methane transfer in the workings of the mine is received. The modeling of different modes of ventilation was performed.

Угольные шахты относятся к предприятиям с повышенной опасностью труда. Это обусловлено в первую очередь выделением метана, адсорбированного в угле, при его добыче. Удаление взрывоопасного газа из зоны забоя и прилегающих выработок проводится путем организации достаточной вентиляции выработок. Вентиляция также необходима для обеспечения нормальных санитарно-гигиенических условий труда горняков. При организации проветривания используются различные схемы: прямоточная схема проветривания с подсвежением, возвратноточная схема проветривания, комбинированное проветривание выемочного участка. Наиболее эффективная — комбинированная схема проветривания [1]. Для ее осуществления организуется отсос метановоздушной смеси из выработанного пространства газоотсасывающими вентиляторами, установленными на поверхности. Отвод метановоздушной смеси производится либо по неподдерживаемым выработкам, через сбойки, соединяющие выработанное пространство со штреками, либо по скважинам, либо по трубопроводам.

Существенную роль в накоплении метана в выработках угольных шахт играют нестационарные процессы их вентиляции. Они возникают при изменении режима проветривания сети выработок, при установке вентиляционных шлюзов и других изоляционных сооружений, изменяющих потокораспределение воздуха в сети выработок. Во время нестационарных процессов вентиляции возможно возникновение слабо проветриваемых зон, в которых могут образовываться зоны слоевого и местного загазовывания метаном с высокой концентрацией.

Расчет проветривания шахт и рудников в настоящее время на всех шахтах России проводится на основе стационарного подхода в предположении несжимаемости среды [2, 3]. На базе такого подхода расчет нестационарных процессов вентиляции принципиально невозможен. Поэтому разработка газодинамических методик расчета нестационарных процессов вентиляции является актуальной.

Математическая модель вентиляции сети выработок шахты [4–7] основывается на предположениях об одномерном движении газа в прямолинейных выработках, полном и мгновенном перемешивании потоков в узлах сопряжения прямолинейных выработок. Эффекты турбулентной вязкости и теплопроводности учитываются в уравнениях в правых частях с использованием интегральных коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок и мест их пересечения, которые подробно изучены экспериментально. В математической модели учитываются эффекты естественной конвекции неизотермического газа при его движении в наклонных выработках. Для прогнозирования влияния естественной конвекции на аэродинамику рудничной атмосферы в сети выработок берутся во внимание теплообмен рудничной атмосферы со стенками выработок, а также изменение температуры стенок при теплообмене. Неоднородное распределение легких примесей в рудничной атмосфере также приводит к естественно-конвективному движению в наклонных выработках и учитывается в математической модели. Процессы вентиляции определяются пространственной топологией вырабо-

ток, расстановкой и режимами работы вентиляционного оборудования (вентилятора главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляционных сооружений, располагающихся в выработках шахты). С учетом всех перечисленных физических процессов и эффектов система уравнений нестационарной аэродинамики сети выработок угольных шахт запишется в виде

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho s u}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u^2}{\partial x} + s \frac{\partial p}{\partial x} = \Pi \tau_w - s \rho g \sin \gamma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho s \left(e + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial x} = \Pi \dot{m} H - \Pi \alpha (T - T_w) - s \rho u g \sin \gamma, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_i s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}_i, \quad i = 1, \dots, I - 1, \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^I \rho_i, \quad (5)$$

$$p = \rho R T, \quad (6)$$

$$e = \frac{p}{\rho(k-1)},$$

где уравнения неразрывности (1), движения (2), энергии (3) и уравнения для парциальных плотностей компонент (4) записаны в предположении, что приход массы \dot{m} , \dot{m}_i и энтальпии $H\dot{m}$ в поток осуществляется со стенок выработок. Уравнения (1)–(6) записываются для всех прямолинейных участков сети выработок. В этих уравнениях x — координата; t — время; ρ — плотность газа; ρ_i — парциальные плотности; u — скорость; p — давление; H — энтальпия массы, приходящей со стенок; T — температура; T_w — температура стенок; $s(x)$ — сечение; Π — периметр выработки; γ — угол наклона выработки к горизонту; k — показатель адиабаты газовой смеси; R — газовая постоянная; g — ускорение силы тяжести; τ_w — напряжение трения на стенках выработки; α — коэффициент теплоотдачи; I — число газовых компонент.

Коэффициент теплоотдачи вычисляется с учетом свободной и вынужденной конвекции газа в выработках по эмпирическим формулам, учитывающим наклон выработок [8]. Для углов наклона выработок менее 45° к горизонту:

$$\text{Nu}_F = 0.0214 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}, \quad \text{Nu}_N = 0.817 \text{Ra}^{0.215} \left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-0.382},$$

$$\text{Nu} = \left(\text{Nu}_F^3 + \text{Nu}_N^3 \right)^{1/3}, \quad \alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{D_{eqv}},$$

где $\text{Re} = \frac{\rho u D_{eqv}}{\mu}$, $\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda}$, $\text{Ra} = \frac{g \rho^2 C_p \zeta (T_w - T_g) D_{eqv}^3}{\mu \lambda}$, $D_{eqv} = \frac{4s}{\Pi}$.

Для углов наклона выработок более 45° к горизонту:

$$\text{Nu}_F = \frac{0.0357 \text{Re} \text{Pr}^{1/3} (1 + \text{Pr}^{-5/6})}{\ln(17 \text{Re})}, \quad \text{Nu}_N = 0.15 \text{Ra}^{1/3} \left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-16/27}.$$

Если потоки вынужденной и естественной конвекции сонаправлены, то $\text{Nu} = \left| \text{Nu}_F^3 + \text{Nu}_N^3 \right|^{1/3}$, если противонаправлены, то $\text{Nu} = \left| \text{Nu}_F^3 - \text{Nu}_N^3 \right|^{1/3}$, $\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{D_{eqv}}$.

Напряжение трения на стенках выработки определяется по формулам

$$\tau_{mp} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}.$$

Здесь Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; Ra — число Релея; Nu — число Нуссельта; D_{eqv} — эквивалентный диаметр выработки; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; ζ — коэффициент теплового расширения газа; λ, μ — коэффициенты теплопроводности и вязкости газа; α — коэффициент теплоотдачи; c_f — коэффициент сопротивления.

Пересечения горных выработок будем представлять объемом заданной величины (рис. 1).

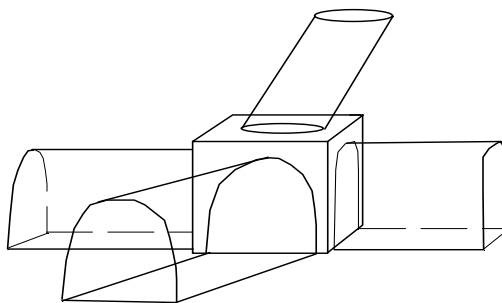


Рис. 1. Схематическое изображение узла с примыкающими выработками

Предполагая давление одинаковым по объему, смешение потоков из примыкающих выработок с разными концентрациями примесей происходит мгновенно. Запишем законы сохранения массы, энергии и концентрации примесей для объема сопряжения в виде

$$V \frac{d\rho}{dt} = \sum_k G_k, \quad (7)$$

$$V \frac{dE}{dt} = \sum_k G_k H_k, \quad (8)$$

$$V \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_k G_{i,k}, \quad i = 1, \dots, I - 1, \quad (9)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^I \rho_i, \quad (10)$$

$$p = \rho RT. \quad (11)$$

Уравнения (7)–(11) записываются для всех объемов сопряжений выработок. В этих уравнениях: ρ — плотность газа в объеме V ; $E = C_v \rho T$ — его внутренняя энергия; T — температура; ρ_i — парциальные плотности примесей; G_k — потоки массы между объемом V и примыкающей k -той выработкой; $H_k = C_p T_k$ — энтальпия газа в потоке G_k ; $G_{i,k}$ — потоки массы примесей; суммы по k берутся по всем выработкам, примыкающим к объему V .

Уравнения (7)–(10) позволяют вычислить в объеме k -того узла газодинамические параметры $\rho_k, \rho_{CH_4,k}, \rho_{CO_2,k}, T_k$. После этого давление p_k можно вычислить из уравнения состояния идеального газа (11).

Представленная модель расчета аэродинамических параметров в узле основана на законах сохранения массы и энергии. Изменение импульса в узлах не рассчитывается. Перенос импульса через сопряжения определяется заданием граничных условий на границах ветвей, примыкающих к узлу в соответствии с направлением характеристик.

В нестационарных условиях вентиляции температура стенок выработок меняется во времени и влияет на аэродинамику рудничной атмосферы. Так как наибольший градиент температуры формируется в направлении, перпендикулярном стенкам выработки, будем моделировать распространение тепла в горной породе от стенок выработки на основе одномерного уравнения теплопроводности в направлении, перпендикулярном стенке во всех точках вдоль выработки, полагая в этих точках интенсивность теплообмена газа со стенками по периметру выработки одинаковой:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (12)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = \alpha(T_g(x, t) - T(x, 0, t)), \quad \frac{\partial T(x, \infty, t)}{\partial y} = 0, \quad (13)$$

где y — координата в глубь стенок; χ — коэффициент температуропроводности горных пород, $\chi = \lambda_n / (c_n \rho_n)$; λ_n — коэффициент теплопроводности; c_n — удельная теплоемкость; ρ_n — плотность горных пород; $T_g(x, t)$ — температура газа, определяемая из решения системы уравнений (1)–(11); $T(x, 0, t)$ — температура поверхности стенок выработок, определяется из решения уравнения (12) с крайевыми условиями (13). Полученные значения $T(x, 0, t) = T_w$ используются в модели (1)–(11). Поэтому уравнения (1)–(11) и (12), (13) решаются совместно.

В качестве начальных условий для системы уравнений (1)–(11) задаются начальные распределения давления, температуры, скорости и концентрации метана в прямолинейных выработках (в расчетах предполагается, что метан является единственной примесью в воздухе):

$$p(x, 0) = p_n, \quad T(x, 0) = T_n, \quad u(x, 0) = 0, \quad \rho_{CH_4}(x, 0) = \rho_{CH_4 n} \quad (14)$$

и параметры состояния газа в объемах сопряжений:

$$p_k(0) = p_n, \quad T_k(0) = T_n, \quad \rho_{CH_4 k}(0) = \rho_{CH_4 n k} \quad (15)$$

(индекс n соответствует начальным значениям параметров состояния рудничной атмосферы).

Граничные условия ставятся в зависимости от условий на границах прямолинейных выработок. Если границей выработки является стенка, то ставится условие непротекания. Если границей выработки является выход выработки на поверхность в атмосферу, то граничные условия ставятся в зависимости от направления потока газа. Если на границе выработки установлен работающий вентилятор проветривания, то задаются скорость и энтропия воздуха, втекающего в выработку. Если граница ветви примыкает к узлу, то граничные условия ставятся в соответствии с направлением характеристик и задаются давление и энтропия либо только давление.

Таким образом, система уравнений (1)–(15) описывает нестационарное течение смеси газов в выработках с учетом тепло- и массообмена потока воздуха со стенками выработок.

Для численного решения системы уравнений (1)–(6) использовался метод распада произвольного разрыва С.К. Годунова [9]. Обыкновенные дифференциальные уравнения (7)–(9) решались методом Эйлера. Уравнения теплопроводности (12) с крайевыми условиями (13) решались по неявной разностной схеме методом прогонки на неравномерной сетке, в которой шаг по пространству в глубь стенки увеличивался по геометрической прогрессии.

Газоотсасывающие установки, используемые в комбинированных схемах проветривания, устанавливаются на поверхности для отбора метановоздушной смеси через неподдерживаемые выработки. Проведем моделирование влияния газоотсасывающих установок на вентиляцию на примере модельной сети выработок угольной шахты, изображенной на рисунке 2.

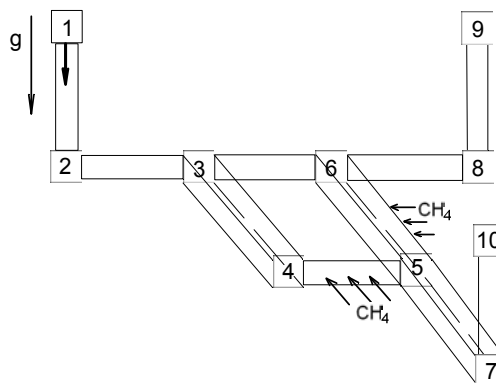


Рис. 2. Схема модельной сети выработок угольной шахты

В точке 1 установлен вентилятор главного проветривания. В точке 10 — газоотсасывающая установка (на поверхности земли). Для сравнительного анализа проводились расчеты вентиляции сети в случае, когда точка 10 является тупиком и выходом в атмосферу. Предполагалось, что в выработках 4–5, 5–6 происходит приток метана со стенок в вентиляционный поток (для различных вариантов исследования). Длины выработок были приняты: 1–2 — 100 м, 2–3 — 1000 м, 3–4 — 1000 м, 4–5 — 400 м, 5–6 — 1000 м, 3–6 — 400 м, 6–8 — 1000 м, 8–9 — 100 м, 5–7 — 1000 м, 7–10 — 100 м, площади проходного сечения выработок — 10 м^2 , периметр — 12 м. Коэффициент аэродинамического сопротивления в выработках был принят одинаковым для всех выработок.

Расчеты проводились по модели (1)–(15) до установления стационарных значений параметров состояния среды в выработках. Результаты расчетов получившегося стационарного состояния проветривания представлены на рисунках в виде распределения скорости газа и концентрации метана в выработках на маршрутах I — 1-2-3-4-5-6-8-9, II — 1-2-3-6-8-9, III — 1-2-3-4-5-7-10, IV — 1-2-3-6-5-7-10 (установившиеся распределения параметров).

На рисунке 3 представлены результаты расчетов, когда в точке 10 отсутствует связь выработки с атмосферой (тупик); на рисунке 4 — в точке 10 имеется выход в атмосферу; на рисунке 5 — в точке 10 установлена газоотсасывающая установка. При проведении этих расчетов было принято, что в выработках 4–5, 5–6 (рис. 2) происходит приток метана в вентиляционный поток.

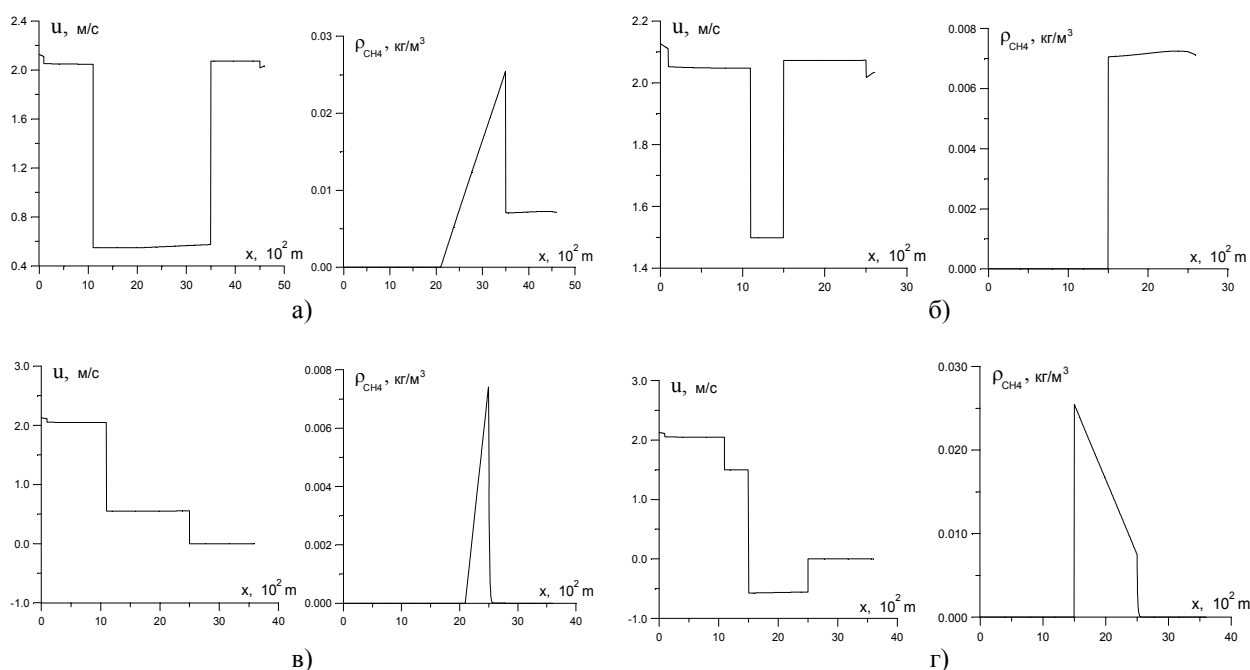


Рис. 3. Стационарные распределения скорости и парциальной плотности метана по маршрутам а) I, б) II, в) III, г) IV. В конце ветви 10 — тупик

В случае, когда в точке 10 тупик, скорость течения в участке 3–4–5–6 маленькая, поэтому там происходит накопление метана до больших значений (рис. 3 а, г). Потоки газа в узле б перемешиваются, и в атмосферу идет поток рудничной атмосферы с малой концентрацией метана (рис. 3 а, б).

Для уменьшения концентрации метана в областях, где происходит его накопление, можно задействовать дополнительные выработки с выходами в атмосферу. На рисунке 4 представлены расчеты, когда в точке 10 выработки связаны с атмосферой. Видно, что на участке 3–4–5 скорость протекания газа увеличилась и в отличие от предыдущего варианта на участке 5–6 изменилось направление течения. В связи с большей скоростью движения вентиляционного потока накопление метана в потоке на этом участке уменьшается, на выходе в атмосферу в точке 10 концентрация метана также уменьшается за счет смешения потоков в узле 5. Из-за изменения направления течения газа на участке 5–6 на выходе в атмосферу в точке 9 метан отсутствует.

Для уменьшения концентрации метана в областях его интенсивного выделения и накопления в сети выработок на поверхности иногда устанавливают газоотсасывающие вентиляционные установки (ГОВУ). Были проведены расчеты, когда в точке 10 установлена ГОВУ, которая обеспечивает отвод

рудничной атмосферы со скоростью 2.07 м/с. Результаты расчетов приведены на рисунке 5. Как видно из рисунка, качественно картина течения остается аналогичной случаю, когда в точке 10 имеется выход в атмосферу. Однако количественные значения другие: скорость на участке 5–6 стала выше, концентрация метана на входе в точку 10 и на участках 4–5 и 5–6 уменьшилась, скорость газа в вертикальной выработке 8–9 стала маленькой.

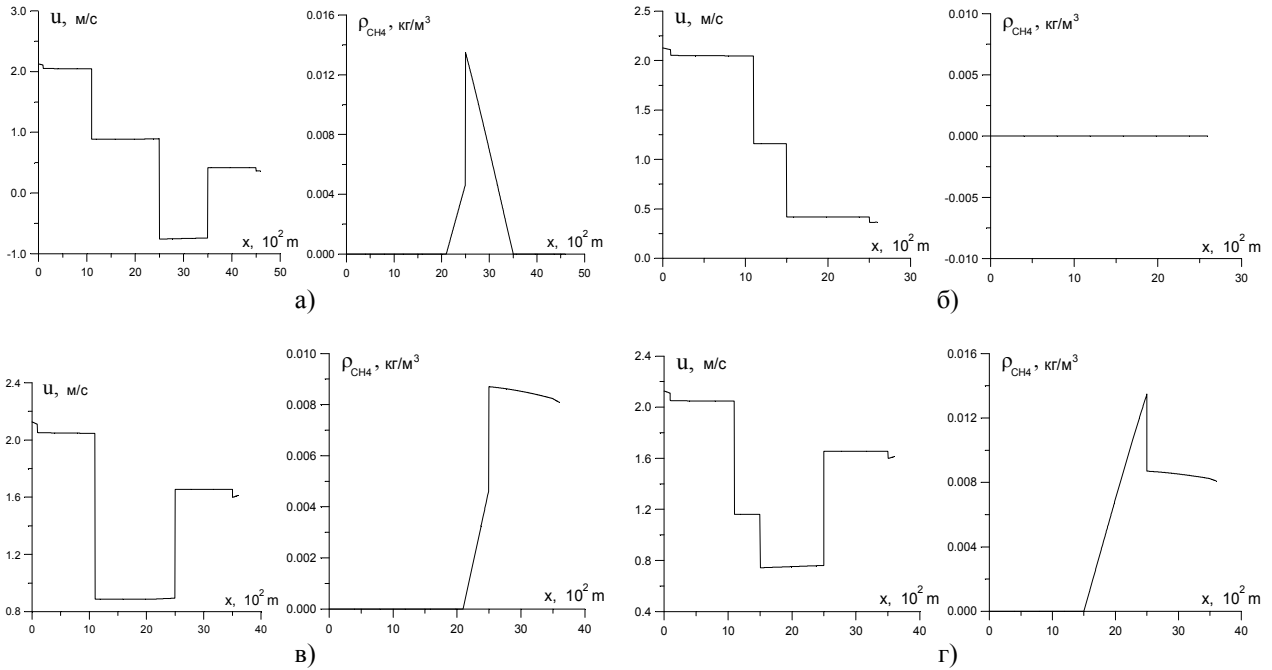


Рис. 4. Стационарные распределения скорости и парциальной плотности метана по маршрутам а) I, б) II, в) III, г) IV. В конце ветви 10 — выход в атмосферу

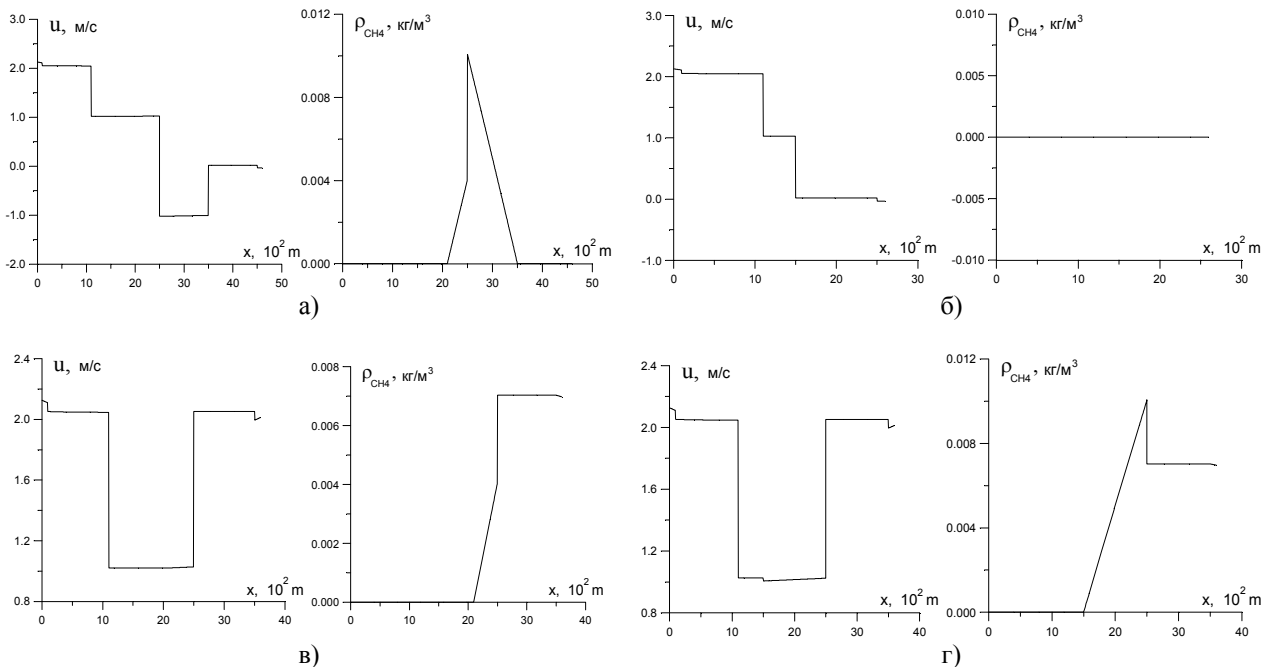


Рис. 5. Стационарные распределения скорости и парциальной плотности метана по маршрутам а) I, б) II, в) III, г) IV. В конце ветви 10 — газоотсасывающая установка, скорость газа 2.07 м/с

Был проведен расчет при скорости газоотсоса ГОВУ 1.5 м/с. Это значение скорости меньше, чем скорость рудничной атмосферы на выходе в атмосферу в точке 10 без установки ГОВУ (рис. 4). В

этом варианте ГОВУ блокирует поток газа в атмосферу и приводит к появлению большей концентрации метана на участках 4–5 и 5–6.

Отметим, что во всех вариантах по длине выработок, где происходит приток метана в вентиляционный поток, имеется неоднородное распределение концентрации метана по длине выработок. При прохождении вентиляционного потока через сопряжения выработок происходит изменение концентрации метана из-за смешения его с потоками смежных выработок (как, например, на рис. 3 а, 4 в, г и др.). При этом только в локальных областях таких выработок может возникнуть превышающая безопасный уровень концентрация метана.

Таким образом, газоотсасывающая установка способна эффективно перераспределять потоки рудничной атмосферы и уменьшать концентрацию метана в рудничной атмосфере. В случаях, когда производительность ГОВУ будет меньше расхода воздуха, который поступает в выработанное пространство за счёт работы вентилятора главного проветривания, использование ГОВУ становится неэффективным.

Разработанная математическая модель и методика расчета нестационарного проветривания сети выработок угольных шахт учитывают реальную топологию сети выработок (длины и площади поперечных сечений выработок, переменность площади сечения выработок, углы их наклона, сопряжения выработок, выходы на поверхность), характеристики вентилятора главного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляторов местного проветривания, расположение вентиляционных сооружений, взрывоустойчивых перемычек, водоналивных взрывозащитных перемычек, взрывозащитных парашютных перемычек, если они развернуты, искусственно создаваемые при угрозе взрыва завалы выработок, загромождение выработок оборудованием, нестационарный теплообмен потока газа со стенками выработок, метановыделение со стенок выработок, перенос локальных скоплений метана, если они заданы в начальных условиях. Разработанный подход позволяет решать задачи управления вентиляцией сети выработок угольной шахты с помощью расстановки в сети вентиляционных сооружений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11–08–00370-а.

References

1. Zolotih S.S., Stekolshikov G.G. Technology of combined ventilation of the excavation sites and fields with the use of gas involvement ventilation units for coal mines // STC Kuzbassugletechnologia. — Kemerovo, 2001. — 123 p.
2. Mine ventilation: a Handbook / K.Z. Ushakov. - 2-nd edition. — M.: Subsoil, 1988. — 440 p.
3. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Medvedev I.I. Mine aerology — M.: Subsoil, 1978. — 440 p.
4. Mathematical modeling of combustion and explosion of high-energy systems / Editor I.M. Vasenin. — Tomsk: Publ. TSU, 2006. — 322 p.
5. Vasenin I.M., Kosterenko V.N. et al. Simulation of the process of ventilation of the coal mines // Baikal reading: Abstracts of reports of scientific conference. Ighevsk: IAM YuB RAS, 2010. — P. 124–128.
6. Lukashov O.Yu., Glazunov A.A. et al. Research of non-stationary aerodynamic processes in a fire in a coal mine // News of higher education institutions. — Physics. — 2009. — Vol. 52. — № 7/2. — P. 142–145.
7. Shragher E.R., Krajnov A.Yu. et al. Gas-dynamic method of calculation of non-stationary ventilation of coal mines // Materials of all-Russian scientific conference. — Tomsk: Publ. TSU, 2009. — P. 43–45.
8. Reference book on heat exchangers. — Vol. 1. — M.: Energoatomizdat, 1987. — 561 p.
9. Godunov S.K., Zabpodin A.V., Ivanov M.I., et al. Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics. — M.: Science, 1976. — 400 p.

Влияние природных факторов на гидродинамические процессы и процессы разрушения в отвалах урановых рудников

Influence of natural factors on hydrodynamic and destruction processes in dumps of uranium mines

Воробьев А.Е.¹, Юров В.М.², Портнов В.С.³

¹Российский университет дружбы народов (E-mail: fogel_al@mail.ru);

²Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru);

³Карагандинский государственный технический университет (E-mail: umo@kstu.kz)

Мақалада уран кендерінің қалдықтары мен карьерлеріндегі гидродинамикалық процестердің жаңа модельдері ұсынылды. Алынған формулалар табиғи және лабораториялық жағдайда анықтауға болатын экологиялық маңызды параметрлерді алуға мүмкіндік береді. Сондай-ақ кендерде осы процестердің жаңа моделі ұсынылған. Нәтижелер жиынтығы тек қоршаған ортаның радиациялық ластану деңгейіне экологиялық мониторинг жасау үшін емес, сонымен қатар оларды алшақтату стратегиясын жасауға қолданылады.

New models of hydrodynamic processes in dumps and open-cast mines of the worked-out uranium mines are offered in the work. The deduced formulas allow to do an estimation of ecologically significant parameters and their definition in natural and laboratory conditions. Also there are offered new models of destruction processes of rocks in dumps and open-cast mines of the worked-out uranium mines. The received results can be used not only for ecological monitoring of the territories of the uranium mines, but also for development of the strategy for their isolation. The results of the work can be taken as a basis for forecasting of a radiating environment pollution and development of methods for isolation of radioactive waste dumps.

Введение

Экологическая обстановка территорий формируется в результате взаимодействия комплекса факторов, важнейшими из которых являются особенности компонентов природной среды и характеристика техногенного воздействия. На основе оценки экологической обстановки необходимо принятие управленческих решений по снижению негативных последствий техногенного воздействия на литосферу. Анализ современных экологических проблем показывает, что формирование неблагоприятной экологической обстановки в значительной степени обусловлено загрязнением окружающей среды. Загрязнение, в свою очередь, вызвано усилением миграции и преобразованием форм нахождения химических элементов под воздействием техногенных факторов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы загрязнения среды радиоактивными отходами отвалов и карьеров урановых рудников за счет воздействия на них атмосферных осадков, температуры и других природных факторов.

Общие положения

Добыча урановой руды производится на рудниках и открытых карьерах обычными способами и методом подземного выщелачивания. Возникновение при этом отходов и отвалов связано с осуществлением дореакторного топливного цикла (рис. 1). Основной целью геоэкологических исследований на стадии разведки, отработки и рекультивации урановых месторождений является изучение природных геоэкологических условий месторождения, под которыми понимают группу факторов, способствующих надежной изоляции технологических растворов в водоносных горизонтах уранополиэлементных рудных залежей [1].

Надежность изоляции технологических растворов в водоносном горизонте обеспечивается благоприятными сейсмическими, геоструктурными, литолого-фациальными, геохимическими, гидродинамическими и гидрогеохимическими природными факторами [2]. Задачи, решаемые геоэкологическими исследованиями в процессе отработки месторождения, заключаются в оценке негативного влияния уранового рудника на окружающую среду, в первую очередь на подземные и поверхностные воды.

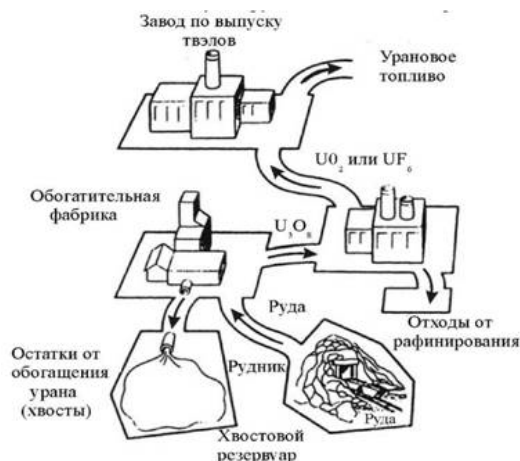


Рис. 1. Схема дореакторного топливного цикла

Под гидрогеологическими условиями месторождения понимается набор факторов, т.е. природных обстановок, способствующих формированию гидродинамических и гидрохимических особенностей подземных вод, основные из которых: число и характеристика водоносных горизонтов, их водообильность и статические уровни, направление и скорость движения подземных вод, фильтрационные свойства пород, характер гидравлической связи водоносных горизонтов, распространение, надежность (выдержанность) водоупоров, химический состав пластовых вод и их температура. Роль этих факторов среди других природных условий иллюстрируется таблицей 1.

Т а б л и ц а 1

Роль природных факторов в оценке условий отработки урановых месторождений

Факторы, влияющие на процесс природного выщелачивания	Характеристика условий выщелачивания		
	весьма благоприятных	благоприятных	неблагоприятных
1	2	3	4
Литологический состав руд	Отсортированные гравийно-песчаные отложения с примесью глинисто-алевритовых частиц, не более 10 %	Отсортированные разно-, средне- и мелкозернистые пески с примесью глинисто-алевритовых частиц, не более 20–30 %	Неотсортированные разно-, мелко- и тонкозернистые пески с содержанием глинисто-алевритовых частиц, более 20–30 %
Химический тип руд	Алюмосиликатные (содержание SiO ₂ > 80 %)	Алюмосиликатные (содержание SiO ₂ > 60–80 %)	Карбонатно-алюмосиликатные с содержанием карбонатов (по CO ₂) более 2 %
Минеральный состав руд	Урановые минералы представлены тонкодисперсными оксидами урана и коффинитом. Текстура руд эмульсионно-дисперсная	Урановые минералы представлены тонкодисперсными и точечными выделениями оксидов урана и коффинита. Текстура руд — от эмульсионно-дисперсной до вкрапленной	Урановая минерализация представлена урановыми и урансодержащими минералами, характеризующимися ассоциацией их с органическим веществом и сульфидами. Текстура руд — от эмульсионной до пятнистой
Проницаемость руд, м/сут	Высокопроницаемые руды с K _ф более 5 м/сут	Умеренно-проницаемые руды с K _ф 1–5 м/сут	Слабопроницаемые и практически непроницаемые руды с K _ф менее 1 м/сут
Отношение водопроницаемости рудного тела к водопроницаемости горизонта	Более 0,2	0,1–0,2	Менее 0,1

1	2	3	4
Мощность продуктивного водоносного горизонта, м	До 10	10–30	Более 30
Отношение эффективной мощности к рудной	Менее 5	5–10	Более 10
Глубина залегания рудных тел, м	До 100	100–500	Более 500–700
Продуктивность, кг/м ²	Более 5	1–5	Менее 1
Водопроницаемость руд, м ² /сут	Более 100	10–100	Менее 10
Глубина залегания уровня подземных вод, м	До 10	10–100	Более 100
Водообильность (удельный дебит) руд, л/с	Выше 0,5	0,1–0,5	Менее 0,1
Активная пористость руд, %	Более 20	10–20	Менее 10
Коэффициент фильтрационной неоднородности рудных тел	Более 0,75	0,25–0,75	Менее 0,25
Содержание карбонатов (по СО ₂) в руде, %	Менее 1	1–2	Более 2
Содержание сульфидов в руде, %	Менее 2	2–4	Более 4
Положение рудного тела в водоносном горизонте	В нижней части	В средней части	В верхней части
Ширина рудного тела, м	Более 100	50–100	Менее 50
Запасы урана в проницаемых рудах, %	Более 80	60–80	Менее 60
Температура подземных вод, °С	Более 30	10–30	Менее 10

Влияние природных факторов на отработанные урановые месторождения, хвостохранилища, отвалы, карьеры связано, в первую очередь, с доступом свободного воздуха, атмосферных осадков и значительных колебаний температуры. В то же время и факторы, перечисленные в таблице 1, имеют важное значение в гидродинамических и физико-химических процессах: скорости фильтрации растворов, массопереносе, гомогенных и гетерогенных процессах, осаждении минералов, окислительно-восстановительных и кислотно-основных процессах, сорбции и десорбции, комплексообразовании и т.п.

Серьезную экологическую опасность представляют собой хвостохранилища, отвалы, карьеры, шахты, скважины урановых месторождений.

Облучение на уранодобывающих предприятиях, а также на радиационно-зараженной территории отработанных урановых месторождений, карьеров и отвалов создают три радиационно-опасных фактора: объемная активность короткоживущих дочерних продуктов радона в окружающей среде; удельная активность долгоживущих радионуклидов ряда урана-радия в окружающей среде; мощность дозы внешнего гамма-излучения. Важнейшие характеристики основных радионуклидов представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Важнейшие радиометрические характеристики основных радионуклидов ряда урана-238

Радионуклид	Период полураспада	Энергия излучения, МэВ (выход, %)		
		альфа	бетта	гамма
1	2	3	4	5
Уран-238	4,5 · 10 ⁹ лет	4,15 (23) 4,20 (77)	-	-
Торий-234	24,1 сут	-	0,103 (21) 0,193 (79)	0,063 (3,5) 0,093 (4,0)
Протактиний-234	1,18 мин	-	2,29 (98)	0,765 (0,3) 1,001 (0,6)
Уран-234	2,4 · 10 ⁵ лет	4,72 (28) 4,77 (72)	-	0,053 (0,2)

1	2	3	4	5
Торий-230	$7,7 \cdot 10^4$ лет	4,62 (24) 4,68 (76)	-	0,068 (0,6)
Радий-226	1600 лет	4,59 (5,7) 4,78 (94)	-	0,186 (4,0)
Радон-222	3,824 сут	5,49 (100)	-	-
Полоний-218	3,05 мин	6,00 (100)	-	-
Свинец-214	26,8 мин	-	0,65 (50) 0,71 (40)	0,295 (19) 0,352 (36)
Висмут-214	19,7 мин	-	1,00 (23) 1,51 (40) 3,26 (19)	0,609 (47) 1,120 (17) 1,764 (17)
Свинец-210	22,3 лет	-	0,01 (85) 0,06 (15)	0,047 (4,0)
Висмут-210	5,01 сут	-	1,16 (100)	-
Полоний-210	138 сут	5,30 (100)	-	-

Нормируемые эффективные дозы облучения персонала урановых предприятий указаны в таблице 3. Подробные рекомендации по оценке контрольных уровней среднегодовой мощности дозы всех видов излучения приведены в [3].

Требования к точности оценок доз облучения вытекают из достижения главной цели радиационного контроля, состоящей в том, чтобы надежно выявить все случаи возможного или фактического превышения установленного предела годовой дозы облучения отдельных лиц — 20 мЗв/год и осуществить соответствующие меры защиты.

Учитывая общую неопределенность дозиметрических оценок, связанную, в частности, с неопределенностью значений дозовых коэффициентов и широкими колебаниями чувствительности отдельных индивидуумов к ионизирующему излучению, нет смысла стремиться к возможно более точным оценкам доз. При хорошей организации радиационного контроля погрешность определения индивидуальных годовых доз от суммы радиационно-опасных факторов не должна превышать 50 %, с доверительной вероятностью 0,95, если ожидаемая доза $D \geq 20$ мЗв/год.

Если погрешность выше 50 %, должны быть приняты меры по увеличению объема измерений или совершенствованию системы контроля.

Т а б л и ц а 3

Нормируемые величины доз облучения персонала урановых предприятий от суммы радиационно-опасных факторов

Нормируемая величина индивидуальной эффективной дозы	Предел дозы, мЗв	
	группа А	группа В
Годовая	50	12,5
Годовая, усредненная за 5 лет	20	5
Накопленная за период 50 лет	1000	250

Природные гидродинамические процессы в отвалах урановых месторождений

Влияние природных факторов на урановые отвалы связано, в первую очередь, с доступом атмосферных осадков и последующей миграцией радиоактивных растворов [4–5].

Рассмотрим этот вопрос в рамках подхода, обозначенного нами в работах [6–8], где рассматривалась задача о просачивании цианидного раствора через пористую руду при кучном выщелачивании металлов. Суть подхода состоит в рассмотрении движения раствора сквозь рудный штабель (отвал) как движения с подвижной границей раздела фаз. С математической точки зрения краевые задачи такого типа принципиально отличны от классических задач параболического типа. Вследствие зависимости размера области переноса потока от времени к этому типу задач неприменимы классические методы разделения переменных и интегральных преобразований Фурье, так как, оставаясь в рамках классических методов математической физики, не удаётся согласовать решение уравнения с движением границы раздела фаз [9–10]. Тем не менее такой подход отвечает реальному протеканию процесса.

В работе [6] при общей постановке задачи о движении раствора в цилиндрическом капилляре нам удалось подобрать такое интегральное преобразование, которое позволило свести задачу к интегральному уравнению Вольтерра II рода и получить общее решение задачи. Мы не будем останавливаться на общем решении задачи, а сразу рассмотрим случай однородных граничных условий [7].

В этом случае краевая задача для плотности потока раствора будет выглядеть так:

$$\frac{\partial \rho(r, z, t)}{\partial t} = a^2 \left[\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) \right], \tag{1}$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{t=0} = 1, \tag{2}$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{r=R} = 1, \tag{3}$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{z=0} = 1, \tag{4}$$

$$\rho(r, z, t) \Big|_{z=\beta(t)} = 1. \tag{5}$$

Решение задачи (1)–(5) с учетом результатов работы [6] будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho(r, z, t) = & \sum_{k=0}^{\infty} J_0(\lambda_{0k} r) \left\{ e^{-a^2 t} \left[\frac{1}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^e e^{-\frac{(z-\xi)^2}{4a^2\tau}} \cdot \left(\int_0^e J_0(\lambda_{0k} r) r dr \right) d\xi + \right. \right. \\ & + \frac{RJ_0(\lambda_{0k} R)}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^e \frac{e^{-a^2 t}}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{(z-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\xi + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{z}{(a^2(t-\tau))^{3/2}} e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}} K_1(\tau) d\tau + \\ & \left. \left. + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{z-\beta(\tau)}{(a^2(t-\tau))^{3/2}} e^{-\frac{(z-\beta(\tau))^2}{4a^2(t-\tau)}} K_2(\tau) d\tau \right] \right\}. \tag{6} \end{aligned}$$

Мы ограничимся лишь первым членом ряда (6), поскольку остальные вносят незначительный вклад, при этом ошибка не превышает 2–3 %.

Используя граничные условия и вычисляя интегралы, получим:

$$\begin{aligned} \rho(r, z, t) = & J_0\left(\frac{2r}{R}\right) e^{-a^2 t} \left\{ \frac{e^2 J_0\left(\frac{2re}{R}\right)}{16a^3} \ln t + \frac{RJ_1\left(\frac{2r}{R}\right)}{16a^3} e^{-a^2 t} \ln(t-1) + \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{t}}\right) \left(\frac{a^2}{z\pi} + \frac{a^3}{\pi^2 z\beta(t)} \right) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{t}}\right) \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{[z-\beta(t)]} \right\}. \tag{7} \end{aligned}$$

При больших t значения $1/\sqrt{t} \rightarrow 0$, $\ln(t-1) \cdot e^{-a^2 t} \rightarrow 0$. Пренебрегая несущественными членами, получим:

$$\rho(r, z, t) = \frac{a^3}{\pi^2} J_0\left(\frac{2r}{R}\right) \cdot \frac{t}{z\beta(t)}, \tag{8}$$

Если учесть, что $z = V_{cp} t$, где V_{cp} — средняя скорость раствора, то из (8) следует

$$\rho(r, t) = const \cdot J_0\left(\frac{2r}{R}\right) \cdot \frac{1}{\beta(t)}, \tag{9}$$

где $const = a^3 / \pi^2 V_{cp}$.

Первый член в выражении (9) описывает влияние геометрии капилляра и движения раствора на плотность транспортного потока. Более того, он описывает возникновение «пробок» в потоке раствора, что хорошо видно из графика функции $\rho(r) = J_0\left(\frac{2r}{R}\right)$ (рис. 2).

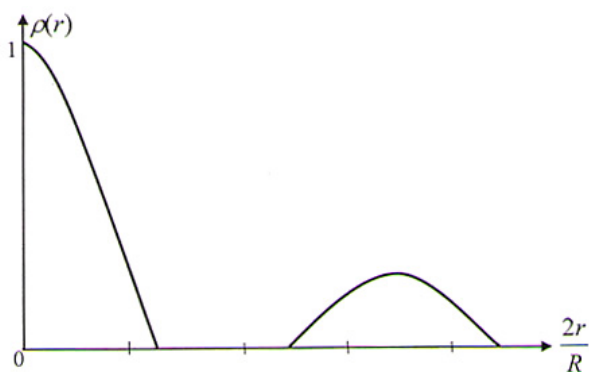


Рис. 2. График функции $\rho(r)$ при $r>0$

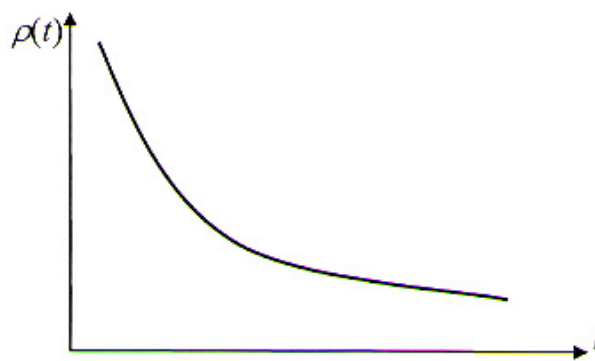


Рис. 3. Зависимость плотности потока от времени

Движение границы $\beta(t)$ чаще всего получается автомодельным, т.е. $\beta(t) = \beta_0 \sqrt{t}$ [9]. Автомодельный закон следует из уравнения баланса на границе раздела фаз. В этом случае уравнение (9) принимает вид

$$\rho(r, t) = \text{const} \cdot J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (10)$$

График функции $\rho(t)$ показан на рисунке 3.

Из рисунка 2 видно, что поток раствора, даже находящийся в свободном режиме, распадается и переходит в смешанный — свободно-заторный. Из рисунка 3 следует, что поток раствора, находящийся в свободном режиме, гиперболически убывает с течением времени. Результатом распада и убывания потока раствора, как это следует из предложенной нами модели, является хаотическое (конвективное) движение раствора даже для однородных граничных условий.

Для стационарного потока в идеальном случае, т.е. $J_0(0) = 1$, $\beta(t) = z_i(t) - z_{i+1}(t)$, из (10) следует

$$\rho(t) = \text{const} \cdot \frac{1}{z_i(t) - z_{i+1}(t)}. \quad (11)$$

Уравнение (11) впервые было получено Гринбергом [11] в рамках гидродинамической модели. Таким образом, модель Гринберга получается как частный случай нашей модели.

Природное выщелачивание урановых руд всегда сопровождается протеканием химических реакций того или иного типа. В рамках представленного выше подхода этот вопрос рассмотрен нами в работе [8]. При этом изменение концентрации радиоактивного раствора в жидкой фазе происходит за счет следующих факторов: движение радиоактивного раствора с некоторой средней скоростью, радиальное перемешивание раствора, молекулярная диффузия и собственно процесс растворения твердых частиц минералов урана.

Радиоактивный поток при $r = R$ равен $\gamma(z, t) = k(C_R)^m$. Здесь m — порядок реакции выщелачивания, k — константа скорости реакции, C_R — концентрация урана в руде. Для реакции выщелачивания $m = 1$.

При больших t значения $1/\sqrt{t} \rightarrow 0$, $\ln(t-1) \cdot e^{-a^2 t} \rightarrow 0$. Пренебрегая несущественными членами, получим:

$$\rho(r, z, t) = \frac{a^3}{\pi^2} k C_R J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{\sqrt{t}}{z \beta_0}. \quad (12)$$

Если учесть, что $z = V_{cp} t$, где V_{cp} — средняя скорость раствора, а параметр $a^2 = D$ равен коэффициенту диффузии, то из (12) следует

$$\rho(r, z, t) = \frac{D^{3/2}}{\pi^2} k C_R J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{1}{V_{cp} \beta_0 \sqrt{t}}. \quad (13)$$

Реальная скорость потока в трещине $V_{cp} = V/\epsilon$, где ϵ — пористость фильтрационного сечения, V — скорость фильтрации, м/с. Пористость является важнейшей характеристикой пористых пород, руд и любых пористых тел и определяется как доля объема тела, приходящаяся на поры, или объем пор в объеме материала. Обычно при этом игнорируются замкнутые поры и учитываются

только соединенные между собой проточные поры. Они образуют поровое пространство — сложную разветвленную и нерегулярную структуру. Пористость большинства материалов находится в пределах 0,1 — 0,4. Взяв для оценки типичное для многих горных пород значение $\varepsilon = 0,25$, находим, что в 1 м^2 породы объем пор $0,25 \text{ м}^3 = 250 \text{ л}$. Пористость — безразмерная величина, она не зависит от размера частиц, составляющих пористую среду, если речь идет о геометрически подобных средах.

Для радиоактивного потока уравнение (13) переписывается в виде

$$\rho(r, z, t) = \frac{D^{3/2}}{\pi^2} k C_R J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{V \beta_0 \sqrt{t}}. \quad (14)$$

Согласно закону Дарси [12] радиоактивный поток пропорционален сечению трещины и обратно пропорционален ее длине или глубине проникновения (насыщения) раствора. Поэтому обозначая глубину насыщения через h (см) и вводя коэффициент пропорциональности A , получим из (14):

$$h(t) = A \cdot \sqrt{t}. \quad (15)$$

На рисунке 4 показаны экспериментальные результаты из работы [13], которые с хорошей точностью описываются выражением (15).

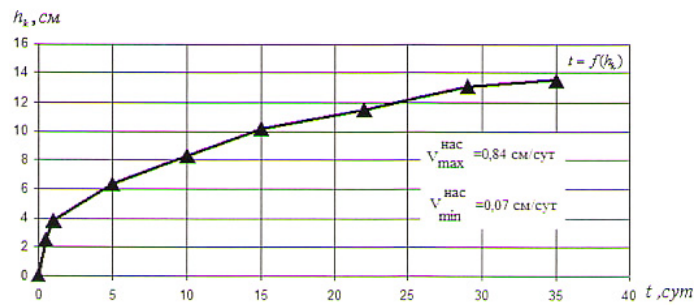


Рис. 4. Зависимость глубины насыщения руды от времени выщелачивания [13]

Отметим теперь случай, когда в пористой среде движется несколько фаз. В нашем случае это может быть смесь воздуха и радиоактивного раствора. Наличие межфазных границ требует учета капиллярных сил. Их роль в природных пластах является определяющей. Это связано с малостью пор. Так, относительная роль капиллярных сил по отношению к силе тяжести и силам вязкого сопротивления определяется отношениями, которые носят название капиллярных чисел [14]:

$$Ca_g = \frac{\rho g d^2}{\sigma}, \quad Ca = \frac{\mu V}{\sigma}, \quad (16)$$

где σ — межфазное натяжение, имеющее порядок 10 мН/м; V — скорость фильтрации, входящая в формулу (14); μ — вязкость раствора.

В каждом элементе пористой среды фазы стремятся расположиться так, как им диктуют капиллярные силы. При этом мелкие поры оказываются занятыми более смачивающей жидкостью, а крупные — менее смачивающей. Большинство природных пористых сред гидрофильны, и смачивающей жидкостью для них является вода, а несмачивающей — воздух. Детальная картина сосуществования двух фаз в поровом пространстве зависит от их количества. Его обычно характеризуют фазовыми насыщенностями s_i , $i=1,2$. Насыщенность — это доля порового пространства, занятая данной фазой, так что $s_1 + s_2 = 1$. В частности, если насыщенность несмачивающей фазы достаточно мала, меньше некоторого критического значения s_r , эта фаза должна распасться на отдельные капли, которые заперты капиллярными силами и не способны двигаться под действием обычных для пласта перепадов давления. Именно этим объясняется неизбежность защемления некоторого количества остаточного раствора.

Выше мы показали, что поток радиоактивного раствора распадается на капли при определенном соотношении аргументов функции Бесселя. Это видно и из уравнения (14): при увеличении радиуса R поры ($R \gg 2r$), т.е. когда она превращается в трещину $J_0(2r/R) \approx J_0(0) = 1$.

Поскольку скорость фильтрации V в (14) стоит в знаменателе, то в силу соотношений (16) радиоактивный поток будет уменьшаться с увеличением капиллярных сил.

Еще в 1957 г. Бродбент и Хаммерсли [15] рассмотрели общую ситуацию, возникающую при случайном распространении жидкости в среде. Позднее, рассматривая протекание жидкости в порис-

той среде, Хаммерсли [16] назвал протекание перколяцией. Процессы диффузии, такие как распространение растворимого вещества в растворителе или движение электронов в полупроводниках, хорошо понятны. Диффундирующая частица может достигать любой точки в среде. Иначе обстоит дело в случае протекания. Наиболее характерной особенностью перколяционных процессов является существование порога протекания, ниже которого процесс распространения жидкости ограничен конечной областью среды. Порог протекания в рамках теории перколяции можно определить только численными методами, и, как правило, им является вероятность протекания от узла к узлу чаще квадратной решетки. В целом теория перколяции относится к той области теоретической физики, которая исследует критические явления. В этом смысле она близка к теории катастроф [17]. В то же время задача о протекании приводит к множеству фрактальных структур.

Однако за пределами теории перколяции остается множество вопросов, о которых мы говорили выше: плотность радиоактивного потока, высота отвала, капиллярное сопротивление и много других параметров, определяющих процесс выщелачивания, который представляет сложный физико-химический, гидродинамический процесс.

Мы использовали другой подход, что отражено в названии работ [6–8] — не протекание, а просачивание. Был применен аналитический метод решения неклассической задачи диффузии, известной как задача Стефана [18]. В отличие от большинства работ по этой проблеме мы рассматриваем конечный цилиндр, что привело к ограниченной области диффузии, как и в теории перколяции. Отсюда и возникновение ряда эффектов (распад потока и т.д.), характерных для теории перколяции и теории катастроф.

Полученное нами аналитическое выражение для плотности радиоактивного потока содержит экспериментально определяемые или задаваемые параметры. Сравнение развитой теории с экспериментом показало работоспособность предложенной модели.

Какие же практические выводы следуют из предложенных моделей и формул?

Зная геометрию отвалов и карьеров, измеряя параметры потоков радиоактивных растворов в естественных условиях, можно по предложенным формулам построить геоэкологическую карту района в реальном масштабе времени и ее динамику. Это дает возможность строить стратегию природоохранительных мер по изоляции радиоактивных отходов.

Предложенная методика отличается от численного моделирования, которое может дать распределение радиоактивного потока только в данный момент времени. Численная модель дает приемлемые результаты относительно динамики процесса распределения радиоактивных потоков во времени только в случае линейной зависимости потока от времени. Однако реально такая ситуация наблюдается сравнительно редко (см. рис. 3).

Процессы разрушения горных пород и руд в отвалах и карьерах урановых рудников

Атмосферные осадки, ветер, колебания температуры разрушают горные породы в отработанных карьерах, отвалах, приводя к раскрытию радиоактивных минералов и дальнейшей их миграции по водостокам. Знание этих процессов является необходимым условием для объективного экологического мониторинга отработанных урановых месторождений.

Несмотря на давнюю историю исследования процесса разрушения, мы еще далеки от понимания физической картины этого явления в целом. Это обусловлено, прежде всего, чрезвычайной сложностью проблемы прочности материалов, не говоря уже о номенклатуре проявления этой сложности. Интерпретация явления разрушения требует привлечения специалистов по физике, химии, механике, инженеров-конструкторов. В реальных условиях процесс разрушения представляется весьма многоликим. Во многом это связано с многообразием элементарных актов разрушения, при интерпретации которых до последнего времени преобладали модельные представления, основанные на простых геометрических образах, данных Гриффитсом, Стро, Орованом и другими. Сейчас, однако, становится ясно, что физика разрушения нуждается в дальнейшем развитии основополагающих идей.

Динамическое разрушение сплошных сред — это неравновесный процесс, происходящий на различных структурно-масштабных уровнях как в пространстве, так и во времени. Эксперименты по динамическому разрушению твердых тел демонстрируют целый ряд эффектов, принципиально противоречащих классическим моделям прочности и трещиностойкости. В соответствующих классических критериях предполагается, что в процессе динамического разрыва материала энергия и импульс, идущие на образование новых поверхностей и областей разрушения, расходуются непрерывным образом. В [19] показано, что введение физической дискретности (наряду с пространственно-

геометрической), т.е. дискретного потребления энергии и импульса, необходимых для поддержания процесса динамического разрыва, позволяет разрешить ряд противоречий классической теории.

Закономерности раскрытия минеральных фаз с теоретических позиций одним из первых рассмотрел А.М.Годэн [20]. Годэном введены следующие понятия: «подчиненная фаза В» — минерал; «преобладающая фаза А» — порода; d — крупность дробленой или измельченной руды; d_3 — крупность зёрен подчиненной фазы; PA — показатель раскрытия фазы А, доля свободных частиц фазы А; PB — показатель раскрытия фазы А, доля свободных частиц фазы В. Разработанная им модель раскрытия минеральных фаз легла в основу многих последующих моделей.

Существующие аналитические модели раскрытия минеральных фаз имеют общие характерные признаки:

- руды моделируются матричными системами, зёрна минерала в которых представляют собой правильные тела одинаковых размеров, без учета петрографических характеристик руд;
- во всех формулах используется соотношение размера зерна и величины дробленого куска, от которого зависит степень раскрытия, следовательно, учитывается раскрытие лишь в узком диапазоне крупности, тогда как реальная характеристика дробленой руды представляет собой совокупность классов различной крупности;
- имеющиеся модели не учитывают различия в прочностных характеристиках слагающих руду минералов, их разную измельчаемость, что исключает применение данных моделей для оценки селективного разрушения;
- математические формулы, описывающие долю получаемых раскрытых минеральных фаз, сложны и имеют несколько переменных.

Рассмотрим процесс разрушения минералов, используя предложенный нами термодинамический подход [21]. В этой работе для эффективности разрушения горной породы получено выражение

$$\eta = \frac{kT}{C_1} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot \bar{N}, \quad (17)$$

где A — работа (энергия) разрушения; T — температура; G^0 — потенциал Гиббса массивного образца минерала; \bar{N} — среднее число элементарных носителей разрушения (пропорциональное числу дефектов), C_1 — постоянная.

Из (17) следует прямая пропорциональность от числа элементарных носителей разрушения (что и следовало ожидать), от температуры, работы (энергии) разрушения и обратно пропорциональная зависимость от энергии Гиббса.

Исследованиями, проведенными В.Д.Кузнецовым и Л.А.Шрейнером, установлена зависимость между твердостью минералов шкалы твердости Мооса и их поверхностной энергией (табл. 4). Твердость приведена в скобках первого столбца.

При измельчении минералов до размеров, близких к молекулярным, работа диспергирования, отнесенная к единице вновь образованной поверхности (удельная поверхностная энергия), составляет от $4 \cdot 10^{-4}$ до $2,7 \cdot 10^{-3}$ Дж/см².

Как видно из таблицы 4, удельная поверхностная энергия и работа диспергирования колеблются в широких пределах, что объясняется трудностями определения σ , но единая закономерность возрастания поверхностной энергии с увеличением твердости минералов и степени их дисперсности прослеживается во всех случаях.

Т а б л и ц а 4

Расчетная работа диспергирования (Дж) минералов, расположенных по шкале твердости Мооса при различной дисперсности [22]

Минерал	Принятое значение σ , 10^{-7} Дж/см ²	Удельная поверхность частиц, S, см ² /г				
		1×10^4	5×10^4	1×10^5	5×10^5	1×10^6
1	2	3	4	5	6	7
Алмаз (10)	11400	11,4	57,0	114	570	1140
	1200	1,2	6,0	12	60	120
Корунд (9)	1550	1,55	7,75	15,5	77,5	155
	7000	7,0	35,0	70,0	350	700
	1600	1,6	8,0	16,0	80	160

1	2	3	4	5	6	7
Топаз (8)	1080	1,08	5,4	10,8	54	108
	4000	4,0	20,0	40	200	400
	1200	1,2	6,0	12	60	120
Кварц (7)	780	0,78	3,9	7,8	39	78
	2200	2,2	11,0	22,0	110	220
	1000	1,0	5	10	50	100
Ортоклаз (6)	358	0,36	1,8	3,58	18	35,8
	1200	1,2	6,0	12,0	60	120
	820	0,82	4,1	8,2	41	82
Апатит (5)	176	0,19	1,0	1,86	10	186
	700	0,7	3,5	7,0	35	70
	650	0,65	3,25	6,5	32,5	65
Флюорит (4)	146	0,15	0,73	1,5	7,3	15
	400	0,4	2,0	4,0	20	40
	590	0,59	2,95	5,9	29,5	59
Кальцит (3)	78	0,08	0,39	0,78	3,9	7,8
	220	0,22	1,1	2,2	11	22
	460	0,46	2,3	4,6	23	46
Галит (2)	39	0,04	0,2	0,4	2	4
	150	0,15	0,75	1,5	7,5	15
	400	0,40	2,0	4,0	20	40
Тальк (1)	25	0,025	0,125	0,25	1,25	2,5
	80	0,08	0,4	0,80	4	8
	350	0,35	1,75	3,5	17,5	35

В таблице 5 мы приводим собранные из различных источников значения твердости по шкале Мооса для основных минералов урана.

Из таблицы 5 видно, что основные минералы урана распадаются по твердости на две группы — левый и правый столбцы таблицы. Работа разрушения для первой группы значительно больше, чем для второй. Отсюда следует вывод: вторая группа минералов урана (Урановые черни — Тюямунит) экологически опаснее первой (Уранинит — Казолит).

Как следует из формулы (17), основной вклад в работу разрушения (эффективность разрушения) вносят колебания температуры.

Атмосферные осадки также оказывают влияние на разрушение горных пород и минералов. Облегченное разрушение горных пород в присутствии воды было обнаружено П.А.Рибиндером и его сотрудниками [23]. Обсуждению различных гипотез о влиянии воды на прочность твердых тел посвящена работа [24]. Однако количественной теории этого явления пока нет.

Качественный анализ влияния воды на эффективность разрушения минералов можно провести на основе формулы (17). Вода, имея малое (по абсолютной величине) значение энергии Гиббса G^0 , приводит к уменьшению общей энергии Гиббса в системе минерал+вода в силу ее аддитивности. В соответствии с формулой (17) это увеличивает эффективность разрушения, т.е. облегчается разрушение горных пород в присутствии воды.

Т а б л и ц а 5

Твердость по шкале Мооса минералов урана

Минерал	Твердость	Минерал	Твердость
Уранинит	6–7	Урановые черни	1–4
Давидит	6	Уранофан	2–3
Коффинит	5–6	Карнотит	2–2,5
Настуран	4–6,3	Торбернит	2–2,5
Браннерит	4,5–5,5	Отенит	2–2,5
Казолит	4–5	Тюямунит	1–2

Подводя итог сказанному выше, можно сделать вывод о важности знания минерального состава горных пород в отвалах, карьерах урановых рудников как для объективного экологического мониторинга, так и при разработке мероприятий по их рекультивации.

При этом используются сведения о твердости минералов, их энергии Гиббса. Однако объективную картину экологической обстановки на территории отвалов, карьеров можно воссоздать, зная энергию разрушения (диспергирования) минералов, слагающих горные породы последних. Она равна $A = \sigma \cdot S$, где σ — поверхностное натяжение минерала, S — площадь его поверхности.

Вся сложность определения работы диспергирования заключается в сложности определения поверхностного натяжения σ минерала (твердого тела). Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления [25, 26], когда подвижность поверхностных атомов становится заметной. Недавно были предложены методы экспериментального определения поверхностного натяжения твердых тел, включая минералы [27–29]. Таким образом, возможность определения энергии диспергирования минералов по их поверхностному натяжению открывает перспективу проведения объективного экологического мониторинга территории отработанных урановых рудников.

Заключение

В настоящей работе нами предложены новые модели гидродинамических процессов в отвалах и карьерах отработанных урановых рудников. Полученные при этом формулы позволяют делать оценку экологически значимых параметров, определять их в природных и лабораторных условиях.

Предложены новые модели процессов разрушения горных пород в отвалах и карьерах отработанных урановых рудников. Полученные при этом результаты могут быть использованы не только для экологического мониторинга территорий урановых рудников, но и для выработки стратегии их рекультивации.

Совокупность полученных в настоящей работе результатов может быть положена в основу прогнозирования радиационного заражения окружающей среды и использована при выработке мер по изоляции отвалов радиоактивных отходов.

References

1. *Sednev M.V.* The methodical features of target ecological monitoring at the uranium mining enterprises // The dissertation of the candidate of geologo-mineralogical sciences. — M., 2007. — 130 p.
2. *Laverov N.P., Velichkin V.I. et. al* Isolation of the worked-out nuclear materials: geological-geochemical bases. — M.: IGEM the Russian Academy of Sciences, 2008. — 254 p.
3. Methodical instructions MI 2.6.1.11–01 «Organization of the radiating control at the uranium mines and the calculation of the radiation doses of the staff». — M., 2004. — 29 p.
4. Radio hydro-geological researches at forecasting and searches of uranium deposits connected with bedded oxidation zones / Under G.M. Shor's edition. — L.: Subsoil, 1987. — 166 p.
5. *Driver J.* Geochemistry of natural waters. — M.: World, 1985. — 439 p.
6. *Vorob'ev A.E., Portnov V.S. et. al* Infiltration of a cyanic solution through porous ore. I. The general consideration // The International journal of the applied and basic researches. — 2010. — № 7. — P. 82–88.
7. *Vorob'ev A.E., Portnov V.S. et. al* Infiltration of a cyanic solution through porous ore. II. Homogeneous boundary conditions // The International journal of the applied and basic researches, 2010. — № 7. — P. 89–95.
8. *Vorob'ev A.E., Portnov V.S. et. al* Infiltration of a cyanic solution through porous ore. III. Chemical reactions // The International journal of the applied and basic researches. — 2010. — № 7. — P. 96–102.
9. *Kartashov E.M.* Analytical methods in the theory of heat conductivity of firm bodies. — M.: Higher school, 1985. — 480 p.
10. *Greenberg G.A.* About the solution of generalized problem of Stefan on liquid freezing, and also related problems of heat conductivity, diffusion and others // ISTF. — 1967. — Vol. 37. — № 9. — P. 1598–1606.
11. *Greenberg H.* An analysis of traffic flow // Operations Research. — 1959. — Vol. 7. — P. 79–85.
12. *Charny I.A.* Bases of underground hydraulics. — M.: The state technical edition, 1956. — 260 p.
13. *Khan-Lin-Dzho.* Substantiation of saturation degree of pieces and movement dynamics of solutions at compact alkaline extraction of metals // The abstract of the candidate dissertation. — M.: RGTU, 2000. — 26 p.
14. *Barenblatt G.I., Yesipov V.M., Ryjik V.M.* Movement of liquids and gases in natural beds. — M.: Bowels, 1984. — 208 p.
15. *Broadbend S.R., Hammerslay J.M.* Percolation processes. I. Crystals and mazes // Proc. Cambridge Philos. Soc. — 1957. — Vol. 53. — P. 629–641.
16. *Hammerslay J.M.* Origins of percolation theory // Ann. Isr. Phys. Soc. — 1983. — Vol. 5. — P. 47–57.
17. *Arnold V.I.* The theory of accidents. — M.: Editornaya URSS, 2007. — 136 p.
18. *Rubinstain A.* Problem of Stefan. — Riga: Zinatne, 1967. — 242 p.
19. *Olemskoy A.I., Kaznelson A.A.* Synergy of the condensed matters. — M.: URSS, 2003. — 336 p.
20. *Goden A.M.* Flotation. — M.: The state technical edition, 1959. — 358 p.

21. *Tursunbaeva A.K., Portnov V.S., Yurov V.M.* Thermodynamics of ore crushing at the compact alkaline extraction of metals. — P. 1–3 // Bulletin ENU of L.N.Gumileva, Naturally-engineering science series. — 2010. — № 4 (77). — P. 49–80.
22. Physical properties of rocks and minerals: the Directory geophysicist / Under N.B.Dortman's edition. — M.: Bowels, 1984. — 455 p.
23. *Rebinder P.A., Shrejner L.A., Zhivach K.F.* The hardness reducers at drilling. — M.: Publishing house AN of the USSR, 1944. — 232 p.
24. *Bershtejn V.A.* Mechanical hydraulic processes and durability of firm bodies. — L.: Science, 1987. — 318 p.
25. *Hochstein A.J.* A surface tension of firm bodies and adsorption. — M.: Science, 1976. — 256 p.
26. *Roldugin V.I.* Surface physical chemistry. — Dolgoprudnyy: The Publishing House «Intellect», 2008. — 568 p.
27. *Jurov V.M., Eshchanov A.N., Kuketaev A.T.* The measurement method of the surface tension of firm bodies // Patent RK. № 57691. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
28. *Jurov V.M., Portnov V.S., Puseeva M.P.* The measurement method of the surface tension and density of the surface conditions of dielectrics // Patent RK № 58155. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.
29. *Jurov V.M., Portnov V.S., Puseeva M.P.* The measurement method of the surface tension of magnetic materials // Patent RK № 58158. It is published 15.12.2008. The bulletin № 12.

УДК 548.736.5

Использование физических свойств минералов для оценки запасов полезных ископаемых

Use of physical properties of minerals for an estimation of minerals stocks

Выжва С.А.¹, Юров В.М.², Портнов В.С.³, Рева М.В.¹

¹Киевский национальный университет им. Т.Г.Шевченко, Украина (E-mail: MVREVA@union.KIEV.UA);

²Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru);

³Карагандинский государственный технический университет (E-mail: umo@kstu.kz)

Мақалада тепе-теңдіксіз термодинамика және скалярлық өрістердің аналогиясы әдістері қолданылған. Минералдардың физикалық қасиеттері мен термодинамикалық параметрлерді байланыстыратын формула табылды. Минералдардың физикалық қасиеттері мен оның кен орнының бірлік көлеміндегі құрамы арасында байланыс анықталды. Есеппен анықталған пайдалы қазбаның қоры барлау нәтижелерімен сәйкес келді. Оларды салыстыру теориялық және эксперименттік нәтижелердің үйлесімдігін көрсетті.

The methods of nonequilibrium thermodynamics and the method of analogies of scalar fields are used in the article. The formulas for relating of physical properties of minerals with their thermodynamic parameters are deduced. It is determined the link between physical properties of the mineral and its content into the volume unit of the deposit. Calculations are conducted for magnetic, electric, thermal and other properties of minerals. The calculated stocks of minerals of some deposits are compared with the explored reserves. The comparison shows the good agreement between the theoretical and experimental data.

Введение

Поиски большинства полезных ископаемых чаще всего ограничивались открытием месторождений по видимым ореолам рассеяния и другим визуально наблюдаемым поисковым признакам. Фонд таких «легко открываемых» месторождений быстро сокращается. Наряду с этим в последнее время становится очевидным наличие огромного количества так называемых «трудно открываемых» месторождений. Ориентировочные расчеты показывают, что общий фонд трудно открываемых месторождений по большинству полезных ископаемых во много раз превышает ресурсы легко открываемых месторождений. К этому нужно добавить, что запасы руд открытых и даже эксплуатируемых месторождений могут существенно превышать разведанные.

В связи с этим и ранее, и в настоящее время появляются работы, связанные с оценкой запасов полезных ископаемых как на региональном уровне, так и в мировых масштабах.

Количественная оценка прогнозных запасов полезных ископаемых в месторождениях — важнейшая проблема прикладной геологии. Важные работы в этом направлении принадлежат таким учё-

ным, как С.Дж. Ласки, А.М.Марголину, Н.И.Сафронову, Г.А.Булкину и ряду других. Наиболее близким к предложенному нами в настоящем исследовании методу является метод Н.И.Сафронова.

В настоящей работе рассмотрены вопросы использования физических свойств минералов для оценки прогнозных запасов полезных ископаемых.

Магнитные свойства минералов и запасы железорудных месторождений

В работе [1] с целью анализа влияния различных факторов на результаты магнитных измерений предложена физическая модель магнитного железосодержащего минерала с использованием методов статистической неравновесной термодинамики. В этой модели атомы железа, связанные с магнетизмом (в общем случае с любым магнитным минералом), рассматриваются как система взаимодействующих магнитных диполей, погруженная в термостат (рудовмещающие породы). Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием магнитных диполей с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью P), в отличие от взаимодействия с внешним магнитным полем (с вероятностью F). Диссипативные процессы приводят к тому, что вторичное поле меньше первичного. Функция отклика системы (измеряемая физическая величина — α , Э.Д.С. и т.д.) $\Phi = F/F + P$. Для вероятности диссипативных процессов получено

$$P = \frac{2\Delta S}{k\tau} \exp\left\{-\frac{E_m - G^0 / \bar{N}}{kT}\right\}, \quad (1)$$

где ΔS — изменение энтропии при квантовом переходе; E_m — среднее значение энергии основного состояния магнитных диполей; τ — время одночастичной релаксации ($\tau \approx 10^{-12}$ с); \bar{N} — среднее число магнитных диполей; G^0 — энергия Гиббса термостата; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Учитывая, что $\exp\{-E_m/kT\} \approx 1$, а $F = 1/\tau_p$, τ_p — «радиационное» время жизни возбужденного состояния ($\tau_p \approx 10^{-15}$ с), для функции отклика подсистемы магнитных диполей получаем выражение

$$\Phi = \left(1 + \frac{2\Delta S}{k} \frac{\tau_p}{\tau} \exp\left(\frac{G^0 / \bar{N}}{kT}\right)\right)^{-1}. \quad (2)$$

Если в качестве функции отклика Φ взять коэффициент отображения K , используемого в методе МИП (отношение вторичного поля к первичному), то из (2) получим

$$K = A_1 \frac{C_{Fe}^M}{C_M^0}, \quad \% \text{ абс}, \quad (3)$$

где $A_1 = kT / C$, $C = 2\Delta S\tau_p / k\tau$, $\tau_p\tau^{-1} \approx 5,4 \cdot 10^{-8}$; G_M^0 — энергия Гиббса магнетита; C_{Fe}^M — концентрация железа.

Если в качестве функции отклика взять магнитную восприимчивость, то

$$\alpha = A_2 \frac{C_{Fe}^M}{G^0}, \quad \text{ед. СИ}, \quad (4)$$

где $A_2 = A_1 \cdot d$.

Здесь d — коэффициент связи между K и α .

В основе нашего подхода при расчете запасов полезных ископаемых лежит объединение модели Н.И.Сафронова [2, 3] и модельных представлений, изложенных в работе [1]. Опуская подробности вычислений, мы будем сразу выписывать формулы для подсчета дифференцированных количеств (запасов) искомого минерала, т.е. его количества в единице объема.

В рамках развитых представлений для дифференцированных запасов металла получена следующая формула:

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_1 \alpha)} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $q_1 = 11406$, полученное с учетом значений $\beta, C_{Fe}^M, N_A, k, T$.

Для того чтобы оценить запасы месторождения с использованием соотношения (5), необходимо знать геометрию рудных тел, их среднюю магнитную восприимчивость, объемное содержание магнетита в руде. Для большинства железорудных месторождений Казахстана и Украины эти параметры определены. Ниже, в таблицах 1 и 2, приведены рассчитанные с учетом этих данных и соотношения (5) запасы железных руд некоторых месторождений Казахстана и Украины. Из таблицы 1 видно, что

прогнозные запасы магнетитовых руд, рассчитанные по формуле (5), больше разведанных. Однако для малых, полностью разработанных месторождений прогнозные и разведанные запасы совпадают с приемлемой точностью.

Т а б л и ц а 1

Прогнозные и разведанные запасы руд магнетитового железа месторождений Казахстана

Месторождение	Прогнозные запасы руды, млн. тонн	Разведанные запасы руды, млн. тонн
Соколовское	5330	3343
Сарбайское	2108	890,3
Качарское	6005	3998
Второе (основное) рудное тело	71,87	32,733
Третье рудное тело	17,31	13,51
Куржункульское	639,3	Более 80

Прогнозные запасы Соколовского и Сарбайского месторождений в сумме составляют 7438 млн.т, а разведанные — 4233 млн.т. Н.И.Сафронов [3] считает, что объем неразведанных запасов этих месторождений составляет 3–4 млрд. тонн, что вполне согласуется с нашими результатами.

Т а б л и ц а 2

Прогнозные и разведанные запасы железорудных месторождений Украины

Месторождение	Прогнозные запасы руды, млн. тонн	Разведанные запасы руды, млн. тонн
Криворожский железорудный бассейн	3600	2180
Кременчугский железорудный район	5200	4500
Белозерский железорудный район	860	700

Для железорудных месторождений Украины существует неплохое соответствие запасов, рассчитанных по формуле (5) и разведанных (табл. 2). Украинские специалисты оценивают прогнозные запасы Криворожского бассейна в 19 млрд. т, что в сумме с разведанными составляет около 40 млрд. т против 36 млрд.т, полученных по формуле (5). Приведенные примеры говорят в пользу предложенной модели.

Наряду с ранее известными методами [2, 3] преимуществом изложенного выше метода расчета прогнозных запасов железных руд является его экспрессность при удовлетворительной точности результатов. Метод позволяет рассчитывать запасы руд в пределах площади рудного горизонта, блока, охватываемой измерениями магнитной восприимчивости руд в естественном залегании, а также делать их качественную оценку по горизонтам, определяя среднее значение магнитной восприимчивости.

Метод аналогий и поля-аналоги

В физике существует значительное количество примеров успешного использования метода аналогий, и это является предпосылкой того, чтобы придать аналогии статус одного из возможных методов научного познания. Дж. Максвелл [4] сопоставил созданную им классическую теорию электромагнетизма с гидродинамикой несжимаемых жидкостей и подчеркнул значение такого подхода в науке: «Для составления физических представлений следует освоиться с существованием физических аналогий. Под физической аналогией я понимаю то частное сходство между законами двух каких-нибудь областей науки, благодаря которому одна из них является иллюстрацией для другой».

Во многих областях техники и физики встречаются явления, представляющие собой прямые аналоги процессов в электрическом и магнитном поле. В таблице 3 показана аналогия, существующая между величинами в различных скалярных потенциальных полях.

Аналогия между величинами в потенциальных полях

Параметр	Электростатическое поле	Электрического тока поле	Магнитостатическое поле	Тепловое поле
Потенциал	Потенциал U	Потенциал U	Потенциал Ω	Температура T
Градиент	Напряженность электрического поля E	Напряженность электрического поля E	Напряженность магнитного поля H	Градиент температуры $\text{grad}T$
Постоянная, характеризующая свойства среды	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Электрическая проводимость σ	Магнитная проницаемость μ	Температуропроводность a
Плотность потока	Электрическое смещение D	Плотность тока j	Магнитная индукция B	Плотность теплового потока q
Интенсивность источника	Плотность заряда ρ_e	Плотность тока j	Плотность магнитной массы ρ_m	Плотность источника тепла Q
Проводимость поля	Емкость C	Электрическая проводимость G	Магнитная проводимость Λ	Тепловая проводимость

Электрические свойства минералов и запасы угольных месторождений

Рассмотрим сначала гомогенную изотропную среду, которая содержит \bar{N} электронов проводимости и характеризуется термодинамическим потенциалом Гиббса G^0 . Возникновение тока плотностью j в среде является откликом системы невзаимодействующих электронов на внешнее поле и имеет вид [5]

$$\Phi = \frac{1}{1 + C_1 \exp\left\{-\frac{E_m - G^0/\bar{N}}{kT}\right\}}, \quad (6)$$

где $C_1 = 2\Delta S k \tau_p / \tau = \text{const}$ (смысл входящих в это выражение величин такой же, как и в [42]), $E_m = eE$, e — заряд электрона.

После линеаризации (6) при $\Phi = j$ получаем

$$j = \frac{kT}{C_1} \frac{eE}{G^0} \cdot \bar{N}. \quad (7)$$

Когда $\bar{N} = \text{const}$, мы из (7) имеем закон Ома в дифференциальной форме:

$$j = \sigma E, \quad (8)$$

где

$$\sigma = \frac{kT}{C_1} \frac{e\bar{N}}{G^0}. \quad (9)$$

Проводимость σ связана с удельным сопротивлением ρ соотношением

$$\rho = 1/\sigma = C \cdot G^0 / e\bar{N}, \quad C = \frac{C_1}{kT}. \quad (10)$$

Из уравнения (9) следует зависимость электропроводности минерала σ от температуры, давления, химического состава и т.д. через энергию Гиббса.

Пользуясь методом аналогий (табл. 3) для электроразведки, получим формулу типа (5), однако константа $q_2 = 155121,6$ и не совпадает с q_1 :

$$P_d = \frac{1}{\ln(q_2 \rho)} \cdot 100\%. \quad (11)$$

В таблице 4 представлены расчеты прогнозных дифференцированных запасов угля основных свит Карагандинского угольного бассейна.

Прогнозные дифференцированные запасы угля основных свит Карагандинского угольного бассейна

Свита	Удельное сопротивление, ρ (Ом·м)	Дифференцированные запасы (%)
Долинская	134,8	14,2
Тентекская	155,0	14,5
Карагандинская	145,1	14,3
Ашлярикская	86,7	13,4

Площадь Карагандинского угольного бассейна примерно равна 3600 км², глубина залегания пластов — 2200–2400 м, среднее удельное сопротивление $\rho = 130,4$ Ом·м.

Прогнозные запасы получаются равными 111672 млн. тонн, а разведанные — 60317 млн. тонн, т.е. почти в два раза больше. Частично такое расхождение связано с различием в расчетах промышленной углеплотности. Максимальная промышленная углеплотность на участках распространения всех четырех продуктивных свит составляет 103 млн. тонн на 1 км², а по кондициям 1960 г. (которые приняты сейчас) — 71 млн. тонн на 1 км², т.е. различие примерно в 1,5 раза.

Донецкий угольный бассейн был открыт в 1720-е гг. в районе нынешнего г. Лисичанска Луганской обл. Промышленное освоение началось с конца XIX в. Площадь составляет около 60 тысяч км², суммарные запасы до глубины 1800 м — 140,8 миллиарда тонн. В угленосной толще каменноугольного возраста до 300 пластов; средняя мощность рабочих пластов 0,6–1,2 м. Угли каменные марок Д — Т — 78 %, антрациты — 22 %, теплота сгорания 21,2–26,1 МДж/кг. Основные центры добычи — Донецк, Красноармейск, Макеевка, Лисичанск, Горловка, Свердловск, Ровеньки, Антрацит, Торез, Красный Луч и др.

Оценка по формуле (11) дает значение прогнозных запасов для Донецкого угольного бассейна — 460 миллиардов тонн. Такое завышенное значение показывает, что для угольных бассейнов в целом проводить расчеты по среднему значению удельного сопротивления нецелесообразно. Это связано с изменением последнего в очень широких пределах. Так, например, для антрацитов удельное сопротивление меняется от 10^{-3} до 10 Ом·м. Поэтому предлагаемый метод нужно использовать для отдельных свит, содержащих угли одной марки и имеющих примерно одинаковое сопротивление.

Использование теплофизических свойств минералов при оценке прогнозных запасов минерального сырья

На основе развитых представлений и метода аналогий для коэффициента теплопроводности минералов нами получено уравнение

$$\lambda = \frac{625\rho}{3C_2G^0} \cdot T. \quad (12)$$

В уравнение (12) входят только два параметра минерала — плотность и энергия Гиббса, которые экспериментально определены для большого количества минералов и представлены в справочниках. Для коэффициента мы получили значение $C_2=2,8 \cdot 10^{-2}$ (м²/кг с). В таблице 5 приводятся экспериментальные значения коэффициента теплопроводности, вычисленные по формуле (12).

Сравнение экспериментальных и теоретических значений коэффициента теплопроводности некоторых минералов

Минерал	$\lambda_{\text{эксп.}}$ Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	G^0 , Дж/моль	$\lambda_{\text{теор.}}$ Вт/(м·К)
Гипс	1,30	2,3	1795000	1,50
Магнетит	5,3	5,17	1014490	5,98
Лабрадор	1,5	2,70	3845180	1,57
Анортит	1,7	2,76	3994830	1,54
Олигоклаз	1,96	2,64	3750710	1,60
Шпинель	3,48	3,6	2188060	3,67
Альбит	2,31	2,61	3695040	2,00

Из таблицы 5 видно, что экспериментальные и теоретические значения хорошо согласуются друг с другом. Это, на наш взгляд, неплохой результат и подтверждает основные положения нашей модели.

Влияние давления на теплопроводность металлов и минералов с хорошей точностью выражается линейной зависимостью λ от P . Однако в области высоких давлений линейность нарушается. Теоретически этот вопрос разработан недостаточно.

Поскольку энергия Гиббса в области низких и средних значений слабо зависит от давления, то (12) дает линейную зависимость теплопроводности от давления, что соответствует экспериментальным данным. В области высоких и сверхвысоких давлений нужно учитывать эту зависимость, что приводит к соотношению

$$\lambda = K \frac{P}{d + \vartheta P}, K = const, d = H - TS. \quad (13)$$

Схематически вид функции (13) показан на рисунке. Кривая имеет максимум, определяемый из условия

$$\frac{\partial \lambda}{\partial P} = 0, \frac{\partial \lambda}{\partial P} = \frac{d}{(d + \vartheta P)^2} = 0, d = 0, H = TS.$$

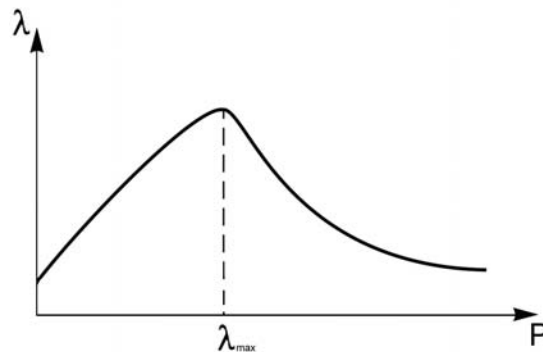


Рис. Зависимость коэффициента теплопроводности от давления

Тепловой режим земной коры зависит главным образом от теплопроводности минерального вещества. Предложенная в настоящей работе модель может, на наш взгляд, оказаться полезной при анализе теплового режима земной коры. Пользуясь методом аналогий, для дифференцированных запасов минерального сырья получаем уравнение типа (5), где $q_3 = 36585,3$.

Т а б л и ц а 6

Прогнозные запасы некоторых месторождений неметаллических полезных ископаемых

Месторождение	Минерал	λ , Вт/м·К	Прогнозные запасы	Разведанные запасы
Тектурмас	Кварцит	7,98	39,9 (млн. тонн)	40,86 (млн. тонн)
Сарытоганбай	Графит	389,0 87,6	132 (млн. тонн)	100 (млн. тонн)
Семизбугы	Корунд	34,6	22 (тыс. тонн)	17,7 (тыс. тонн)

В качестве примера в таблице 6 приведены рассчитанные прогнозные запасы некоторых месторождений неметаллических полезных ископаемых Казахстана. Из таблицы видно хорошее совпадение разведанных и рассчитанных запасов.

*Использование ядерно-физических методов для определения прогнозных запасов
полезных ископаемых*

В случае гамма-гамма-методов число факторов, влияющих на результаты геофизического опробования, значительно больше, чем в случае магнитных измерений. Помимо минерального состава, текстуры руд и т.д., существенную роль играет геометрия измерений, которая предъявляет довольно жёсткие требования к конструкции измерительных устройств. К этому нужно добавить и влияние

влажности, и зависимость результатов измерений от энергии первичных гамма-квантов. Предложенный нами выше термодинамический анализ магнитных методов измерения может быть использован и для гамма-гамма-метода. Отличие состоит в том, что энергия гамма-квантов E_γ значительно превосходит энергию магнитных диполей, поэтому членом $\exp(E_m/kT)$ в выражении для функции отклика пренебрегать уже нельзя. Беря в качестве функции отклика Φ интенсивность рассеянного гамма-излучения с энергией E_γ , мы получаем:

$$1 - I / I_0 = -B \frac{C_{Fe}}{G^0 E_\gamma}, \quad (14)$$

где I — интенсивность регистрируемых гамма-квантов после рассеяния; I_0 — интенсивность гамма-квантов от источника, $B=(kT)^2/C$; $C = 2\Delta S/k$ — постоянная для данного элемента и источника гамма-излучения; ΔS — изменение энтропии при квантовом переходе из возбужденного состояния в основное, $\Delta S = \bar{N}E_\gamma^2 / 2kT^2$, где \bar{N} — среднее число атомов элемента в минерале; G^0 — энергия Гиббса железосодержащего минерала. Из (14) следует линейная зависимость интенсивности рассеянного излучения от содержания железа C_{Fe} , что соответствует экспериментальным данным. Из (14) следует обратно пропорциональная зависимость чувствительности гамма-метода к содержанию железа от энергии первичных гамма-квантов, что также подтверждается экспериментально.

В случае магнетита (Fe_3O_4) $G^0 \approx 1 \text{ кДж/моль}$ мы получаем уравнение связи

$$C_{Fe} = 71 \cdot J / J_0. \quad (15)$$

Из экспериментальных данных имеем $C_{Fe} = 76 \cdot I / I_0$, что близко к (15) в пределах погрешности метода. Уравнения связи типа (14) и (15) можно получить и для других железосодержащих минералов, используя экспериментальные значения энергии Гиббса этих минералов.

Используя уравнение (15), мы получим

$$C_{Fe} = const \cdot G^0 \cdot \left(\frac{E_\gamma}{Z_{эф}} \right)^4. \quad (16)$$

Соотношение (16) показывает связь между определяемой концентрацией железа с характеристиками первичного гамма-излучения, эффективными атомным номером и термодинамическими свойствами среды. В диффузионном приближении зависимость интенсивности рассеяния гамма-излучения веществом выражается в явном виде:

$$J / J_0 = const \cdot \frac{\rho}{R} e^{-\xi}, \quad (17)$$

где ρ — плотность вещества, $\xi = \bar{\mu} \rho R$; $\bar{\mu}$ — коэффициент ослабления гамма-излучения; R — длина зонда. Уравнения (14)–(17) определяют практически всю информацию, получаемую в методе ГГМ. Однако полученное нами соотношение (14) содержит меньшее число параметров и более удобно при интерпретации полученных на практике экспериментальных данных. Чтобы перейти теперь к расчету прогнозных запасов в методе ГГМ, достаточно провести анализ, аналогичный указанному выше, и воспользоваться формулой (14). В результате получаем

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_4 I / I_0)} \cdot 100 \%, \quad (18)$$

где $q_4 = 809826$. Для ряда железорудных месторождений Казахстана прогнозные ресурсы, вычисленные с помощью формулы (18), представлены в таблице 7.

Т а б л и ц а 7

Прогнозные и разведанные запасы железных руд некоторых месторождений Казахстана.

Месторождение	Прогнозные запасы, млн. тонн	Разведанные запасы, млн. тонн
Атансор	51,6	55,9
Тлеген	19,3	12
Кузган	23,4	14,6
Сарытобе	35,9	20

Использование плотностных характеристик минералов или данных гравиразведки для оценки запасов полезных ископаемых

Чтобы проиллюстрировать термодинамический подход к задачам гравиразведки, мы использовали сферическую модель Земли. В результате для аномалии ускорения свободного падения мы получили

$$\Delta g = B \frac{\Delta G^0}{C_M}, \quad B = \frac{\varphi \alpha}{A} = const. \quad (19)$$

Для дифференцированных запасов получим формулу типа (5), где $q_5 = 1002473$. В качестве примера в таблице 8 представлены результаты расчета прогнозных ресурсов некоторых угольных месторождений Казахстана, где проводилась гравиразведка.

Т а б л и ц а 8

Прогнозные и разведанные запасы некоторых угольных месторождений Казахстана

Месторождение	Прогнозные запасы млн. тонн	Разведанные запасы, млн. тонн
Тенгиз-Коржункольское	2243	355
Борлы	1760	478
Куучек	3140	636
Майкюбинское	5500	3647

Использование акустических свойств минералов или данных сейсморазведки для оценки запасов полезных ископаемых

Сейсмическая разведка включает совокупность методов для изучения глубинного строения земной коры. Используем аналогию между электрическими и акустическими системами, представленную в таблице 9.

Т а б л и ц а 9

Аналогия между электрическими и акустическими переменными и параметрами

Электрическая система	Акустическая система
Напряжение V	Давление P
Ток I	Скорость частиц v
Заряд e	Смещение u
Индуктивность L	Плотность среды ρ
Емкость C	Акустическая емкость $C_A=1/\tau$
Сопротивление R	Акустическое сопротивление R_A

Для нас представляет интерес скорость частиц v , которая и является основой сейсморазведки. Исходя из таблицы 9 ей соответствует ток I , который согласно закону Ома пропорционален электропроводности σ и обратно пропорционален удельному сопротивлению.

Для прогнозных запасов минерального сырья, используя данные сейсморазведки, мы получаем следующее выражение:

$$P_k = \frac{1}{\ln(q_4 \vartheta)} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где q_4 вычисляется по аналогичной процедуре, как и в случае q_1 - q_3 . В результате имеем $q_4 = 26,03$.

В качестве примера в таблице 10 представлены результаты расчета прогнозных дифференцированных ресурсов по формуле (20) для уже рассчитанных нами угольных свит Карагандинского угольного бассейна по данным электроразведки. При этом использовались данные сейсмических исследований Б.М.Кенжина.

Прогнозные дифференцированные запасы угля основных свит Карагандинского угольного бассейна

Свита	Дифференцированные запасы (%) по ν (м/с)	Дифференцированные запасы (%) по ρ (Ом·м)
Долинская	14,6	14,2
Тентекская	15,1	14,5
Карагандинская	14,4	14,3
Ашлярикская	13,6	13,4

Видно, что оба метода неплохо согласуются между собой в пределах ошибок эксперимента.

Заключение

Измеряя физические свойства минералов в их естественном залегании (метод искусственного подмагничивания, электрического зондирования и т.д.), мы можем определять дифференцированные запасы полезных ископаемых по предложенной выше методике, не прибегая к дорогостоящим методам бурения разведочных скважин. Точность определения запасов минерального сырья будет возрастать при использовании различных (не менее двух) методов для одного и того же месторождения.

References

1. *Portnov V.S., Jurov V.M.* Relation of a magnetic susceptibility of magnetic ores with thermodynamic parameters and the iron maintenance // News of Higher educational institutions, Mining journal. — 2004. — № 6. — P. 122–126.
2. *Safronov N.I.* Bases of geochemical methods of searches of ore deposits. — L.: Bowels, 1971. — 212 p.
3. *Safronov H.H., Meshcherjakov S.S., Ivanov N.P.* Energy of ore formation and searches of minerals. — L.: Bowels, 1978. — 215 p.
4. *Maksvell J.K.* The selected works on the theory of electromagnetic field. — M.: The State Technical edition, 1954. — P. 12.
5. *Jurov V.M., Eshchanov A.N., Portnov V.S.* Mathematical models of electric conductivity of solid states // Materials of III international conference «Mathematical modelling and information technologies in science and education». — Almaty, 2005. — Vol. 1. — P. 234–237.

Метод определения зоны разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях

The method of definition of a destruction zone of a ground structure at explosive influences

Какенов К.С., Есенбаева Г.А.

Карагандинский экономический университет Казпотребсоюза (E-mail: sattu55@mail.ru)

Мақалада жарылыс барысында топырақ құрылымының бұзылуына әкелетін себептер қарастырылған. Соққы толқындар әсерінен топырақ қаңқасының кернелуі жағдайының өзгеру сипаттамаларын анықтау үшін есеп теңдеулері шығарылған. Жарылыс барысында топырақ құрылымының бұзылу және тығыздану аумақтарының шектерін зерттеу топырақтың кернелуі және құрылымының бұзылу жағдайларын қарастырудан тұрады. Жарылыс кезінде топырақтың тығыздануы мен құрылымының бұзылу аумақтарының нұсқасын анықтаудың тәжірибелік әдісі ұсынылған.

The reasons of destruction of a ground structure at explosions are considered in the article. The rated equations for definition of the characteristics changes of a ground skeleton intense state at the action of shock waves are deduced. It is shown, that the problem of definition of border for a structure destruction zone and ground compression at explosive influence leads to consideration of the condition of the structure destruction and the intense ground state at an explosion. The empirical method of definition of a zone contour of structure destruction and of a ground compression at an explosion is offered.

По сравнению с разрушением структуры при ударных, вибрационных и фильтрационных воздействиях характерной особенностью действия взрывов на грунт является многообразие причин, вызывающих разрушение их структуры. Непосредственными причинами разрушения структуры грунтов при взрывах могут быть: прохождение ударной волны по системе частиц грунта в поровой воде, взаимное смещение частиц грунта из-за образования и пульсации газовой полости и фильтрационные силы, возникающие вследствие давления газов взрыва на воду и ее движения по порам грунта. Для разработки достоверных расчетных методов оценки действия взрывов необходимо из большого числа действующих факторов выделить наиболее существенные, которые в основном и определяют разрушение структуры грунтов.

Основной причиной разрушения структуры и последующего уплотнения грунтов считаются взаимные смещения самих частиц грунта при взрывных воздействиях [1].

Взаимные смещения частиц при действии ударных волн определяются изменением напряжений в скелете грунта по сравнению с напряжениями от собственного веса грунта и пригрузки. Для характеристики изменения напряженного состояния скелета грунта введем соотношение

$$\Delta = \sigma(\rho_{\max}) / \sigma(\gamma_{zp}), \quad (1)$$

где $\sigma(\rho_{\max})$ — максимальное давление ударной волны, передающейся на скелет грунта; $\sigma(\gamma_{\max})$ — напряжение от собственного веса грунта и пригрузки.

С увеличением Δ величина взаимных смещений частиц за период действия взрывной волны увеличивается. Вводя критическое значение Δ_K , при котором происходит смещение частиц, вызывающее полное разрушение структуры грунта, можно определить контуры области, очерчивая ее линией $\Delta = \Delta_K$. В частном случае слоя однородного грунта зависимость (1) принимает вид

$$\sigma = \Delta_K \cdot \gamma_{zp} \cdot z. \quad (2)$$

Сжимающие напряжения $\sigma(\rho_{\max})$ в скелете грунта в результате действия ударной волны можно определить, рассматривая в процессе сжатия грунт как трехкомпонентную среду. Характер процесса сжатия водонасыщенных грунтов в период действия взрывных волн, а следовательно, и характер взрывных воздействий, в значительной мере зависят от длительности взрывной волны и водопроницаемости грунтов.

Длительность действия взрывных волн, в зависимости от мощности и расстояния, может изменяться от миллисекунд до нескольких десятых долей секунды. В сравнительно маловодопроницаемых водонасыщенных песчаных грунтах, и тем более супесях, лессах или суглинках, за этот малый

промежуток времени не может произойти существенного отжатия воды из пор грунта. Поэтому для этих условий можно принять, что сжатие грунта за период действия взрывных волн определяется в основном объемной сжимаемостью трехкомпонентной среды (вода, газовые пузырьки, твердые частицы) и деформируемостью скелета грунта. Таким образом, сжатие сравнительно мало водопроницаемых грунтов при взрывных воздействиях происходит в условиях, близких к испытанию грунтов, в так называемой закрытой системе, т.е. без оттока воды из образца.

Под фазами грунта в дальнейшем понимаются компоненты грунта: вода, газ, минеральные твердые частицы, рассматриваемые как однородная среда, подчиняющаяся определенным законам деформирования.

Под скелетом грунта понимается совокупность минеральных частиц и среды, осуществляющей непосредственную связь структурных элементов. Связь между структурными элементами грунта может иметь как водно-коллоидную, так и цементационную природу.

Основными параметрами многофазного грунта являются объемная концентрация твердых частиц $m_T = V_T / V$, объемная концентрация жидкости m_B и газа m_G : $m_B = V_B / V$; $m_G = V_G / V$, пористость $m = V_{II} / V$. Здесь V — объем элемента; V_{II} — объем пор; V_G — объем пор, занятый газом. Очевидно, что $m_T + m_B + m_G = 1$.

Удобными характеристиками являются коэффициент пористости $e = V_{II} / V_T = m / m_T = m(1 - m)$; степень водонасыщения $I_B = m_B / m = m_G / (m_G + m_G)$.

Общее изменение объема элемента грунта ΔV при всестороннем сжатии складывается из изменений компонентов, т.е.

$$\Delta V = \Delta V_B + \Delta V_T + \Delta V_G \quad (3)$$

В большом диапазоне нагрузок сжатие воды, и тем более минеральных частиц, можно считать линейно зависящим от давления и представить в виде [1]

$$\Delta V_B = \frac{\rho}{E_B} \cdot V_B \cdot p, \quad \Delta V_T = \frac{\rho}{E_T} \cdot V_T \cdot p, \quad (4)$$

где V_B и V_T — объемы воды и твердых минеральных частиц; E_B и E_T — модули объемной сжимаемости воды и твердых частиц; p — дополнительное избыточное давление в воде, окружающей твердые частицы.

Учитывая, что температура водонасыщенного грунта практически не меняется, сжимаемость газа можно рассматривать в предположении изотермического процесса. Растворимостью газа в воде за короткий период действия взрывной волны можно пренебречь. В этих условиях изменение объема газа будет равно:

$$\Delta V_G = \frac{\rho}{p_1 + p} \cdot V_G, \quad (5)$$

где V_G — объем защемленного газа; p_1 — первоначальное давление в поровой воде, включая атмосферное.

Подставив (4) и (5) в уравнение (3) и перейдя к объемной деформации, получим:

$$\varepsilon_3 = \beta_B \cdot m_B \cdot p + \beta_T \cdot m_T \cdot p + m_G \cdot p / (p_1 + p). \quad (6)$$

Из условия неразрывности при отсутствии оттока воды суммарная объемная деформация компонент должна быть равна объемной деформации скелета грунта, т.е. $\varepsilon_3 = \varepsilon_{ск}$. В свою очередь объемная деформация скелета за счет изменения объема пор равна

$$\varepsilon_{ск} = e_1 - e(\sigma) / (1 + e_1), \quad (7)$$

где e_1 — начальный коэффициент пористости; $e(\sigma)$ — коэффициент пористости при сжимающих напряжениях σ в скелете грунта.

Учитывая, что часть нагрузки q передается на поровую воду p , а часть — на скелет грунта σ , из условия равновесия имеем:

$$q = \sigma + p. \quad (8)$$

Решив совместно систему уравнений (6)–(8), получим уравнение сжатия элемента грунта в условиях закрытой системы:

$$e_1 = e(\sigma) / (1 + e_1) = (\beta_B \cdot m_B + \beta_T \cdot m_T)(q - \sigma) - m_G(q - \sigma) / (p_1 + q - \sigma). \quad (9)$$

Уравнение (9) получено в предположении мгновенной деформируемости всех компонент и самого скелета грунта. Не учитываются их вязкие свойства, влияние которых, особенно вязкости скелета грунта, в условиях быстротекущих взрывных процессов может быть весьма существенно.

Решение уравнения (9) определяется видом принимаемой зависимости e (σ), например, приняв ее в виде спрямленной компрессионной зависимости e (σ) = $-\alpha \sigma + e_1$ или

$$\varepsilon_{CK} = a\sigma / (1 + e_1) = \beta_{CK} \cdot \sigma,$$

уравнению (9) можно придать вид:

$$\sigma^2 (\beta_{T,B} + \beta_{CK}) - \sigma [(p_1 + q)(\beta_{T,B} + \beta_{CK}) \cdot q \cdot \beta_{T,B} - m_\Gamma] + (p_1 q + q^2) \cdot \beta_{T,B} + q \cdot m_\Gamma = 0, \quad (10)$$

где $\beta_{T,B} = \beta_T \cdot m_T + \beta_B \cdot m_B$.

Объемная сжимаемость скелета грунта может быть получена по результатам испытаний сухих грунтов. Сжимаемость грунтов при статическом нагружении, как известно, значительно больше, чем при динамических воздействиях. К сожалению, исследований сжимаемости практически сухих грунтов при взрывных воздействиях выполнено ограниченное количество.

Для практических расчетов зон разрушения структуры грунта, т.е. в пределах относительно малых давлений, графики $\sigma(\dot{\varepsilon})$ можно аппроксимировать зависимостью в виде

$$\varepsilon_{CK} = a\sigma / (\sigma + b). \quad (11)$$

Коэффициенты a и b будут иметь следующие значения: мелкозернистый песок — $a = 0,048$, $b = 2,2$ МПа; гравийно-песчаная смесь — $a = 0,005$, $b = 0$; супесь и суглинок твердые — $a = -0,02$, $b = -8$ МПа; супесь нарушенной структуры и лессовидный суглинок — $a = 0,14$, $b = 6$ МПа.

Тогда зависимость (10) с учетом (11) приобретает вид

$$a\sigma / (\sigma + b) = (q - \sigma)(\beta_{T,B} - m_\Gamma) / (p_1 + q - \sigma). \quad (12)$$

Анализ уравнений (10) или (12) показывает, что в зависимости от величины сжимаемости компонент β_T , β_B и скелета грунта β_{CK} возможно различное распределение давлений между скелетом грунта σ и поровой водой p . Объемная сжимаемость минеральных частиц на порядок меньше сжимаемости воды, и поэтому роль их сжимаемости в распределении нагрузок между скелетом грунта и поровой водой незначительна и в большинстве случаев может не учитываться.

В водонасыщенных грунтах существенная передача взрывной нагрузки на скелет возможна в весьма малосжимаемых грунтах, т.е. при малой величине коэффициента β_{CK} . Так, например, в полностью водонасыщенном плотном песке с пористостью $m = 0,4$, $m_T = 0,6$, $e_1 = 0,67$, $\beta_{CK} = 10^{-2}$ МПа⁻¹ учет объемной сжимаемости воды (10^{-3} МПа⁻¹) и минеральных частиц (10^{-4} МПа⁻¹) по зависимости (12) приводит к передаче нагрузки на скелет грунта $\sigma = 0,044 \cdot q$, а остальная, большая часть нагрузки q воспринимается поровой водой.

С увеличением содержания газообразной составляющей сжимаемость поровой воды с газом увеличивается до 2×10^{-3} МПа⁻¹ и сжимаемость водонасыщенного грунта все в большей мере начинает определяться объемной сжимаемостью скелета грунта. В свою очередь это приводит к увеличению напряжений, передаваемых на скелет грунта $\sigma = 0,18 \cdot q$, и соответствующему уменьшению давлений, воспринимаемых поровой водой.

Задача определения границы зоны разрушения структуры и уплотнения грунта при взрывных воздействиях сводится к совместному рассмотрению условия разрушения структуры и напряженного состояния грунта при взрыве. Учитывая изложенное, можно предложить приближенный, полуэмпирический метод определения контура зоны разрушения структуры и уплотнения грунтов при взрывах. В качестве условия разрушения структуры принимается зависимость (2), а напряжения в скелете грунта определяются по уравнениям (9), (11) или, в простейших случаях, по зависимости (10), где всестороннее давление q принимается равным максимальному давлению на фронте ударной волны p_{\max} .

Для определения p_{\max} можно воспользоваться эмпирической формулой, полученной при обработке данных в работе [2]. Тогда определение границы зоны разрушения структуры грунта сводится к решению системы уравнений:

$$a\sigma / (\sigma + b) = (p_{\max} - \sigma) [(\beta_T \cdot m_T + \beta_B \cdot m_B) - m_\Gamma / (p_1 + \gamma \cdot z + p_{\max} - \sigma)], \quad (13)$$

$$\sigma = \Delta_K \cdot \gamma_{zp} \cdot z, \quad (14)$$

$$x = \left[R^2 + (h - z)^2 \right]^{1/2}, \quad (15)$$

$$p_{\max} = \Delta P \cdot (R_0)^{-\mu\sigma}, \quad (16)$$

где ΔP — максимальное избыточное давление в объеме при взрывном горении газозвоздушной смеси, $R_0 = R/r_{СКВ}$ — безразмерное расстояние.

Задавшись R , по зависимости (16) определяем p_{\max} , а затем по известной Δ_k из уравнения (14) находим z , а из уравнения (15) — величину x , т.е. координаты зоны разрушения структуры в радиусе R . Последовательно увеличивая R , можно построить график зоны разрушения структуры.

Величину Δ_k приходится определять экспериментально, путем взрыва в шурфе и замера глубинными реперами пористости, максимальной глубины разрушения структуры и уплотнения z_{\max} .

Выводы

1. Проведенные исследования позволили разработать аналитическую зависимость динамического деформирования дисперсных грунтов, которая учитывает основные свойства и поведение грунтов при различных режимах нагружения.

2. Разработан полуэмпирический метод определения зон разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях: в зависимости от величины сжимаемости компонентов грунта возможно различное распределение напряжений между скелетом грунта и поровой водой.

References

1. *Ivanov P.L.* The compression of bad connected grounds by explosions. — М.: Depths, 1983. — 230 p.
2. *Lyakhov G.M.* Bases of a explosion dynamics in grounds and liquid environments. — М.: Science, 1984. — 216 p.

УДК 622.673.1

Повышение прочности конструкций горных машин, находящихся в длительной эксплуатации

The strength increasing of constructions of mining machines that are in long term operation

Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кшалова А.А., Алимов М.Ш.

Карагандинский государственный технический университет (E-mail: barton.kz@mail.ru)

Шаршаған қирату қауіпті аймақтарда апатты жағдайда негізгі есеп тежегіш құрылғысын күшейту бойынша ұсыныстарды өңдеу болып табылады. Оған ANSYS бағдарламасын қолдану арқылы қол жеткізуге болады және де бұл ұзақ мерзім бойы ШПМ пайдалану, сондай-ақ қойылған есептің шешімі беріктік және сенімділіктің көрсеткіштерін сақтауға мүмкіндік береді. Тежегіш құрылғы сұлбасында негізгі даму процестері үлгіленген. Конструкциядағы жарықшақтардың ұлғаюының сипаты Fatigue Module ANSYS бағдарламасында жасалған. Конструкцияларды күшейту әдісін, ары қарай оның қирауына жол бермейтін әдісті, қарастырып шықтық.

The main aim is development of recommendations for strengthening the brake construction in accident dangerous areas of fatigue destruction. This allows to keep the HBM strength and reliability parameters during the exploitation period. Solving of the set problem is provided by using the ANSYS program's abilities. The main processes of fatigue cracks development in the «critical points» of the braking system construction are modeled. The «accident dangerous» areas of fatigue destructions and the character of cracks development in the construction are detected with a help of the ANSYS Fatigue Module. The construction strengthening method, which eliminates the possibility of the further destruction, is considered.

Обеспечение надежности работы тормозного устройства (ТУ) шахтной подъемной машины (ШПМ) требует научного поиска рационального варианта конструкции, способной длительное время противостоять усталостному разрушению и сохранять свою работоспособность на протяжении дли-

тельного срока эксплуатации. Программа ANSYS позволяет моделирование напряженно-деформированного состояния элементов ТУ и замену громоздких натуральных испытаний экспериментальных образцов. Путем моделирования удастся найти оптимальный вариант усиленной конструкции с более высокими параметрами прочности и надежности, а также разработать практические рекомендации для восстановления и проведения ремонта ТУ ШПМ. Применение методики выбора рационального вида усиления конструкции в «аварийно-опасных зонах» возникновения усталостных трещин, в зависимости от параметров эксплуатационного нагружения, позволяет продлить срок эксплуатации ТУ. При помощи элементов усиления можно локализовать и остановить рост усталостных трещин в элементах ТУ.

Обеспечение надежности работы ТУ шахтной подъемной машины становится все более актуальным, так как нагрузка резко возрастает в связи с увеличением добычи полезных ископаемых. Увеличение нагрузки напрямую влияет на износ и отказы элементов тормоза. Важным фактором является значительный срок эксплуатации подъемных установок, который составляет в среднем 30...40 лет [1]. В процессе подъема или спуска груза необходимо учитывать резко переменный характер нагрузки на тормозное устройство. Значительные пиковые нагрузки на элементы тормоза возникают при резких остановках органа навивки каната в момент аварийных ситуаций. Немаловажное значение имеет количество циклов работы тормоза в течение суток, которое составляет от 500 до 1500 «спусков и подъемов» [1]. Эти факторы способствуют развитию в элементах тормозного устройства усталостных трещин, которые в процессе эксплуатации могут привести к разрушению конструкции. Прогнозировать образование и развитие таких повреждений сложно, единственным наиболее доступным и надежным методом является дефектоскопия. По данным, приведенным в [2], усталостные трещины образуются в месте проушин, где крепятся втулки тормозных тяг. После выявления повреждений в элементах тормозной балки необходимо произвести ее ремонт или замену. Замена балки сопряжена со значительными экономическими и трудовыми затратами, так как требует разборки коренных частей подъемной машины, а также вызывает её простой. Ремонт сводится к разделке и завариванию трещины электродуговой сваркой. Такой способ не обеспечивает надежной работы конструкции, так как в процессе эксплуатации возможно продолжение развития трещин.

Учитывая эти обстоятельства, необходимо повысить прочность тормозной балки путем усиления ее конструкции в «слабых местах», где присутствуют концентраторы напряжений и со временем образуются усталостные трещины. Усиление ТУ ШПМ позволяет существенно повысить их долговечность.

Известно, что детали тормозного устройства надежно выполняют свои функции лишь в начальный период эксплуатации [1]. Часто они разрушаются по усталостным причинам, связанным с воздействием повторяющихся циклических нагрузок. Концентраторы напряжений уменьшают долговечность при циклических нагрузках и образуют «слабые места» в конструкции ТУ. Уменьшение усталостной прочности в конструкции балки отмечено в зонах 1 и 2, а также в зонах сварных швов верхней и боковых граней (рис. 1), что связано с изменением околошовной зоны и концентрацией напряжений.

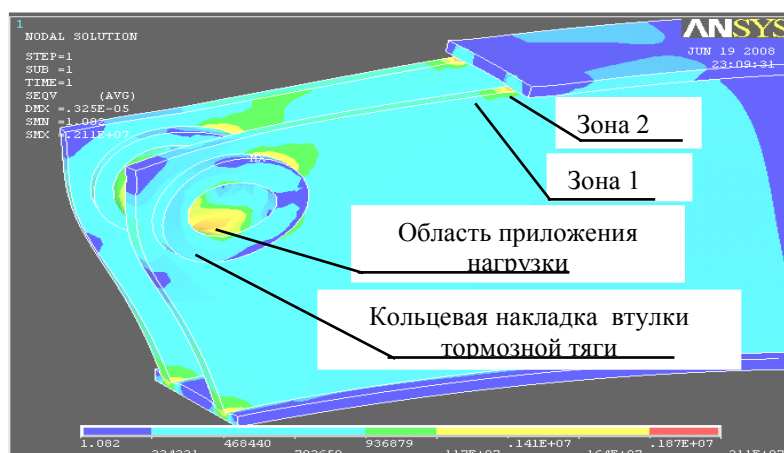


Рис. 1. Графическое отображение модели типовой конструкции тормозной балки с «аварийно-опасными зонами» усталостного разрушения 1 и 2

Анализ усталостного разрушения металла тормозной балки с учетом фактора циклической нагрузки показал, что основными факторами развития усталостных трещин являются: амплитуда напряжений и деформации; длительность и количество циклов. В процессе развития разрушения наблюдается переход от скрытой (тонкой) к наружной (широкой) трещине. Это объясняется усталостью металла, сопровождающейся накоплением повреждений в области границ зерен металла от цикла к циклу. Характер развития трещин в конструкции смоделирован с использованием программы ANSYS и приведен на рисунке 2.

Задача повышения прочности и обеспечения надежности работы тормозной балки ШПМ сводится к выбору способа усиления конструкции, исключающего возможность дальнейшего усталостного разрушения, связанного с многократными циклами приложения нагрузок к элементам тормоза в процессе его эксплуатации.

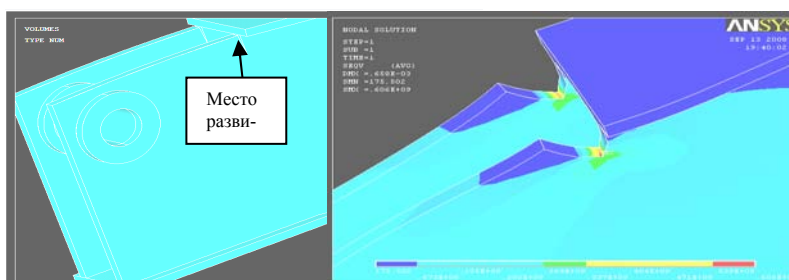


Рис. 2. Графическое отображение развития усталостной трещины в «аварийно-опасной зоне» 1

Накладными элементами усиления могут быть дисковая накладка, ребро, кольцевая накладка или их комбинированные варианты, которые отличаются большей эффективностью, связанной с локализацией «аварийно-опасных зон» и противодействием росту усталостных трещин. Технология изготовления и монтажа накладных элементов отличается простотой и не требует применения сложного сварочного и монтажного оборудования. На рисунке 3 приведены варианты элементов для усиления конструкции ТУ — «накладка» и «ребро», которые способны влиять на характер развития трещин, существенно уменьшать концентрацию напряжений и повысить долговечность конструкции. Возможности программы ANSYS позволяют моделировать нагрузки на элементы балки, связанные с асимметрией цикла.

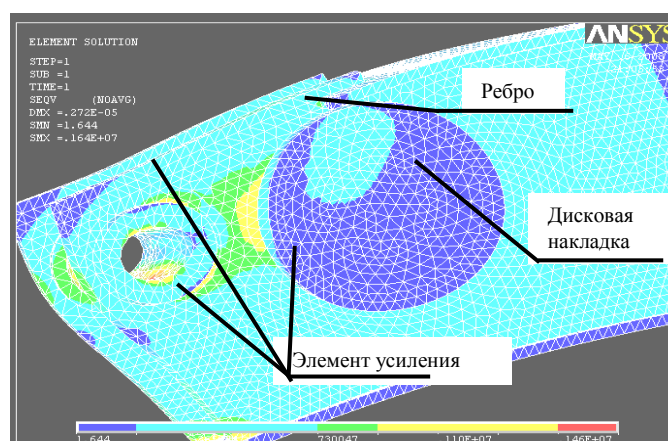


Рис. 3. Конструкция балки с элементами усиления

Повышение коэффициента асимметрии в сторону положительных значений вызывает снижение закрытия трещины и увеличение скорости роста усталостной трещины. По мере снижения размаха коэффициента интенсивности напряжений и скорости роста усталостной трещины чувствительность закрытия к асимметрии цикла напряжений усиливается до максимального уровня на пороге усталости. Уровень закрытия трещины определяется рядом факторов, которые условно делятся на две группы — эксплуатационные и структурные. К первой относятся параметры цикла напряжений (размах, асимметрия, частота), окружающая среда (ее химическая активность, влажность, температура), а

также характер напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в образце или элементе конструкции, который определяется их геометрией и размерами. Основные структурные факторы (вторая группа) обусловлены химическим составом материала и его микроструктурным состоянием. Закрытие трещины зависит от уровня размаха коэффициента интенсивности напряжения. Решение задачи по повышению прочности и обеспечению надежности работы тормозной балки сводится к определению «опасных мест» в конструкции и принятию мер по снижению значений напряжений и деформации. Это можно реализовать, используя метод компьютерного моделирования развития трещин в конструкции при помощи ANSYS Fatigue Module [3]. Результаты исследований по установлению зависимости снижения запаса прочности конструкции от длины растущей в ней трещины и зависимости снижения значений допустимых напряжений, приводящих к разрушению конструкции, от длины растущей в ней трещины приведены на рисунках 4, 5.

Выполненные исследования доказали возможность распределять напряжения и деформации у вершины трещины, а также значительно снижать влияние концентраторов напряжений при помощи усиления конструкции. Основой расчетов усталостной долговечности (выносливости) является определение способности материала конструкции сопротивляться многоциклового усталости, которая приводит к разрушению и уменьшению срока эксплуатации тормозного устройства. Расчет выносливости выполняется при помощи трех методов: расчета деформаций, расчета напряжений и механики разрушения. Все эти методы доступны в модуле расчета долговечности и смоделированы в ANSYS.

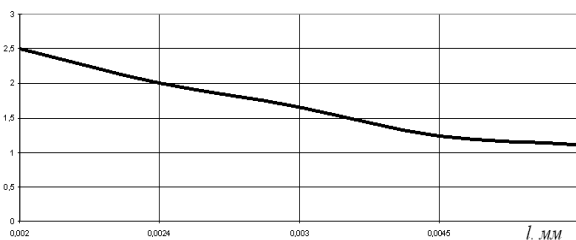


Рис. 4. Зависимость снижения запаса прочности конструкции от длины растущей в ней трещины

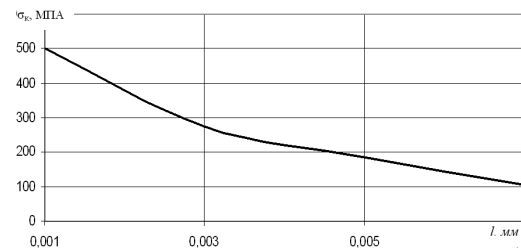


Рис. 5. Зависимость снижения значений допустимых напряжений, приводящих к разрушению конструкции, от длины растущей в ней трещины

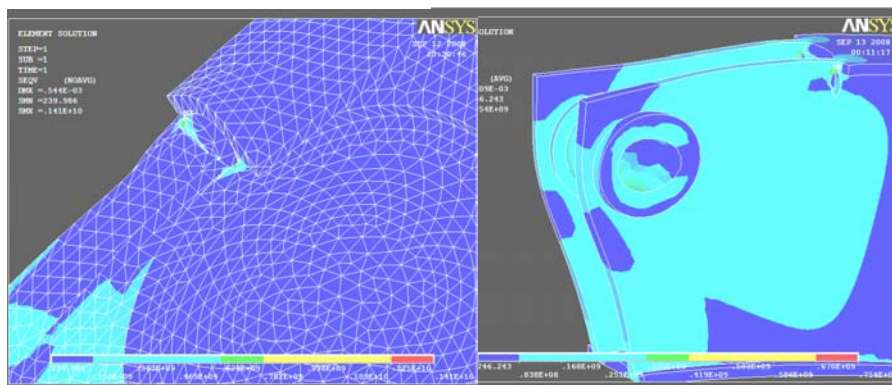


Рис. 6. Графическое отображение локализации развития трещин в конструкции при помощи усилений ТУ ШПМ

Практика эксплуатации тормозных устройств показала, что чрезмерное увеличение зазоров вследствие износа деталей шарнира приводит к нарушению кинематической точности, заклиниванию рычажно-шарнирного механизма, недопустимому перераспределению нагрузки между элементами тормозного устройства и является причиной образования усталостных трещин в проушинах крепления втулок тормозной балки и разрыва тормозных тяг.

Усиление конструкции тормозной балки позволяет предотвратить образование усталостных трещин в области проушин крепления втулок. Одновременно эти усиления позволят уменьшить нагрузку на контактные поверхности втулок тормозной тяги, тем самым снизить вероятность их преждевременного износа и повреждения (рис. 6). Используя в дальнейшем научные результаты проведенного исследования, можно решить ряд немаловажных прикладных задач по повышению прочно-

сти конструкции и надежности работы тормозных устройств шахтных подъемных установок. Для практической реализации методов восстановления прочности конструкции необходимо выявить трещины на ранней стадии развития — для этого используется ультразвуковая дефектоскопия.

Усталостные трещины, как показывает практика, образуются прежде всего на концах балки в области проушин, где расположены втулки. При проведении дефектоскопии использовался прибор марки SONYС. Полученные при перемещении ультразвукового датчика (см. рис. 7) диаграммы позволяют установить параметры образовавшихся трещин на поверхности боковой грани конструкции. Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 8. Контроль осуществляется искателем на частоте 2,5 МГц прямым пучком.

При перемещении искателя на экране дефектоскопа наблюдается частокол импульсов, являющихся результатом отражения ультразвуковых колебаний. Резкое уменьшение амплитуды импульсов ультразвуковых колебаний является признаком наличия усталостной трещины. Для уточнения характера дефекта рекомендуется искатель установить на диаметрально противоположную сторону. С целью улучшения разрешающей способности дефектоскопа необходимо проводить контроль послойно, с использованием задержки и временной регулировки коэффициента усиления.

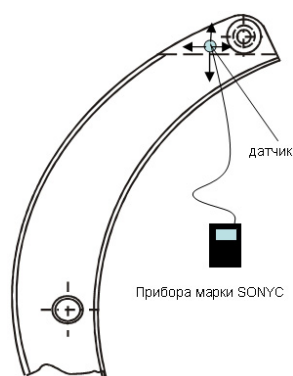


Рис. 7. Схема перемещения ультразвукового датчика

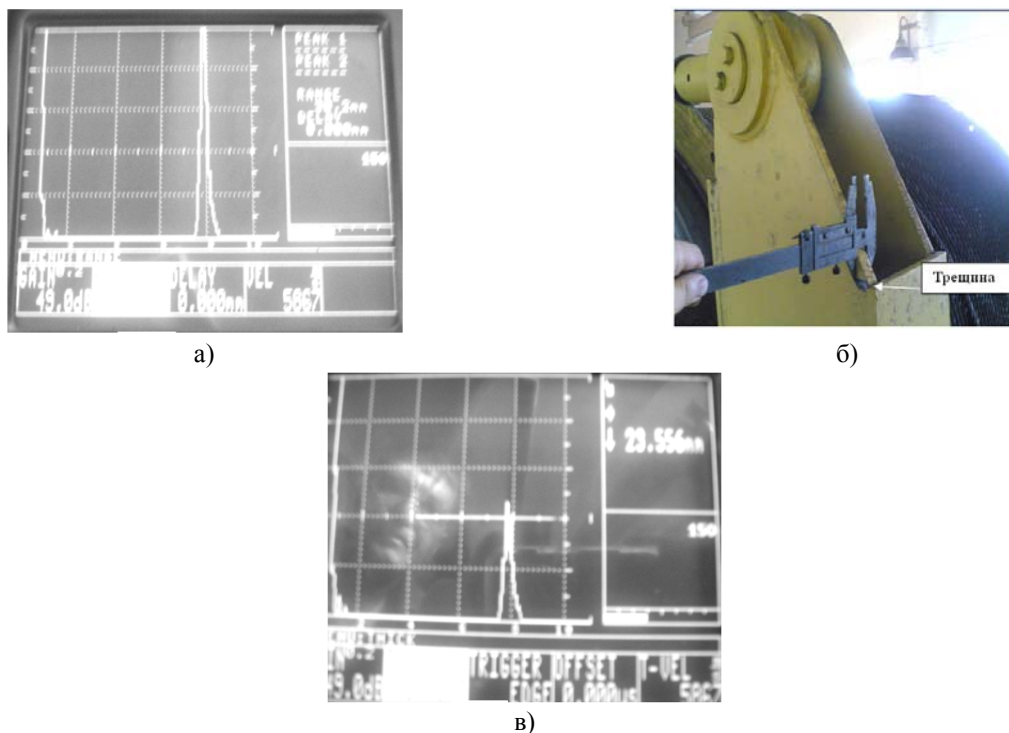


Рис. 8. Полученные результаты дефектоскопии тормозной балки: а) отсутствие усталостной трещины; б) место образования усталостной трещины; в) наличие усталостной трещины

Результаты компьютерного моделирования и натурных измерений напряженно-деформированного состояния конструкции тормозной балки приведены в таблице и на рисунке 9. Измерения производились на типовой конструкции тормозной балки шахтной подъемной машины НКМЗ 2Ц-4х2,3 с использованием прибора ИКН-1М при практическом применении дисковых накладок при ремонте.

Т а б л и ц а

Результаты экспериментального компьютерного моделирования и практических расчетов НДС балки тормозного устройства

Диаметр накладки, м	Давление Q , МПа	Скругление грани	Зона 1 $\sigma_{\max 1}$, МПа	Зона 2 $\sigma_{\max 2}$, МПа	σ_{\max} , МПа
Результаты исследования имитационной модели с толщиной стенки 20 мм, без усиления (кривая 1)					
–	10	Нет	19,4	29,2	43,7
–	1	Нет	1,94	2,92	4,37
–	0,1	Нет	0,194	0,292	0,437
–	0,01	Нет	0,0194	0,0292	0,0437
Результаты, полученные опытным путем нагружении конструкции с толщиной стенки 20 мм, без усиления (кривая 2)					
–	10	Нет	13,5	22	39,6
–	1	Нет	1,3	2,2	3,7
–	0,1	Нет	0,12	0,22	0,37
–	0,01	Нет	0,011	0,021	0,036
Результаты исследования имитационной модели с толщиной стенки 20 мм, с усилением (кривая 3)					
0,5	10	Нет	16,2	24,2	36,4
0,5	1	Нет	1,62	2,42	3,64
0,5	0,1	Нет	0,162	0,242	0,364
0,5	0,01	Нет	0,0162	0,0242	0,0364
Результаты, полученные опытным путем нагружении конструкции с толщиной стенки 20 мм, с усилением (кривая 4)					
0,5	10	Нет	14,52	23,4	30,4
0,5	1	Нет	1,4	2,42	3,05
0,5	0,1	Нет	0,142	0,232	0,28
0,5	0,01	Нет	0,014	0,0238	0,027

Проведенной проверкой элементов тормозной системы методами неразрушающего контроля на шахтах Караганды и Экибастуза установлены важные факторы образования дефектов в работе тормозной системы ШПУ. Выявленные дефекты по элементам тормозной системы распределены в процентах следующим образом:

- трещины в проушинах тормозных балок 17,6;
- износ шарнирных соединений тормозных балок 40;
- вертикальные и горизонтальные тормозные тяги 12,5;
- тормозной обод 12,1;
- шпильки подвески грузов 8,1;
- тяги вертикальных траверс и шпильки поршней 5,5;
- прочие 4,2.

При значительном сроке эксплуатации подъемной установки и перегрузках в отдельных элементах конструкции тормозных устройств возникают повреждения, связанные с временной усталостью металла, что приводит к появлению трещин. В частности, трещины и разрушения появляются в конструкции тормозной балки.

В результате обследования и диагностики прибором марки SONYC установлено, что более 61 % поврежденных элементов тормозного устройства подъемных машин, находящихся в эксплуатации на шахтах Караганды и Экибастуза, имеют повреждения, связанные с развитием усталостных трещин. На практике причинами возникновения трещин являются: нарушение технологии изготовления, нарушения технологии монтажа и правил эксплуатации, перегрузки, длительная эксплуатация в течение 20–30 лет. Полученные данные доказывают снижение прочности и надежности конструкции балки тормозного устройства, имеющего трещины, что делает невозможным ее эксплуатацию. Для решения этой задачи необходимо усилить «слабые места» конструкции тормозной балки, что позволит предотвратить образование и рост трещин.

Сущность заявленного технического решения заключается в возможности восстановления после ремонта и усиления конструкции тормозной балки шахтной подъемной машины. Дисковые накладки закрепляются непосредственно на месте трещины при помощи сварки, симметрично относительно друг друга, что позволит усилить конструкцию и препятствует образованию и росту трещин, которые вызывают ее разрушение.

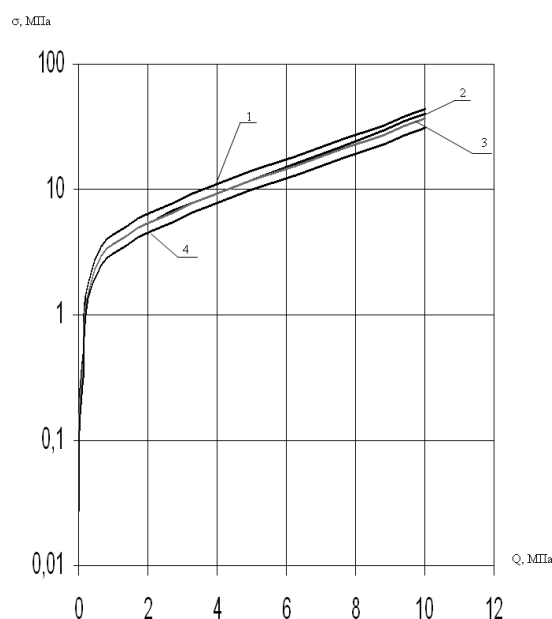


Рис. 9. Результаты измерений прибором ИКН–1М напряженно-деформированного состояния конструкции тормозной балки и исследований имитационной модели: 1) результаты исследования имитационной модели 1 с толщиной стенки 20 мм, без усиления; 2) результаты, полученные опытным путем нагружения конструкции с толщиной стенки 20 мм, без усиления; 3) результаты исследования имитационной модели с толщиной стенки 20 мм, с усилением; 4) результаты, полученные опытным путем нагружения конструкции с толщиной стенки 20 мм, с усилением

Компьютерное моделирование в среде ANSYS Fatigue Module позволило установить геометрические параметры накладных элементов усиления и рациональные координаты их расположения на боковых гранях конструкции балки. Результаты исследований положены в основу методики обеспечения надежности горных машин, находящихся в длительной эксплуатации. Методика прошла практическую апробацию при проведении ремонта на действующих шахтных подъемных машинах шахт Караганды и Экибастуза (рис. 10).

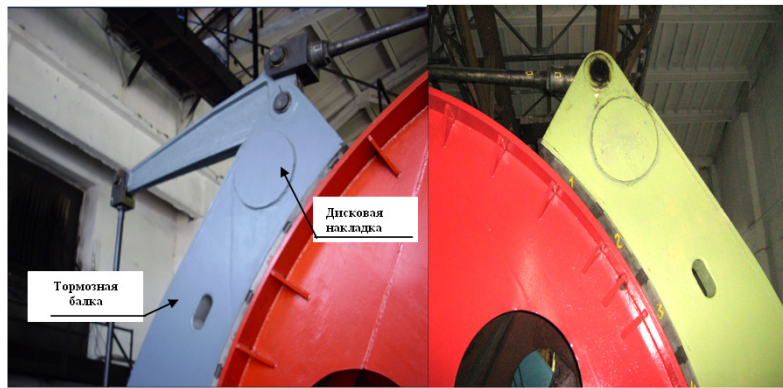


Рис. 10. Практическое применение дисковых накладок при ремонте тормозной балки шахтной подъемной машины НКМЗ

Выводы

У вершины образовавшейся трещины при нагружении возникает значительная концентрация напряжений и деформаций, происходит перераспределение последних, что вызывает развитие трещины. Поэтому для получения количественных характеристик способности материала конструкции тормозной балки сопротивляться разрушению при наличии трещины необходимо снижать значения напряжений и деформаций у вершины трещины. Элементы усиления позволяют: исключить образование и рост усталостных трещин в области проушин крепления втулок; обеспечить необходимую прочность и надежность; увеличить срок эксплуатации тормозного устройства; существенно ослабить влияние концентраторов напряжений; снизить значения напряжений и деформаций в конструкции. Установка дисковой накладки позволяет ликвидировать очаг возникновения усталостных трещин, а ребро и кольцевая накладка втулки работают на увеличение прочности конструкции балки и исключают возможность дальнейшего разрушения конструкции ТУ, связанного с многократными циклами приложения нагрузок в процессе его эксплуатации.

References

1. Mekhtiyev A.D., Likhachev V.V., Bulatbayev F.N. Methodology of improving the lifting machine's brake beam's work reliability // University proceedings. Iss.3. — Karaganda: KarSTU Publ., 2008. — P. 72–74.
2. Zhautikov B.A., Mekhtiyev A.D., Likhachev V.V. The method for mine lifting facility's brake beam cracks increase preventing. Innovational patent of The Republic of Kazakhstan, published 15.04.09, № 21109.
3. Basov K.A. ANSYS in examples and problems. — M.: Computerpress, 2002. — 342 p.

УДК 537.533.7, 531.611

Аналогия между движением заряженных частиц в электростатическом поле и движением тела, брошенного под углом к горизонту

The analogy between the movement of charged particles in an electrostatic field and the movement of a body thrown at an angle to the horizon

Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Тусупбекова А.К.

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: saulebekov@mail.ru)

Мақалада электростатикалық өрістегі зарядталған бөлшектер қозғалысы мен көкжиекке бұрышпен лақтырылған дененің қозғалысы салғастырыла зерттелген. Бұл әдіс оқушыларға материалдар құрамын спектрлік талдауында қолданылатын спектрометрлер мен спектрографтардың жұмыс істеу принципін терең түсінуге мүмкіндік береді. Екі жағдайда да кинетикалық энергия симметрия осіндегі траектория проекциясынан функция түрінде алынған. Көкжиекке бұрышпен лақтырылған дене жағдайы спектрограф режиміне ұқсас екендігі көрсетілген. Зарядталған бөлшектердің талдауы кезінде жеткілікті дабыл тіркелу үшін таралатын ағындар өткізіліп, кейін тоғысталатындығында айырмашылық байқалған.

An analogy between the movement of charged particles in an electrostatic field and the movement of a body thrown at an angle to the horizon was shown. This analogy gives ability to students to more deeply understand the principle of work of spectrometers and spectrographs that used for spectral analysis of composition of materials. The kinetic energy in both cases was obtained as a function of the projection of the trajectory on the symmetry axis. There are shown that case of a body thrown at an angle to the horizon, is similar to the spectrograph. The difference lies in the fact that the analysis of charged particles is passed divergent streams, which are then focused for to get a sufficient signal for recording.

Совершенствование технологий обработки поверхности конструкционных материалов и создание новых микросхем немислимы без контроля компонентного и послойного состава образцов. Измерение энергетических распределений электронов и ионов, рассеянных исследуемым материалом, дает возможность ответить на вопросы о химическом составе и профиле концентраций в приповерхностных слоях. Термин «спектроскопия» в школьном учебнике физики относится только к оптическим явлениям. Спектром называют распределение испускаемой в единицу времени с единицы поверхности световой энергии по частотам ν или длинам волн. Важной деталью спектрометра является энергоанализатор — устройство, позволяющее определять плотность тока ионов (или электронов) с энергиями в выбранном интервале от E до $E + \Delta E$. Энергоанализатор позволяет установить, как заряженные частицы в потоке распределены по энергиям. Аналогом энергоанализатора в оптике является, например, призма, разлагающая падающий на нее свет в спектр, что и позволяет исследовать распределение светового потока по длинам волн [1].

В работе [2] проведена оптико-механическая аналогия в изложении для школьников. Оптико-механическая аналогия — это сходство траектории движения частицы в потенциальном силовом поле с траекторией лучей в оптически неоднородной среде. Траектория материальной точки и траектория светового луча совпадают при определенном соответствии потенциальной энергии и переменного в пространстве показателя преломления среды.

Рассмотрим экспериментальную схему спектрометра, представленную на рисунке 1. Данная схема включает источник заряженных частиц — электронную пушку (ЭП) и некоторый датчик-

приемник (Д-П), регистрирующий приход частиц в определенную точку пространства (при рассматриваемом одномерном случае — в точку x_1) в зависимости от отрицательного потенциала ϕ_1 , который подан на отражающий металлический экран (Э). Причем потенциалы ϕ_2 и ϕ_3 равны по абсолютной величине. После вылета из пушки под некоторым углом α к горизонту с начальной скоростью \vec{V} электроны продолжают движение в электростатическом поле отражающего экрана, которое отклоняет их вниз, после чего они либо попадают на рабочую поверхность датчика-приемника и фиксируются им, либо проходят мимо него. Первый случай говорит о наличии у электронов некоторой расчетной скорости, а значит, и кинетической энергии; второй — об обратном. Это дает возможность классифицировать частицы по энергиям. При неизменном угле вылета электронов из пушки их энергию можно будет определять, зная только расстояние от точки вылета из пушки до датчика-приемника x_1 и потенциал экрана ϕ_1 , чье поле отклоняет пучок частиц от первоначального направления движения. Следовательно, при постоянном потенциале отражающего экрана ϕ_1 измерения сведутся к нахождению только x_1 .

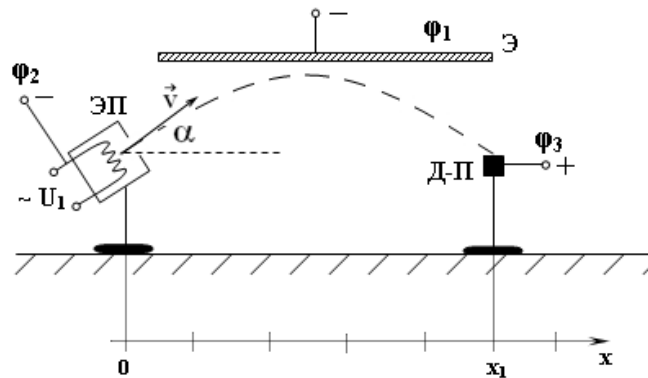


Рис. 1. Экспериментальная схема спектрометра

Для того чтобы процесс был более понятен, предлагается механическая аналогия с движением тела, начальная скорость которого направлена под углом к горизонту. Оба поля, и электростатическое и поле Земли, являются потенциальными и с математической точки зрения описываются аналогично. В данной аналогии поле тяготения Земли будет действовать аналогично электростатическому полю отражающего экрана, потенциал которого постоянен (ускорение свободного падения $g=9,8 \text{ м/с}^2$). Будет меняться только абсолютная величина скорости, что позволит говорить об обладании бросаемым телом различной кинетической энергией от опыта к опыту. Как и в первом случае, с частицами при различных кинетических энергиях тело пролетит по горизонтали различные расстояния. Таким образом, можно будет без труда определять величину кинетической энергии, необходимую для преодоления требуемого расстояния при неизменном угле бросания тела.

Перейдем к рассмотрению механической аналогии. Движение тела, брошенного под углом к горизонту, описывается формулами

$$y = h = h_{0y} + V_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}, \quad V_y = V_{0y} + g_y t. \quad (1)$$

Так как $V_{0x} = V_0 \cos \alpha$, $V_{0y} = V_0 \sin \alpha$ и $g_y = -g$, то

$$x = V_0 t \cos \alpha; \quad y = V_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

а) В конце полета тела координата $y=0$. Время t полета найдем по формуле для y :

$$V_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} = 0.$$

Решая это квадратное уравнение относительно t , найдем:

$$t_1 = 0; \quad t_2 = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}.$$

Значение t_1 соответствует началу полета (в этот момент y тоже равен нулю), а t_2 — это искомое время полета.

$$t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}. \quad (3)$$

б) Время движения до высшей точки траектории вдвое меньше всего времени движения, т.е. $\tau = \frac{V_0 \sin \alpha}{g}$. Максимальная высота подъема h_{\max} — это значение координаты y , которое получится, если в выражение для координаты y вместо t подставить найденное значение времени подъема:

$$h_{\max} = V_0 \sin \alpha \frac{V_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{V_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (4)$$

в) Дальность полета $L(x_1)$ — это максимальное значение координаты x . Его мы получим, если в формулу для координаты x подставим вместо t время полета: $t = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}$.

$$L = x_1 = x_{\max} = V_0 t \cos \alpha, \quad (5)$$

или

$$L = V_0 \cos \alpha \frac{2V_0 \sin \alpha}{g} = \frac{2V_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}, \quad L = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}. \quad (6)$$

Отсюда видно, что дальность L будет наибольшей, если $\sin 2\alpha = 1$. Это значит, что $2\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$. При неизменном угле бросания (как в первом случае), но с разными начальными скоростями и, значит, кинетическими энергиями получается результат, представленный на рисунке 2.

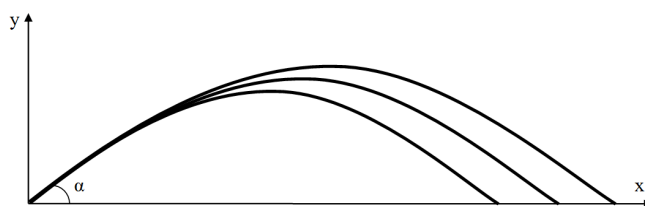


Рис. 2. Движение тел, брошенных с разными начальными энергиями при неизменном угле

От измерения расстояния полета по горизонтали перейдем к определению энергии. Помножим обе части выражения $L = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}$ на $\frac{m}{2}$ и получим

$$\frac{mL}{2} = \frac{mV_0^2 \sin 2\alpha}{2g}.$$

Известно, что кинетическая энергия

$$\frac{mV_0^2}{2} = E_k,$$

тогда

$$\frac{mL}{2} = E_k \frac{\sin 2\alpha}{g},$$

откуда

$$E_k = \frac{mgL}{2 \sin 2\alpha}.$$

Однако при изложенных выше условиях

$$\frac{mg}{2 \sin 2\alpha} = const,$$

значит, имеем

$$E_k = \text{const} \cdot L.$$

Для самого распространенного в электронной спектроскопии цилиндрического электростатического зеркального анализатора пучков заряженных частиц зависимость кинетической энергии частиц от проекции траектории на ось симметрии определяется следующим образом:

$$L = 2ctg\alpha(1 + 2p\theta).$$

Согласно [3] $p = \sqrt{\frac{E_k}{qU} \ln \frac{r_1}{r_0}} \sin \alpha$ — параметр отражения цилиндрического зеркала, где E_k — кинетическая энергия заряженных частиц; q — заряд частиц; U — отклоняющий потенциал; r_1 и r_0 — радиусы внешнего и внутреннего цилиндрических электродов; $\theta(p) = e^{p^2} \int_0^{p^2} e^{-x^2} dx$.

И в этом случае мы получаем зависимость $E_k = \text{const} f(L)$.

Таким образом, при обозначенных выше условиях, зная положение тела (электрона) после его падения, несложно определить кинетическую энергию тела (электрона) в начале движения. И наоборот, зная кинетическую энергию тела (электрона), можно определить, на каком расстоянии оно (он) упадет (будет зафиксирован). Нас интересует первая задача. В спектроскопии потоков заряженных частиц основной и главной задачей является определение энергии частиц. Зная распределение по энергии частиц, можно получать информацию о состоянии и параметрах исследуемого образца.

В случае тела, брошенного под углом к горизонту, все достаточно просто, в отличие от анализа заряженных частиц по энергии. Продолжим построение наших аналогий.

В первом случае можно считать, что поле Земли работает в режиме «спектрографа». Потенциал не меняется, а фиксация объектов осуществляется как бы координатным детектором (рис. 2). Если не менять угол входа в отклоняющее поле и величину отклоняющего потенциала, то фиксировать частицы, приходящие в разные точки, необходимо координатным детектором (рис. 3). Это и есть режим спектрографа. Ожидается, что в связи с резким удешевлением соответствующих систем регистрации — координатно-чувствительных детекторов (например, ПЗС-матриц) — будет осуществлен постепенный переход от спектрометров к спектрографам как приборам, обеспечивающим несравнимо более высокую чувствительность анализа. К тому же в режиме «спектрографа» регистрируется сразу определенный интервал энергий. Например, для упомянутого выше цилиндрического зеркального анализатора (рис. 4) этот интервал составляет 30 %, что существенно повышает экспрессность анализа, а это особенно важно в случае изменений условий эксперимента.

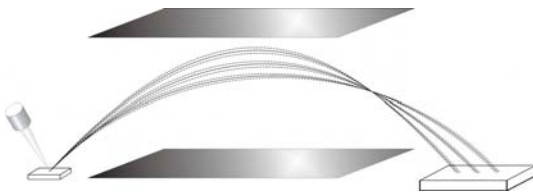


Рис. 3. Траектории заряженных частиц в электростатическом поле

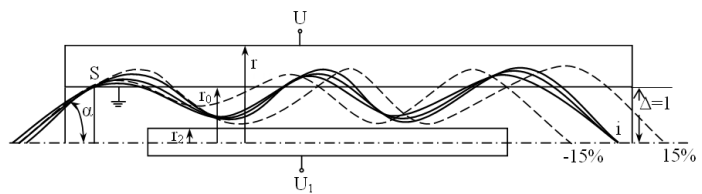


Рис. 4. Схема угловой фокусировки в системе цилиндрических зеркал, работающих в режиме «спектрографа»

На настоящий момент распространенным является режим спектрометра, когда угол остается неизменным, но меняется величина отклоняющего потенциала, и частицы разной энергии последовательно собираются в точку. Таким образом, получается спектр. По оси ординат откладывается интенсивность фокусируемых частиц, а по оси абсцисс — их кинетическая энергия.

Зафиксировать брошенное под углом к горизонту тело (допустим, камень, мячик, спортивную гранату) не составляет труда. Зафиксировать же отдельную элементарную частицу — задача трудно-выполнимая, поэтому специальными диафрагмами вырезается расходящийся пучок заряженных частиц, который затем надо сфокусировать (собрать) в точку (идеальная фокусировка) или пятно небольшого размера (рис. 4). Таким образом, возникает необходимость фокусировки заряженных частиц, что приводит, в свою очередь, к необходимости введения так называемых электронно-оптических параметров (фокусировка первого, второго и т.д. порядков, светосила, разрешение по энергии, дисперсия по энергии и т.д.).

Таким образом, проведена аналогия между движением заряженных частиц в электростатическом поле и движением тела, брошенного под углом к горизонту. Практическое значение данной аналогии связано с использованием ее в электронной оптике, которая занимается формированием и фокусировкой пучков электронов (или ионов) для получения с их помощью изображений и созданием на этой основе новых электронных и ионных устройств.

References

1. *Afanas'ev V.P.* Electron and ion spectroscopy of solids // *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. — 1999. — № 2. — P. 110–116.
2. *Trifonov E.D.* Optical-mechanical analogy in exposition in students // *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. — 1997. — № 10. — P. 133–137.
3. *Zashkvara V.V., Korsunski M.I., Kosmachev O.S.* The focusing properties of electrostatic mirror with a cylindrical field // *Journal of technical physics*. — 1966. — Vol. 36. — № 1. — P. 132–138.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Akashev Z.T.** — Doctor of technical sciences, Professor, Karaganda State Technical University.
- Alimov M.Sh.** — Head teacher, Karaganda State Technical University.
- Baltabekov A.S.** — Elder teacher, Karaganda State University named after E.A.Buketov.
- Belik G.A.** — Elder teacher, Karaganda State Technical University.
- Dyusembaeva A.N.** — Master, Karaganda State University named after E.A.Buketov.
- Eirikh V.I.** — Head teacher, Karaganda State Technical University.
- Esenbaeva G.A.** — Doctor of pedagogical sciences, Head of the department, Karaganda Economic University.
- Jurov V.M.** — Candidate of phys.-math. sciences, Director, Karaganda research centre «Ionic-plasma technologies and modern instrument making», Karaganda State University named after E.A. Buketov.
- Kakenov K.S.** — Candidate of technical sciences, Pro-rector, Karaganda Economic University.
- Kambarova Z.T.** — Master of science, PhD student, Karaganda State University named after E.A.Buketov.
- Kim L.M.** — Doctor of phys.-math. sciences, Professor, Karaganda State University named after E.A.Buketov.
- Kim P.M.** — Elder teacher, Karaganda State Technical University.
- Koketaitegi T.A.** — Doctor of phys.-math. sciences, Professor, Karaganda State University named after E.A.Buketov.
- Kosterenko V.N.** — Head of department of upper-air safety of underground work, Siberian coal energy company, Moscow.
- Krajnov A.Y.** — Doctor of phys.-math. sciences, Associate professor, Professor of the department of mathematical physics of the TSU, National research State University, Tomsk.
- Kshalova A.A.** — Head teacher, Karaganda State Technical University.
- Kusainova A.** — Student, School for gifted children «Daryn».
- Lukashov O.Y.** — Candidate of phys.-math. sciences, The senior scientific researcher, Institute of coal of the Siberian branch of the RAS.
- Mekhtiyev A.D.** — Candidate of technical sciences, Docent, Head of the department, Karaganda State Technical University.
- Paleev D.Y.** — Doctor of phys.-math. sciences, Senior researcher, Leading researcher, Coal institute of the Siberian branch of the RAS, Kemerovo.
- Portnov V.S.** — Doctor of technical sciences, Professor, Chief, Karaganda State Technical University, Educational methodical management.
- Reva M.V.** — Candidate of geologo-mineralogical sciences, Senior lecturer, Kiev National University.
- Salkeeva A.K.** — Candidate of phys.-math. sciences, Elder teacher, Karaganda State Technical University.
- Saulebekov A.O.** — Doctor of phys.-math. sciences, Professor, Kazakhstan Branch of Moscow State University named after M.V.Lomonosov.

Shrager E.R. — Doctor of phys.-math. sciences, Professor, The dean of the phys.-tech. faculty, National Research State University, Tomsk.

Tagaeva B.S. — Candidate of phys.-math. sciences, Elder teacher, Karaganda State University named after E.A.Buketov.

Tansykbaev N.K. — Student PhD, Karaganda State University named after E.A.Buketov.

Tleulesov A.K. — Elder teacher, Pavlodar State University named after S.Toraigirov.

Turgunov M.M. — Engineer of Engineering, Karaganda State University named after E.A.Buketov.

Tussupbekova A.K. — Master of science, PhD student, Karaganda State University named after E.A.Buketov.

Ukrainets V.N. — Doctor of technical sciences, Professor, Pavlodar State University named after S.Toraigirov.

Vasenin I.M. — Doctor of phys.-math. sciences, Professor, Head of the department of applied aeromechanics TSU, National research Tomsk State University.

Vorob'ev A.E. — Doctor of technical sciences, Professor, Russian University of friendship of the people, Moscow.

Vyzhva S.A. — Doctor of geological-mineralogical sciences, Professor, Kiev National University.

Yugai V.V. — Master, Head teacher, Karaganda State Technical University.

Zharekeshev I.Kh. — Candidate of phys.-math. sciences, Leading scientist, Scient. Research Institute of Exper. and Theoret. Phys. Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.

**2011 жылғы «Қарағанды университетінің хабаршысында»
жарияланған мақалалардың көрсеткіші.
«Физика» сериясы**

№ б.

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

<i>Архипов В.В., Гуляев В.С.</i> Келген толқындардың толқындық пакеті.....	1	7
<i>Архипов В.В., Колт М.В., Кудусов А.С.</i> Бернулли сұлбасы және біртекті Дирак теңдеуі.....	2	3
<i>Әлжанова А.Е.</i> Хаос объектінің энтропиялық-метрикалық диаграммасы.....	1	3
<i>Базанов А.В., Падохин В.А.</i> Металл тұзы ерітінділері бетінен жоғары қарқынмен булану үрдісін математикалық баяндау.....	2	8
<i>Бақтыбеков Қ.С., Кутумова Ж.Б.</i> Қатты дене беттерін реттеудегі мультифракталдық талдаудың маңыздылығы.....	3	3
<i>Балтабеков А.С., Көкетайтегі Т.Ә., Ким Л.М., Тагаева Б.С., Дустаева А.Е.</i> KDP кристалындағы радиациямен стимулденген процестерді кванттық-химиялық модельдеу.....	1	10
<i>Диқанбаев К.К.</i> Модификацияланған электролитте алынған кеуек кремнийдің оптоэлектрондық қасиеттерінің кейбір ерекшеліктері.....	2	13
<i>Долгов С., Кернер Т., Луцик А., Шаблонин Е.</i> MgO:Be және MgO:Ca монокристалдарындағы өткізгіштік электрондардың жинақылған кемтіктермен рекомбинациясы.....	1	15
<i>Жантөрина Н.Н., Шүнкеев К.Ш.</i> KBr кристалындағы экситон-фонондық әсерлесуге температура мен деформацияның әсері туралы.....	2	18
<i>Жантөрина Н.Н., Шүнкеев К.Ш.</i> KI және RbI кристалдарындағы торды жан-жақты қысқанда экситондардың тұрақталу кинетикасын модельдеу.....	3	8
<i>Жарекешев И.Х.</i> Металл-изолятор фазалық ауысуын зерттеу үшін Андерсон моделін қолдану.....	4	19
<i>Карстина С.Г.</i> Молекулалық құрылымның тұрақтылығын зерттеу кезіндегі компьютерлік модельдеу әдістерін қолдану.....	2	22
<i>Ким Л.М., Көкетайтегі Т.Ә., Сәлкеева А.Қ., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С.</i> K ₂ SO ₄ -Sm кристалдарындағы ТСЛ шыңдарының табиғаты.....	4	24
<i>Көкетаев А.</i> Кездейсоқ сандар тізбегінің локальді максимумдары арасындағы қашықтықтар ықтималдылығының таралуы.....	2	27
<i>Көкетайтегі Т.Ә., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С., Әлмагамбетова Қ.Н.</i> KDP кристалдарындағы радиациялық процестерге марганец қоспалық иондарының әсер ету ерекшеліктері.....	3	12
<i>Мурашова З.Ф.</i> Органикалық бояғыш қоспасы бар қатты калий сульфатының кристалы еретіндісінің спектралды-люминесценттік сипаттамасы.....	1	20
<i>Рахимова У.А.</i> Динамикалық жүктегендегі шыныққан 110Г13Л үлгілерінің қоспасындағы көлем ұлғаюы.....	1	27
<i>Русакова А.В., Алонцева Д.Л., Прохоренкова Н.В.</i> Бөлшектердің әр алуан түрлерімен сәулелендірілген тоттанбайтын болаттардың құрылымдарының эволюциясы мен қасиеттері.....	1	36
<i>Сәлкеева А.Қ., Көкетайтегі Т.Ә., Ким Л.М., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С.</i> Жерде сирек кездесетін элементтердің иондарымен активтендірілген сілтілі металдар сульфаттарының фотолюминесценциясы.....	2	34
<i>Тәжібаева Г.Б., Калитова А.А., Әбілқалықова Р.Б., Квеглиц Л.И.</i> Динамикалық жүктеменің әсерінен Ni және Cu негізіндегі қорытпаларындағы қаттыфазалық ауысулар.....	3	16
<i>Украинец В.Н., Тілеулесов А.К.</i> Серпінді жартылай кеңістікте екі қабатты қабықшаның ішкі жағынан мерзімдік жүктеменің қозғалысы.....	4	29
<i>Юров В.М.</i> Беттік керілу және люминофорлардың қасиеті.....	2	49
<i>Юров В.М.</i> Трибологиялық жүйелерінің өздік ұйымдасу шарттары.....	3	24
<i>Юров В.М., Вертягина Е.Н., Гученко С.А.</i> Иондық сәулелендірудің композиттік жамылғының құрылымына және қасиеттеріне әсері.....	2	39
<i>Юров В.М., Гученко С.А.</i> Физиканың құрғақ үйкелісінің кейбір сұрақтары.....	1	44

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

<i>Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Ким П.М., Белик Г.А.</i> Тиімді жылу сақтаушысы және энергия сақтайтын радиаторы бар жылуды қамтамасыздандыру жүйесі.....	4	40
<i>Нүсіпбеков Б.Р., Шаймерденова К.М., Рахмалина С.Г.</i> Волластонит кенінің ұсақталуы.....	1	52
<i>Поярков И.В., Мұхамеденқызы В., Ақтолқын Ш.</i> Тетіктік диффузиондық арна.....	3	33

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

<i>Ақашев З.Т., Мехтиев А.Д.</i> Тау машина жасауының алдыңғы дамуындағы құрылымдық сұлба жасалуының оңтайлы алгоритмі.....	4	53
<i>Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н.</i> Көмір шахталарындағы қуыстарды желдетудің құрама сұлбасын математикалық тұрғыдан модельдеу.....	4	60
<i>Воробьев А.Е., Юров В.М., Портнов В.С.</i> Уран кендерінің қалдықтарындағы гидродинамикалық процестер мен ыдырау процестеріне табиғи факторлардың әсері.....	4	67
<i>Выжва С.А., Юров В.М., Портнов В.С., Рева М.В.</i> Пайдалы қазбалардың қорын бағалау үшін минералдардың физикалық қасиеттерін қолдану.....	4	78
<i>Какенов К.С., Есенбаева Г.С.</i> Жарылыс әсерінен топырақ құрылымының бұзылу аймағын анықтау әдісі.....	4	87
<i>Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кишлова А.А., Әлімов М.Ш.</i> Ұзақ мерзімді қолданыста болатын тау машиналарының конструкциясының беріктігін жоғарлату.....	4	90
<i>Таткеева Г.Г., Юров В.М.</i> Көмір қабаттарынан газдың бөлінуін күшейтудің кейбір модельдері.....	1	57
<i>Халенов О.С., Колесников В.А.</i> Дәннің ылғалдылығын анықтайтын қатты электролиттік аспап.....	1	67
<i>Юров В.М., Ыбыраев Н.Х., Гученко С.А.</i> Әр түрлі катодтарды бір уақытта шашыратып наоқұрылымды жабдықтарды синтездеу.....	3	42

АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАЛАРЫ

<i>Дүйсембаева А.Н., Құсайынова А., Тұрғынов М.М., Таңсықбаева Н.К.</i> Айналмалы екі цилиндрлер жүйесінің аэродинамикасын эксперименталдық зерттеу.....	4	49
<i>Сәулебеков А.О., Венос Д., Трубицын А.А., Қамбарова Ж.Т.</i> Екі каскадты цилиндрлік айна типті электрондық спектрометрдің аппараттық функциясын есептеу.....	2	56
<i>Сәулебеков А.О., Трубицын А.А., Қамбарова Ж.Т.</i> Кесектік электродтарға ие болатын гексапольдік-цилиндрлік анализатордың электронды-оптикалық сұлбасын модельдеу.....	1	73
<i>Сәулебеков А.О., Трубицын А.А., Қамбарова Ж.Т.</i> Электростатикалық гексапольді-цилиндрлік айналық энергоанализаторды компьютерлік модельдеу.....	3	37

ФИЗИКАНЫҢ ӘДІСТЕМЕСІ

<i>Арынгазин К.М., Васильева И.Ф.</i> Теориялық физикадағы геометриялық идеялардың қазіргі заманғы әдістері.....	2	60
<i>Ильина Л.Ф., Ещанова А.М.</i> Жоғары оқу орындарындағы жалпы физика курсына тасымал құбылыстарын оқытудың әдістемесі.....	3	49
<i>Ильина Л.Ф., Тәжібаева Д.К.</i> Электромагниттік индукция құбылысын зерттегенде және жалпы физика курсына Максвелл теориясының элементтерін практикалық қолдануда интерактивтік технологияларды қолдану.....	2	66
<i>Сақыпова С.Е., Жұманова Р.И., Қамбарова Ж.Т., Әбілжанова Ф.Б.</i> «Газ заңдары» тақырыбын оқытуда инновациялық технологияларды қолдану әдістемесі.....	3	57
<i>Сәулебеков А.О., Қамбарова Ж.Т., Түсіпбекова А.К.</i> Электростатикалық өрістегі зарядталған бөлшектердің қозғалысы мен көкжиекке бұрышпен лақтырылған дененің қозғалысы арасындағы ұқсастық.....	4	98

РАДИОФИЗИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Исмайылов Ж.Т., Шелухин Е.Н., Серіков Т.М., Закиев Д.М.</i> Автоматты реттеу жүйесі үшін электр сүзгі синтезі.....	4	44
---	---	----

ПЕРСОНАЛИИ

Профессор М.П.Тонконогов жайлы естелік.....	3	64
---	---	----

Түлектер құттықтаулары	4	6
Қарағанды мемлекеттік университеті: тарихы мен бүгінгі күні	4	9
Физика факультеті: даму және қалыптасу кезеңдері.....	4	12
«Қарағанды университетінің хабаршысы» журналының «Физика» сериясы жайлы	4	17

**Указатель статей, опубликованных
в «Вестнике Карагандинского университета» в 2011 году.
Серия «Физика»**

№ с.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

<i>Dolgov S., Kärner T., Lushchik A., Shablonin E.</i> Recombination of conduction electrons with trapped-hole centres in MgO:Be and MgO:Ca single crystals.....	1	15
<i>Kuketayev A.</i> Probability distribution of distances between local extrema of random number series.....	2	27
<i>Альжанова А.Е.</i> Энтропийно-метрическая диаграмма хаотических объектов.....	1	3
<i>Архипов В.В., Гуляев В.С.</i> Волновой пакет идущих волн.....	1	7
<i>Архипов В.В., Колт М.В., Кудусов А.С.</i> Схема Бернулли и одномерное уравнение Дирака.....	2	3
<i>Базанов А.В., Падохин В.А.</i> Математическое описание высокоинтенсивного процесса испарения с поверхности растворов солей металлов.....	2	8
<i>Бактыбеков К.С., Кутумова Ж.Б.</i> Важность использования мультифрактального анализа в классификации поверхностей твердых тел.....	3	3
<i>Балтабеков А.С., Кокетайтеги Т.А., Ким Л.М., Тагаева Б.С., Дустаева А.Е.</i> Квантово-химическое моделирование радиационно-стимулированных процессов в KDP.....	1	10
<i>Диханбаев К.К.</i> Некоторые особенности оптоэлектронных свойств пористого кремния, полученного в модифицированном электролите.....	2	13
<i>Жантурина Н.Н., Шункеев К.Ш.</i> Моделирование кинетики автолокализации экситонов в кристаллах KI и RbI при всестороннем сжатии решетки.....	3	8
<i>Жантурина Н.Н., Шункеев К.Ш.</i> О влиянии температуры и деформации на экситон-фоонное взаимодействие в кристалле KBr.....	2	18
<i>Жарекешев И.Х.</i> Применение модели Андерсона для описания фазового перехода металл-изолятор.....	4	19
<i>Карстина С.Г.</i> Применение методов компьютерного моделирования при исследовании устойчивости молекулярных структур.....	2	22
<i>Ким Л.М., Кокетайтеги Т.А., Салькеева А.К., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С.</i> Природа пиков ТСЛ в кристаллах K ₂ SO ₄ -Sm.....	4	24
<i>Кокетайтеги Т.А., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С., Альмагамбетова К.Н.</i> Особенности влияния примесных ионов марганца на радиационные процессы в кристаллах KDP.....	3	12
<i>Мурашова З.Ф.</i> Спектрально-люминесцентные характеристики твердых растворов сульфатов калия с органическими красителями.....	1	20
<i>Рахимова У.А.</i> Увеличение объема при динамическом нагружении закаленных образцов сплава 110Г13Л.....	1	27
<i>Русакова А.В., Алонцева Д.Л., Прохоренкова Н.В.</i> Эволюция структуры и свойств нержавеющей стали, облученных различными видами частиц.....	1	36
<i>Салькеева А.К., Кокетайтеги Т.А., Ким Л.М., Балтабеков А.С., Тагаева Б.С.</i> Фотолюминесценция сульфатов щелочных металлов, активированных ионами редкоземельных элементов.....	2	34
<i>Тажигаева Г.Б., Калитова А.А., Абылкалыкова Р.Б., Квеглис Л.И.</i> Твердофазные превращения, инициированные динамической нагрузкой в сплавах на основе Ni и Cu.....	3	16
<i>Украинец В.Н., Тлеулесов А.К.</i> Движение периодической нагрузки по внутренней поверхности двухслойной оболочки в упругом полупространстве.....	4	29
<i>Юров В.М.</i> Поверхностное натяжение и свойства люминофоров.....	2	49
<i>Юров В.М.</i> Условия самоорганизации трибологических систем.....	3	24
<i>Юров В.М., Вертягина Е.Н., Гученко С.А.</i> Влияние ионного облучения на структуру и свойства композиционных покрытий.....	2	39
<i>Юров В.М., Гученко С.А.</i> Некоторые вопросы физики сухого трения.....	1	44

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

<i>Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Ким П.М., Белик Г.А.</i> Системы теплоснабжения с энергосберегающими радиаторами и эффективными теплоносителями.....	4	40
<i>Нусупбеков Б.Р., Шаймерденова К.М., Рахмалина С.Г.</i> Разрушение волластонитовой руды.....	1	52
<i>Поярков И.В., Мухамеденкызы В., Актолкын Ш.</i> Щелевой диффузионный канал.....	3	33

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

<i>Акашев З.Т., Мехтиев А.Д.</i> Оптимальный алгоритм построения структурной схемы приоритетного развития горного машиностроения	4	53
<i>Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н.</i> Математическое моделирование комбинированной схемы проветривания сети выработок угольной шахты	4	60
<i>Воробьев А.Е., Юров В.М., Портнов В.С.</i> Влияние природных факторов на гидродинамические процессы и процессы разрушения в отвалах урановых рудников	4	67
<i>Выжва С.А., Юров В.М., Портнов В.С., Рева М.В.</i> Использование физических свойств минералов для оценки запасов полезных ископаемых	4	78
<i>Какенов К.С., Есенбаева Г.С.</i> Метод определения зоны разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях	4	87
<i>Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кишлова А.А., Алимов М.Ш.</i> Повышение прочности конструкций горных машин, находящихся в длительной эксплуатации	4	90
<i>Таткеева Г.Г., Юров В.М.</i> Некоторые модели интенсификации газовыделения из угольных пластов	1	57
<i>Халенов О.С., Колесников В.А.</i> Твердоэлектродный датчик влажности зерна	1	67
<i>Юров В.М., Ибраев Н.Х., Гученко С.А.</i> Синтез наноструктурных покрытий при одновременном распылении различных катодов	3	42

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

<i>Дюсембаева А.Н., Кусаынова А., Тургунов М.М., Тансыкбаева Н.К.</i> Экспериментальное исследование аэродинамики системы из двух вращающихся цилиндров	4	49
<i>Саулебеков А.О., Венос Д., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т.</i> Расчет аппаратной функции электронного спектрометра типа двухкаскадного цилиндрического зеркала	2	56
<i>Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т.</i> Компьютерное моделирование электростатического гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора	3	37
<i>Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т.</i> Моделирование электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического анализатора с торцевыми электродами	1	73

МЕТОДИКА ФИЗИКИ

<i>Арынгазин К.М., Васильева И.Ф.</i> Современные методы геометрических идей в теоретической физике	2	60
<i>Ильина Л.Ф., Ещанова А.М.</i> Методика изучения явлений переноса в вузовском курсе общей физики ..	3	49
<i>Ильина Л.Ф., Тажибаева Д.К.</i> Использование интерактивных технологий в процессе изучения явления электромагнитной индукции и практического применения элементов теории Максвелла в курсе общей физики	2	66
<i>Сакипова С.Е., Жуманова Р.И., Камбарова Ж.Т., Абильжанова Ф.Б.</i> Методика применения инновационных технологий при изучении темы «Газовые законы»	3	57
<i>Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Тусупбекова А.К.</i> Аналогия между движением заряженных частиц в электростатическом поле и движением тела, брошенного под углом к горизонту	4	98

РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Исмаилов Ж.Т., Шелухин Е.Н., Сериков Т.М., Закиев Д.М.</i> Синтез электрического фильтра для системы автоматического регулирования	4	44
---	---	----

ПЕРСОНАЛИИ

Воспоминания о профессоре М.П.Тонконогове	3	64
Поздравления выпускников	4	6
Карагандинский государственный университет: история и современность	4	9
Физический факультет: этапы становления и развития	4	12
О серии «Физика» журнала «Вестник Карагандинского университета»	4	17

Правила оформления статей

Для публикации в журнале «Вестник Карагандинского университета» принимаются статьи на казахском, русском и английском языках, содержащие результаты фундаментальных и прикладных исследований в области естественных и гуманитарных наук.

Объем статьи, включая библиографию, не должен превышать 10 страниц текста, набранного на компьютере (редактор Microsoft Word), минимальный объем статьи для гуманитарных направлений 6 страниц, естественных — 4 страницы. В издательство необходимо представить электронную версию статьи в полном соответствии с распечаткой. Страницы статьи должны быть пронумерованы.

К оформлению статей предъявляются следующие требования:

Поля рукописи должны быть: верхнее и нижнее — 25 мм, левое и правое — 20 мм; шрифт — Times New Roman, размер — 11 пт; межстрочный интервал — одинарный; выравнивание — по ширине; абзацный отступ — 0,8 см.

В верхнем левом углу дается УДК статьи.

По центру приводятся:

- название статьи (полуужирное написание) на русском и казахском языках. Для серий «Математика», «Физика», «Химия» дополнительно дается название на английском языке.
- фамилии и инициалы авторов;
- полное название учреждения, которое представляет автор (с указанием города). Если авторы из разных учреждений, то соответствие между автором и учреждением устанавливается надстрочными индексами, например:

Иванов И.В.¹, Крылов С.П.²

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

²ТОО «Институт органического синтеза и углехимии НАН РК», Караганда

– электронный адрес;

– аннотации на казахском, русском и английском языках, отвечающие требованиям информативности, содержательности и качества перевода (7–8 строк).

Далее идет текст статьи, в конце которой — список использованной литературы с полным библиографическим описанием.

Список использованной литературы для серий «Математика», «Физика», «Химия» оформляется на английском языке (обязательно).

Например:

Для книг: Фамилии и инициалы авторов. Заглавие. — Сведения о повторности издания. — Место издания: Издательство, Год издания. — Количество страниц.

Например: Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. — 3-е изд. — М.: Наука, 1984. — 294 с.

Для статей из журналов: Фамилии и инициалы авторов. Название статьи // Заглавие издания. Серия. — Год издания. — Том. — Номер. — Страницы.

Например:

Панчук Д.А., Садакбаева Ж.К., Пуклина Е.А. и др. О структуре межфазного слоя на границе металлосоединение-полимерная подложка // Российские нанотехнологии. — 2009. — Т. 4. — № 5–6. — С. 114–120.

Омарова Г.К. Влияние деформирования на скорость отверждения олигомеров // Вестн. Карагандинского ун-та. Сер. Химия. — 2010. — № 2(58). — С. 17–20.

Для материалов конференций, сборников трудов и т.д.: Фамилии и инициалы авторов. Название статьи // Заглавие издания: Вид издания. — Место, год издания. — Том. — Номер. — Страницы.

Например:

Бакиров Ж.Б. Исследование закритического прогиба пластин с учетом случайных факторов // Строительство: Тр. КарГТУ. — Вып. 1. — Караганда: Изд. КарГТУ, 1996. — С. 171–174.

Касенов Б.К., Ашляева И.В. О термодинамических свойствах арсенатов щелочноземельных металлов // Физико-химические исследования строения и реакционной способности вещества. — Караганда, 1988. — С. 124–131.

Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Первая ссылка в тексте на литературу должна иметь номер [1], вторая — [2] и т.д. по порядку. При ссылках на результат из книги указывается ее номер из списка литературы и (через точку с запятой) номер страницы, на которой опубликован этот результат. Например: [8; 325]. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

В статье нумеруются лишь те формулы, на которые по тексту есть ссылки.

В таблицах, рисунках, формулах не должно быть разночтений в обозначении символов, знаков. Рисунки должны быть четкими, чистыми. На рисунки и таблицы в тексте должны быть ссылки.

Сведения о каждом из авторов включают следующую информацию: Фамилия Имя Отчество (полностью), должность, звание, ученая степень, место работы, город. Для серий «Математика», «Физика», «Химия» сведения об авторах даются на английском языке.

Обязательно приводятся контактные данные (телефон, e-mail) автора (или авторов).

При наличии источника финансирования исследования по направлениям «Математика», «Физика», «Химия» (гранты, госбюджетные программы) указывается информация о нем.