
EUROPEAN  of Technology
Journal and Design

Has been issued since 2013.
ISSN 2308-6505.
2013. Vol.(1). № 1. Issued 4 times a year

EDITORIAL STAFF

Dr. Kuvshinov Gennadiy – Sochi State University, Sochi, Russia (Editor-in-Chief)
PhD Petrochenkov Anton – Perm National Research Politechnic University, Perm,
Russia
PhD Volkov Aleksandr – Sochi State University, Sochi, Russia

EDITORIAL BOARD

Dr. Coolen Frank – Durham University, Durham, United Kingdom
Dr. Md Azree Othuman Mydin – University Sains Malaysia, Penang, Malaysia
Dr. Tsvetkov Viktor – Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Dr. Utkin Lev – Saint-Petersburg Forestry University, Saint-Petersburg, Russia

The journal is registered by Federal Service for Supervision of Mass Media,
Communications and Protection of Cultural Heritage (Russia). Registration Certificate ПИ
№ ФС 77 – 54155 17.05.2013.

Journal is indexed by: **CrossRef** (UK), **EBSCOhost Electronic Journals Service**
(USA), **Electronic scientific library** (Russia), **Global Impact Factor** (Australia),
Open Academic Journals Index (Russia), **ULRICH's WEB** (USA).

All manuscripts are peer reviewed by experts in the respective field. Authors of
the manuscripts bear responsibility for their content, credibility and reliability.

Editorial board doesn't expect the manuscripts' authors to always agree with its
opinion.

Postal Address: 26/2 Konstitutcii, Office 6
354000 Sochi, Russia

Website: <http://ejournal4.com/>
E-mail: ejtd2013@mail.ru

Founder and Editor: Academic Publishing
House *Researcher*

Passed for printing 16.9.13.

Format 21 × 29,7/4.

Enamel-paper. Print screen.

Headset Georgia.

Ych. Izd. l. 4,5. Ysl. pech. l. 4,2.

Circulation 1000 copies. Order № 1.

European Journal of Technology and Design

2013

№

1



Издается с 2012 г. ISSN 2308-6505.
2013. № 1 (1). Выходит 4 раза в год.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кувшинов Геннадий – Сочинский государственный университет, Сочи, Россия
(Гл. редактор)
Волков Александр – Сочинский государственный университет, Сочи, Россия
Петроченков Антон – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Коолен Франк – Университет г. Дарем, Дарем, Великобритания
Мд Азри Отхуман Мудин – Университет Малайзии, Пенанг, Малайзия
Уткин Лев – Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия
Цветков Виктор – Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия (Российская Федерация). Свидетельство о регистрации средства массовой информации **ПИ № ФС 77 – 54155** 17.05.2013.

Журнал индексируется в: **CrossRef** (Соединенной королевство), **EBSCOhost Electronic Journals Service** (США), **Global Impact Factor** (Австралия), **Научная электронная библиотека** (Россия), **Open Academic Journals Index** (Россия), **ULRICH's WEB** (США).

Статьи, поступившие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы публикаций.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

Адрес редакции: 354000, Россия, г. Сочи,
ул. Конституции, д. 26/2, оф. 6
Сайт журнала: <http://ejournal4.com/>
E-mail: ejtd2013@mail.ru

Учредитель и издатель: ООО «Научный
издательский дом "Исследователь"» -
Academic Publishing House *Researcher*

Подписано в печать 16.9.13.
Формат 21 × 29,7/4.
Бумага офсетная.
Печать трафаретная.
Гарнитура Georgia.
Уч.-изд. л. 4,5. Усл. печ. л. 4,2.
Тираж 1000 экз. Заказ № 1.

C O N T E N T S

Grafutin V.I., Ilyukhin V.A., Ilyukhina O.V., Myasishcheva G.G., Prokop'ev E.P., Funtikov Yu.V. Methods of Positron Annihilation Spectroscopy in Nuclear Technology 1. Constructional Materials of Active Zone Reactors (Method of Temporal Distribution of Annihilation Photons)	4
Grigor'ev S.A., Kostin V.I., Grigor'ev A.S. Power Facilities on the Basis of Renewable Energy Resources and Electrochemical Systems with Hydrogen Store	28
Ismagilov F.R., Vavilov V.E. Influence of Rotation Rate on the Parameters of Non-contact Permanent Magnet Generator	35
Katline Koblev A. Julio, Makarov K.N. Wave Reflection in SUBMARINE Canyons	42
Kantargi I.G., Makarov N.K. Calibration of Mathematical Model of the Island Pebble Beach	48
Muhammad Khairil Aizad Senin, Md Azree Othuman Mydin Significance of Thermal Comfort in Buildings and Its Relation to the Building Occupants	54
Tsvetkov V.Y. Demand and Supply Features in Resort Industry	64
Utkin L.V., Zhuk Yu.A., Chekh A.I. An Ensemble-Based Feature Selection Algorithm Using Combination of Support Vector Machine and Filter Methods for Solving Classification Problems	70

UDC 621

Methods of Positron Annihilation Spectroscopy in Nuclear Technology

1. Constructional Materials of Active Zone Reactors (Method of Temporal Distribution of Annihilation Photons)

¹ Viktor I. Grafutin² V.A. Ilyukhin³ Ol'ga V. Ilyukhina⁴ Galina G. Myasishcheva⁵ Evgenii P. Prokop'ev⁶ Yurii V. Funtikov

¹⁻⁶ Russian Research Center "Kurchatov Institute", Russian Federation
25, B. Cheremushkinskaya street, Moscow, 117218

Abstract. Experimental research of steels, used in nuclear industry is conducted by the method of positron annihilation spectroscopy (Method of Temporal Distribution of Annihilation Photons). The experimental data process and their comparison with literary data enabled to detect vacancy defects, including the ones, induced by neutron irradiation and determine their sizes.

Keywords: positron annihilation spectroscopy; Method of Temporal Distribution of Annihilation Photons; nuclear technologies.

Введение. В рамках международной программы Primavera в 2007 году начаты работы по исследованию корпусных сталей используемых в действующих реакторах ВВЭР-440. В процессе эксплуатации реакторов этого типа происходит охрупчивание конструкционных материалов. Обычно считают, что причиной распухания является накопление точечных дефектов (в первую очередь вакансий и их кластеров), а также выделение пресипитатов, образующихся под воздействием облучения нейтронами и содержащих преимущественно медь и фосфор. В настоящее время определены режимы отжига для продления срока службы корпусов этих типов реакторов и проведен отжиг корпусов. Дальнейшая эксплуатация отожженных корпусов реакторов, определение возможностей повторного отжига корпусов требуют проведения дополнительных исследований состояния материала в отожженном и повторно облученном состояниях. Для обоснования разрабатываемых прогнозных моделей необходима экспериментальная информация об эволюции тонкой структуры этих состояний. В рамках программы Primavera проведены комплексные исследования различных состояний материала корпусов ВВЭР-440, облученных до флюенсов порядка $6 \cdot 10^{19}$ н/см². Исследовались образцы сталей находящиеся в облученном, отожженном и вторично облученном состояниях [1-3].

Объектами исследования являлись образцы сварных соединений с различным содержанием фосфора и с различной степенью облучения. Цель работы состоит в выяснении влияния нейтронного облучения и последующего отжига на свойства конструкционных материалов, используемых в реакторах ВВЭР. Образцы исследуемых сталей облучались в 2002–2003 годах на реакторе Ровенской АЭС. Химический состав и состояние предназначенных для исследования образцов сталей представлен в таблицах №1 и №2.

Данная работа посвящена исследованию указанных образцов сталей одним из методов позитронной аннигиляционной спектроскопии – методом основанным на измерении временного распределения аннигиляционных фотонов ВРАФ.

Метод позитронной спектроскопии является сравнительно новым методом изучения строения вещества. Метод основан на имплантации в исследуемый образец позитронов, образующихся в результате бета+ распада источника (как правило, ядер изотопов Na-22, Cu-64, Co-58, Ti-44), и последующей регистрации характеристик аннигиляционного гамма-излучения. В позитронной спектроскопии позитрон выполняет функции зонда,

аннигиляционные характеристики которого определяются свойствами окружающей его среды.

Применение позитронной спектроскопии в физике и химии конденсированных сред обусловлено тем обстоятельством, что этот метод позволяет получать богатую, а зачастую уникальную информацию о свойствах этих сред [4-14]. Кроме того, позитронная спектроскопия относится к методам неразрушающего контроля и позволяет проводить исследования слоистых структур и поверхности твердого тела. Необходимо подчеркнуть, что интерпретация экспериментальных результатов требует наличия развитых теоретических представлений о позитронных состояниях, позитронных процессах и позитронной аннигиляции в полупроводниках, металлах, слоистых структурах, ионных кристаллах и растворах. Параметры аннигиляции позитронов в конденсированных средах тесным образом связаны как со свойствами среды, так и со свойствами первичных продуктов радиолиза среды, окружающих позитрон на конечном участке собственного трека. Таким образом, измерения параметров аннигиляции позитронов в среде позволяет получать информацию об электронной структуре среды, образовании и эволюции дефектов кристаллической решетки, вызванных, в частности, радиационными нарушениями, о механизме и кинетике физико-химических процессов с участием аналога атома водорода – позитрония (связанное состояние позитрона и электрона) и первичных продуктов радиолиза конденсированных сред.

Использование позитронных методик для изучения твердого тела дает информацию о структуре твердого тела, дефектах кристаллической структуры, состоянии поверхности и свойствах приповерхностных слоев вещества и слоистых структур, распределении валентных электронов и электронов зоны проводимости по импульсам и позволяет изучать локальные микрополя в веществе, образовании, эволюции и концентрации радиационно индуцированных дефектов.

В средах, содержащих дефекты вакансионного типа, позитроны с большой вероятностью захватываются дефектами и аннигилируют в них. При этом экспериментально наблюдаемое время жизни позитронов зависит от размера полости, в которой он находится.

Сопоставление измеряемых времен жизни позитронов в исследуемых материалах с известными временами жизни в различного типа дефектах позволяет идентифицировать тип дефекта, а по измерению доли позитронов, аннигилирующих в этом дефекте, получать информацию о концентрации дефектов. Эти свойства и являются главными при определении размера нанополостей и дефектов структуры [3, 8, 15-19].

Позитронный метод основан на экспериментальном измерении параметров аннигиляции позитронов и позитрония (временное и угловое распределение аннигиляционных фотонов) в среде при варьировании состава среды, напряженности внешнего электрического поля, температуры и иных термодинамических параметров.

Методы позитронной диагностики интенсивно используются при исследовании электронной структуры металлов и сплавов. Это связано с тем, что метод аннигиляции позитронов позволяет определять такие важные характеристики металлов, как распределение электронов по импульсам, энергию уровня Ферми ϵ_f , число свободных электронов Z_e , приходящихся на один атом металла, и их концентрацию n_p в зоне проводимости. Эти характеристики, как известно, во многом определяют механические, электрические и магнитные свойства металлов. Кроме того, этот метод является наиболее чувствительным методом для выявления изменений электронной структуры и свойств наноразмерных вакансионных дефектов.

Позитронная аннигиляционная спектроскопия является по-существу единственным методом, позволяющим изучать процессы накопления и отжига радиационных дефектов вакансионного типа.

Однако, применение метода позитронной спектроскопии для исследования облученных нейтронами реакторных сталей имеет ряд особенностей. Одной из них является активация исследуемых материалов, обусловленная наработкой в них изотопов ^{60}Co и ^{64}Mn их последующего распада. Так, например, в стальном образце размером $1\text{ см}^2 \times 0.4\text{ мм}$ (типичный размер для позитронной спектроскопии) и облученном флюенсом $\sim 10^{21}\text{ н/см}^2$ образуется такое количество ^{60}Co , что его активность достигает 4 МБк. Примерно такую

активность приобретает корпус водо-водяного ядерного реактора за 10 лет. Средняя активность исследованных образцов составляла ≈ 5 МБк.

Активность исследованных образцов сопоставима с активностью используемых в методе ВРАФ позитронных источников.

Работа по контракту включала в себя ниже перечисленные этапы работ:

1. Сборка и настройка позитронного спектрометра.

В первом квартале 2010 года в ИТЭФ проводилась сборка и настройка электронных трактов временного позитронного аннигиляционного спектрометра (ПАС) из блоков наносекундной электроники (Рис. 1).

Спектрометр представляет собой набор модульных наносекундных электронных блоков, размещенных в крейте Canberra и соединенных между собой набором кабелей. ПАС предназначен для измерения временного интервала между двумя гамма квантами, образующимися при аннигиляции позитронов, введенных в исследуемую среду. Гамма-кванты регистрируются двумя детекторами на основе быстрых фотоумножителей XR1020 и сцинтилляторов BaF_2 . Сигнал с одного из детекторов запускает систему отсчета времени, а с другого ее выключает. Детекторы соединены с блоками высоковольтного питания (Ortec 556), обеспечивающими необходимое для их работы напряжение (2000 В) и ток (≈ 10 микро Ампер). С каждого из детекторов снимается по два сигнала разной полярности. Эти сигналы (несколько вольт) анализируются по амплитуде и времени испускания модульными блоками Ortec 583B, Canberra 2126. После амплитудного анализа сигналы поступают через блок временной задержки (Canberra 2058) на быструю схему совпадений (Ortec 414A), которая отбирает сигналы, испущенные в заданный интервал времени. Сигналы, обработанные дискриминаторами Canberra 2126 и Ortec 583B, поступают на время - амплитудный конвертор (Ortec566), где интервал времени между сигналами преобразуется в амплитуду выходного сигнала (несколько вольт). Далее этот сигнал блоком Acqiris Digitalizer card PCI преобразуется в набор цифровых кодов и в таком виде поступает на обработку (PC Fujitsu-Siemens) и хранение в многоканальный анализатор MCA Ortec PC.

После сборки и настройки позитронной установки экспериментально измерены спектры временного распределения аннигиляционных фотонов в ряде металлов с целью определения разрешающего времени установки. При регистрации гамма-квантов от Co^{60} достигнуто разрешающее время 240 пикосекунд, что сопоставимо со временем жизни позитронов в радиационных дефектах.

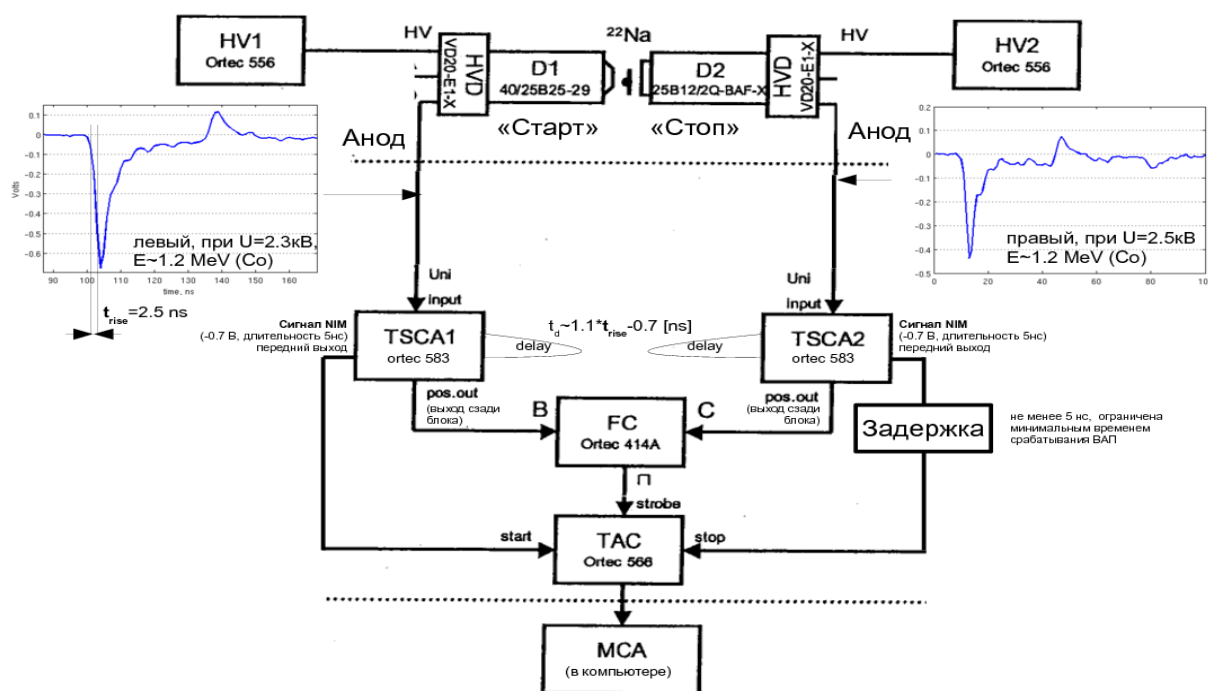
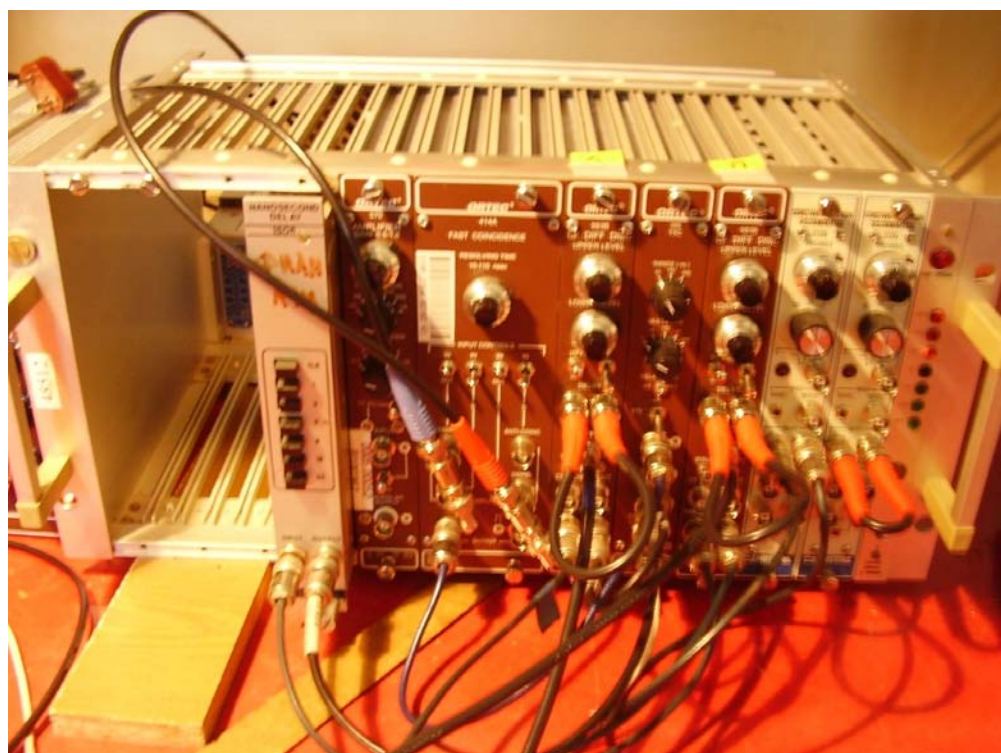
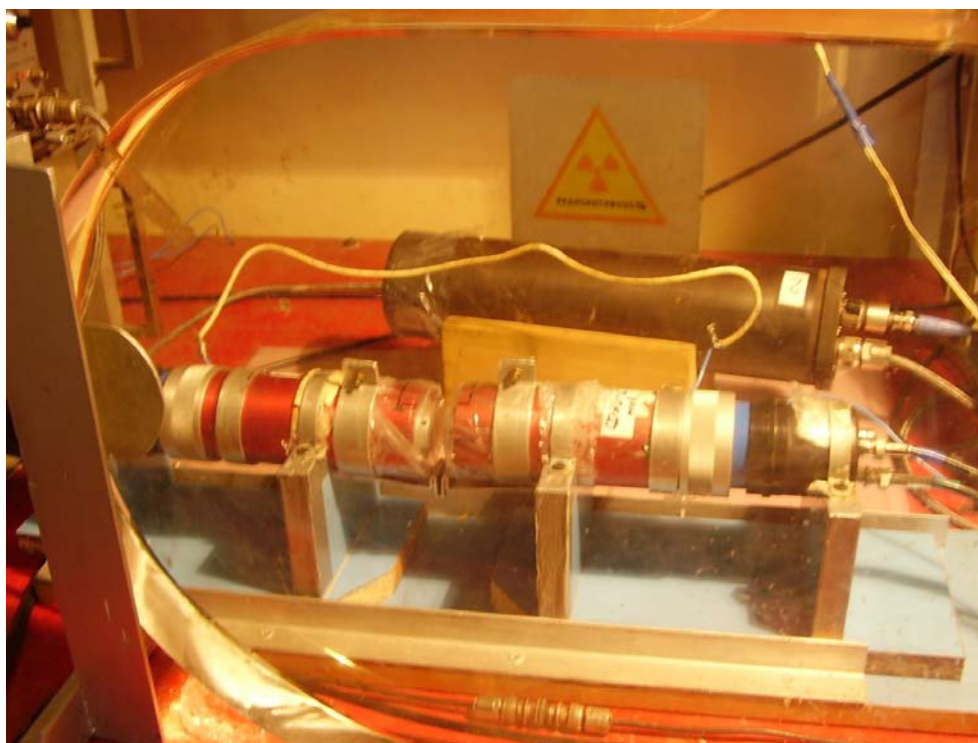


Рис. 1. Схема позитронного спектрометра

Тестирование спектрометра

Для тестирования временного аннигиляционного спектрометра проведены измерения спектров ВРАФ в образцах чистого Si.

Кремний нужен для проверки правильности настройки аппаратуры. Для кремния хорошо известно из литературы время жизни позитронов – 218 пикосекунд. Обработка экспериментальных спектров ВРАФ с ранее определенной функцией разрешения установки позволила определить долю позитронов, аннигилирующих в материалах источника позитронов (25 %) и время жизни позитронов в образцах кремния (220 пс), полученного из МИЭТ.



2. Позитронный источник.

2.1. Приобретение радиоактивного изотопа Na-22

Во втором квартале 2010 года для проведения экспериментов по измерению времен жизни позитронов были изготовлены необходимые источники позитронов, предназначенные для выполнения работ по контракту IE.V103511IE с JRC. Для этих целей произведена закупка в ОАО «В/О «Изотоп» радионуклида Na-22 номинальной активностью 5 мКи (185 МБк) в виде водного раствора соли NaCl. Выпуск препарата осуществляется согласно требованиям системы обеспечения качества – стандартам серии ISO-9001-2001.

Наработка и выделение радионуклида Na-22 произведена в ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского».

Технология получения изотопа Na-22 состоит в его выделении из алюминиевых мишеней, облученных протонами (400 МэВ). В конечном счете, изотоп Na-22 переведился в водный раствор хлорида натрия.

Параметры закупленного водного раствора NaCl (изотопа Na-22):

- тип излучения Na-22 - $+\beta$, γ
- период полураспада, 2.6 года.
- содержание неактивных примесных катионов ≤ 50.0 мкг/мл
- содержание радионуклидных примесей ≤ 0.1 атомных %
- объемная активность = 1.0 мКи/мл

2.2. Изготовление источника позитронов для временных экспериментов

Для изготовления источника позитронов для временных экспериментов был использован водный раствор соли $^{22}\text{NaCl}$. Зная активность всего раствора и его объём, было рассчитано количество препарата, необходимое для изготовления источника позитронов активностью ≈ 100 мКи. Для герметизации радиоактивного препарата использовалась лавсановая пленка толщиной 7,5 микрон. Водный раствор соли $^{22}\text{NaCl}$ наносился микропипеткой на лавсановую пленку и высушивался при температуре -60 °C. Эта процедура повторялась несколько раз до достижения требуемой активности источника позитронов. Затем лавсановая пленка с солью $^{22}\text{NaCl}$ накрывалась пленкой такой же толщины и заваривалась.

Получившийся сэндвич помещался внутрь металлической оправки, с наружи которой крепились липкой лентой исследуемые образцы (рис. 2).

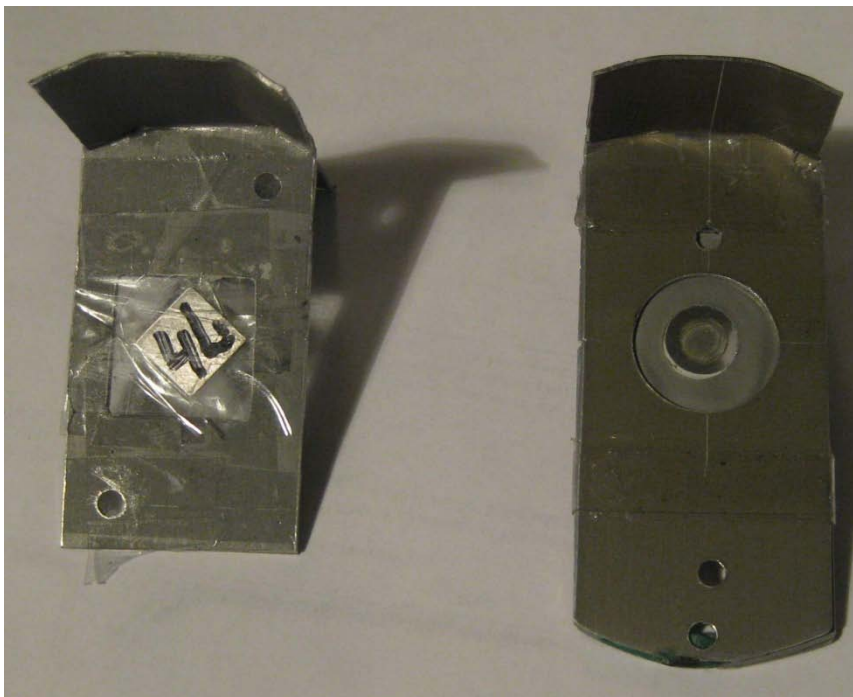


Рис. 2. Справа – источник позитронов на основе $^{22}\text{NaCl}$ в лавсане для проведения экспериментов по аннигиляции позитронов. Наличие радиоактивной соли видно по потемнению в середине лавсановой пленки. Диаметр источника ≈ 1 см. Слева – позитронный источник, с исследуемыми образцами стали (пластинки размером 1 кв.см)

Приготовленный источник был протестирован на герметичность. Для этого он помещался в прозрачный сосуд, который затем был откачен до ~ 1 мм рт. ст. В результате воздух, содержащийся внутри «конверта», может его покинуть только через дефект в конверте (например, плохо заделанный шов между двумя пластинами, либо сквозная дыра в пластине или пленке). Если же вместо этого «конверт» раздувается и сохраняет такую форму в течение нескольких часов то, его можно считать герметичным и не представляющим опасности при проведении последующих экспериментов по позитронной аннигиляционной спектроскопии.

При проведении измерений временных аннигиляционных спектров источник позитронов зажимается между двумя пластинами исследуемых стальных образцов (Рис. 2, слева, Рис. 3).



Рис. 3. Слева – источник позитронов, справа – оправки с исследуемыми образцами сталей. Образцы крепились к оправкам тонкой липкой лентой

Были приняты необходимые меры для исключения повреждения образцами защитной оболочки источника.

После сборки металлический держатель с источником позитронов и двумя пластинками исследуемого вещества помещался в детектирующий узел временного спектрометра между двумя фотоумножителями, регистрирующими «стартовый» и «стоповый» гамма-кванты (Рис. 4).

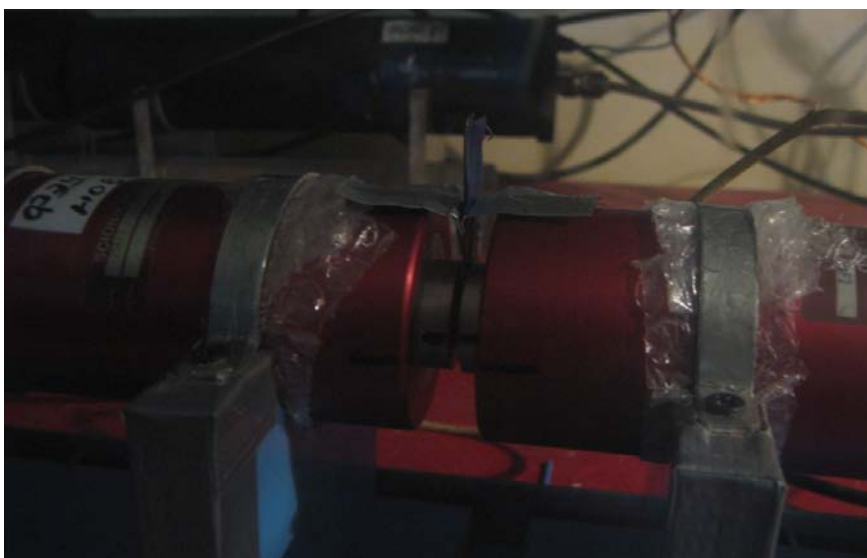


Рис. 4. Детектирующий узел аннигиляционного спектрометра: источник позитронов, с двух сторон обложенный исследуемыми образцами, зажат между двумя фотоумножителями, регистрирующими «стартовый» и «стоповый» гамма-кванты

В ходе тестовых измерений временных аннигиляционных спектров в монокристаллических образцах кремния была определена доля позитронов, аннигилирующих в источнике (соль NaCl + примеси и лавсановая оболочка). Эта доля составила 23%. Соответственно, остальные позитроны (77%) вылетают из источника и могут попадать в исследуемые образцы. При этом определено и характерное время жизни позитронов, аннигилирующих в самом позитронном источнике (0.175 нс, 0.427 нс, 1.84 нс).

3. Определение функции временного разрешения спектрометра при использовании изотопа Co-60

Функция разрешения (ФР) в идеале представляет собой форму спектра, регистрируемого многоканальным анализатором от фотонов 1.28 и 0.511 МэВ, попавших одновременно в «стартовый» и «стоповый» детекторы.

В качестве первого приближения обычно принимают за функцию разрешения параметры пика «мгновенных совпадений» от гамма-квантов 1.17 МэВ и 1.33 МэВ, испускаемых последовательно с ничтожной временной задержкой (менее 1 пс) сразу после бета-распада Co-60. рис. 5.

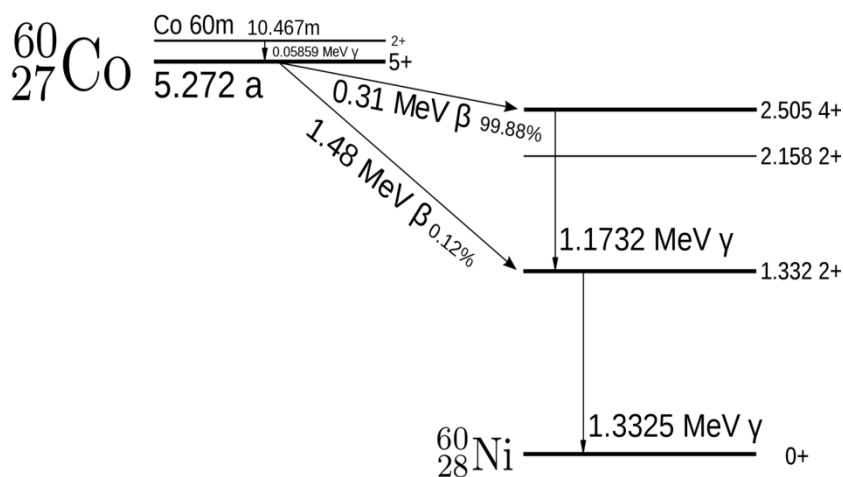


Рис. 5. Схема ядерных переходов изотопа Co-60, период полураспада $T_{1/2} = 5.272$ года

Следует иметь в виду, что в этих измерениях значения энергетических «порогов» дискриминаторов в «стартовом» и «стоповом» каналах оптимизированы для регистрации фотонов 1.28 и 0.511 МэВ соответственно, то есть для измерений позитронных аннигиляционных спектров при использовании изотопа Na-22 в качестве источника позитронов. При этом гамма-кванты кобальта с высокой эффективностью регистрируются «стартовым» ФЭУ и с заметно меньшей (примерно в пять раз) эффективностью «стоповым». С целью изучения стабильности работы электроники спектрометра спектры записывались последовательно через каждые 4 часа в течение 30 часов без выключения установки. Установлено, что температурно-временной дрейф установки оказывается небольшим ($\approx 10 - 15$ пс) и не должен мешать проведению непрерывных измерений. Скорее всего этот дрейф связан с суточной вариацией температуры в экспериментальной комнате (температурная стабилизация отсутствует). Кроме того, в процессе настройки спектрометра установлено, что функция разрешения спектрометра зависит как от геометрии (расположения источника относительно детекторов) измерений, так и от активности кобальтового источника. Сделан вывод, что измерения должны проводиться со строго фиксированной геометрией.

Для уточнения вида ФР был проведен ряд экспериментов с источником позитронов при использовании в качестве исследуемых образцов простых веществ с известными из литературы временами жизни (Sn, Al, Mo, Ni, Si). В идеале реперные образцы должны характеризоваться моноэкспоненциальной кинетикой аннигиляции позитронов в них. При этом это время жизни позитронов достаточно точно рассчитано теоретически для многих простейших одноэлементных кристаллических веществ и многократно подтверждено экспериментально. Основная сложность, тем не менее, состоит в том, чтобы удостовериться,

что тот или иной имеющийся в лаборатории образец действительно является «реперным», т.е. бездефектным, с временем жизни позитронов, близким к теоретически рассчитанному. В силу этой неопределенности уточнение вида ФР носит итеративный характер и достигается при совместной обработке некоторого числа экспериментальных спектров.

Для отработки методики и определения параметров источника проведено измерение аннигиляционного спектра позитронов в лавсане. Для этого источник позитронов был окружен с двух сторон толстым слоем лавсана, что обеспечивало в нем полную остановку (и аннигиляцию) всех позитронов. Измерения проводились непрерывно в течение суток с записью результатов через каждые 2 часа. Эти измерения позволили уточнить временной дрейф спектрометра и определить параметры аннигиляционных спектров позитронов в источнике.

В процессе эксплуатации спектрометра неоднократно измерялись и обрабатывались аннигиляционные спектры вышеприведенных простых веществ, что позволяло следить за стабильностью работы установки.

4. Стратегия исследования методом ВРАФ образцов реакторных сталей.

Проведены измерения временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ) в необлученных, облученных, облученных и отожженных образцах сталей действующих реакторов ВВЭР-440. Исследованы образцы сварных швов с различным содержанием фосфора и с разной степенью облучения. Образцы облучались в 2002-2003 годах в каналах реактора Ровенской АЭС. Флюенс нейтронов варьировался от $1 \cdot 10^{19}$ н/см² до $6 \cdot 10^{19}$ н/см².

Химический состав и состояние исследованных образцов сталей представлен в таблицах №1-2

Таблица 1.

Химический состав исследованных образцов стали

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
LP	0.04	0.04	1.12	0.0 27	0.01 3	1.42	0.13	0.49	0.16	0.19
MP	0.04	0.39	1.15	0.0 31	0.01 3	1.42	0.13	0.50	0.16	0.18
HP	0.05	0.36	1.09	0.0 38	0.01 4	1.54	0.13	0.51	0.16	0.19

LP - Сварной шов с «низким» содержанием фосфора

MP - Сварной шов со «средним» содержанием фосфора

HP - Сварной шов с «высоким» содержанием фосфора

Отжиг проводился при температуре 475 °С.

Как уже говорилось выше применение метода позитронной спектроскопии для исследования облученных реакторных сталей осложняется наличием в них радиоактивного изотопа Со⁶⁰.

Проведенный нами гамма активационный анализ облученных образцов показал, что на момент исследования активность этих образцов в основном определяется Со⁶⁰ с незначительной примесью Mn⁶⁴.

Экспериментальные спектры ВРАФ в облученных сталях являются суперпозицией ряда спектров – аннигиляции позитронов в сталях, аннигиляции позитронов в материалах источника, совпадений гамма квантов от Со⁶⁰, содержащегося в этих сталях, и совпадений гамма квантов Со 60 и гамма квантов, порожденных Na22, содержащимся в позитронном источнике.

Таблица 2.

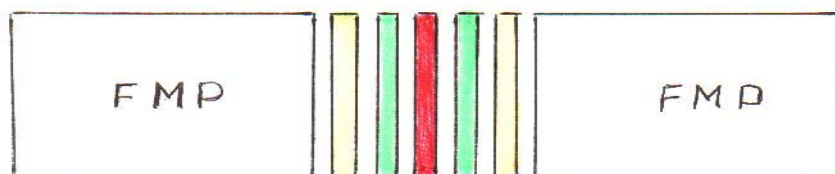
Состояние исследованных образцов стали реакторов ВВЭР-440: 10x10x1 мм

Маркировка образцов	P (%)	Состояние образцов	Флюенс $\times 10^{19} \text{H}/\text{см}^2$ ($E > 0.5 \text{ МэВ}$)	Кол-во
HP Н1	0.038	необлученные	0	2
MP М1	0.031	необлученные	0	2
LP L1	0.027	необлученные	0	2
HP Н2	0.038	облученные	1.3	2
MP М2	0.031	облученные	1.2	2
LP L2	0.027	облученные	1.3	2
MP М3	0.031	облученные	~5.9	2
HP Н3	0.038	облученные	~6.4	2
LP L3	0.027	облученные	~6.2	2
HP Н4	0.038	облученные+отожженные	~5.7	2
MP М4	0.031	облученные +отожженные	5.9	2
LP L4	0.027	облученные +отожженные	~5.7	2
Суммарное количество		Все позиции		24

4а. Схема эксперимента с облученными образцами сталей «PRIMAVERA»

Для учета в измеряемый спектр вклада от Co^{60} , содержащегося в облученных образцах, измерения проводились с использованием различных конфигураций исследуемых образцов по отношению к источнику позитронов:

а)

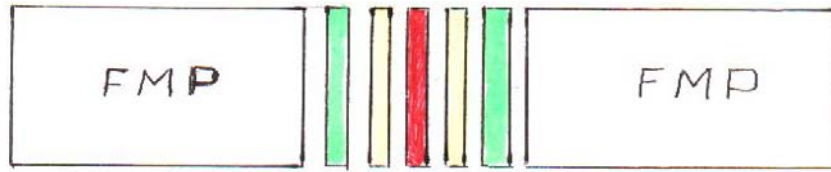
Красный - источник Na^{22} FMP – фотоумножители с детекторами BaF_2

Зеленые – облученные образцы с флюенсом F

Желтые – необлученные образцы того же состава, что и облученные

б)

Красный - источник Na^{22}



Зеленые - облученные образцы с флюенсом F

Желтые - необлученные образцы того же состава, что и облученные

Сделаны измерения исследуемых образцов по обоим вариантам - а) и б).

В варианте а) аннигиляция позитронов происходит в облученных образцах, а необлученные образцы нужны для сохранения геометрии эксперимента.

В варианте б) аннигиляция позитронов происходит в необлученных образцах, а облученные образцы нужны для сохранения геометрии эксперимента и учета вклада от различных комбинаций гамма квантов Na^{22} и Co^{60} .

Геометрия эксперимента в обоих вариантах одинакова и, можно надеяться, что паразитные эффекты будут также одинаковы и их корректно удастся учесть.

Этапы обработки экспериментальных результатов:

1). Вычитание фона из экспериментальных спектров.

2). Нормировка спектров с вычетом фона на единицу.

3). Из отнормированного спектра облученных образцов вычтем отнормированный спектр необлученных образцов.

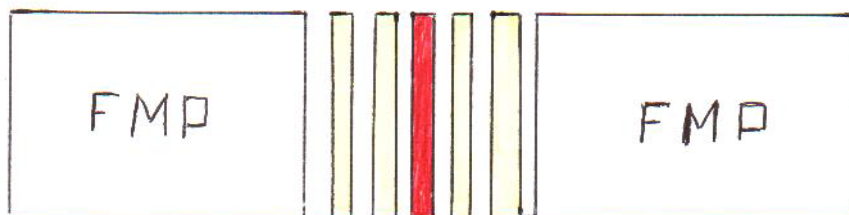
Можно полагать, что таким образом нам удастся учесть все нежелательные эффекты, связанные с совпадениями генетически не связанных гамма квантов, т.е. получаемых от разных распадов – Na^{22} и Co^{60} .

Ожидаемый результат. Из литературных данных известно [20, 21], что при облучении в сталях подобного состава исчезает короткоживущая компонента с временем жизни $\approx 50 - 60 \text{ ps}$ и интенсивностью $\approx 10 \%$ и появляется новая компонента с временем жизни $\approx 260 \text{ ps}$ и интенсивностью $\approx 10 \%$, обусловленная радиационными дефектами.

Для учета в измеряемый спектр паразитного вклада от совпадений генетически не связанных гамма квантов Co^{60} , содержащегося в облученных образцах, с гамма квантами от Na^{22} проведены дополнительные измерения по схеме

в)

Красный - источник Na^{22}



Желтые – необлученные образцы той же толщины, что и облученные.

Дополнительная пара необлученных образцов той же толщины, что и облученные

Сделаны также измерения исследуемых образцов по этому вариантам б) и вариант в).

В варианте б) аннигиляция позитронов происходит в необлученных образцах, а облученные образцы нужны для сохранения геометрии эксперимента и учета вклада от различных комбинаций гамма квантов Na^{22} и Co^{60} .

В варианте в) аннигиляция позитронов происходит в необлученных образцах, а вторая пара необлученных образцов нужна для сохранения геометрии эксперимента.

Геометрия эксперимента в обоих вариантах одинакова и, можно надеяться, что паразитные эффекты будут также одинаковы и их корректно удастся учесть.

Этапы обработки экспериментальных результатов:

- 1). Вычитание фона из экспериментальных спектров.
- 2). Нормировка спектров с вычетом фона на время единицу.
- 3). Из отнормированного на время спектра необлученных образцов варианта б) вычтем отнормированный спектр необлученных образцов варианта в).

Можно полагать, что таким образом нам удастся учесть все нежелательные эффекты, связанные с совпадениями генетически не связанных гамма квантов, т.е. получаемых от разных распадов – Na-22 и Co-60, так и спектр мгновенных совпадений гамма квантов Co-60.

Можно полагать, что таким образом нам удастся учесть все нежелательные эффекты, связанные с совпадениями генетически не связанных гамма квантов, т.е. получаемых от разных распадов – Na-22 и Co -60.

Ожидаемый результат. Если корректно провести измерения с соблюдением геометрии то, по нашему мнению, из анализа спектров, полученных в вариантах б) и в) удастся получить

форму спектра совпадений генетически не связанных гамма квантов от Co-60 и Na-22. Предположительно, эти совпадения должны приводить только к линейному увеличению фона без изменения его формы. Однако это предположение нуждается в экспериментальной проверке.

В экспериментах отдельно измерялись аннигиляционные спектры в необлученных и облученных сталях, а также спектры мгновенных совпадений от гамма квантов Co-60, содержащегося в облученных образцах. В последнем случае измерения проводились без позитронного источника.

Проведенные анализы экспериментальных результаты позволяют оценить влияние каждого из перечисленных факторов и наметить стратегию проведения экспериментов и обработки полученных результатов.

Таблица 3.

Параметры спектров ВРАФ исследованных сталей

Markin of the welds	Condition	Fluence· 10 ¹⁹ , sm ⁻² E>0.5Me B	N _{start} 10 ²	N _{stop} 10 ²	N coincid ences	Contributor Co60 in the PAL spectru (%)	Contribution Na22 in the background (%)
H1- Na - H1	unirradiat ed		300	700			100
H2 - Na +Co- H2	irradiated	1.3	307	794			87
H2 - Co - H2	irradiated	1.3	32	13,8	4	2	0
H3 - Na+ Co - H3	irradiated	≈ 5.9	400	812			62
H3 - Co - H3	irradiated	≈ 5.9	137	56	16	7,7	0
H4- Na+Co - H4	irradiated +annealing	≈ 5.7	405	885			61,6
H4 - Co - H4	irradiated +annealing	≈ 5.7	145	58	18	8,25	0
L1-Na - L1	unirradiat ed						100
L2 - Na+Co - L2	irradiated	1.3	282	640			82
L2 - Co - L2	irradiated	1.3	38	14	5	2,1	0
L3 - Na+Co - L3	irradiated	≈ 6.2					58

L3 – Co - L3	irradiated	≈ 6.2	133	54	21	9,3	1
L4 - Na+Co - L4	irradiated +annealing	≈ 5.7	425	800			59,4
L4 – Co - L4	irradiated +annealing	≈ 5.7	121	51	17	7,7	0,6
M1- Na - M1	unirradiated		290	750	315		100
M2 -Na+Co - M2	irradiated	1.2	250	750	240		84,5
M2 –Co - M2	irradiated	1.2	28	12	5	1,95	0
M3 - Na+Co - M2	irradiated	≈ 6.4	350	680	260		63,6
M3 – Co - M3	irradiated	≈ 6.4	133	45	18	7,6	0
M4 - Na+Co - M4	irradiated +annealing	≈ 5.9	340	660	260		63,6
M4 - Co - M4	irradiated +annealing	≈ 5.9	100	40	16	6,6	0
H3 - M3 -L3 + Co	irradiated		333	156	60		

Совпадения гамма квантов Co 60 и гамма квантов Na22 приводят к увеличению фона примерно на 10–15 % для слабо облученных образцов и на 35–40 % для сильно облученных образцов сталей. Активность (число распадов в единицу времени) образцов с маленькими флюенсами по отношению к активности позитронного источника составляла ~ 5 %, для образцов с большим флюенсом ~ 25 %.

Совпадения от гамма квантов Co 60 вносят вклад в суммарный спектр в виде спектра мгновенных совпадений (гаусс). Центр пика от Собо сдвинут на 80–100 пикосекунд от центра пика ВРАФ в сторону меньших каналов. Сдвигка отражает время термализации и диффузии позитронов в образце. Вклад совпадений гамма квантов от Собо в суммарный спектр составляет ≈ 2 % для слабо облученных образцов и ≈ (7-9)% для сильно облученных образцов. Вклад Собо в фон составляет (1 –2)% в зависимости от степени облучения образцов.

Аннигиляция позитронов в материале источника (лавсан, соль) сопровождается появлением в суммарном спектре ВРАФ трех новых компонент с временами жизни ≈ 200, ≈ 400 пикосекунд и 1,6 –1.8 наносекунды. Соотношение интенсивностей этих компонент составляет примерно 0.28, 0.56, 0.16. Точнее будет определено из обработки спектра ВРАФ в лавсане. Общая доля позитронов, аннигилирующих в источнике, примерно 25–30 %.

В настоящее время есть три типа спектров:

1. Спектры ВРАФ только от аннигиляции позитронов (источник позитронов + необлученные образцы, источник позитронов + чистые вещества Sn, Al, Mo, Ni, Si с известными временами жизни).

2. Спектры совпадений от Собо (облученные образцы, источник Co в форме иглы).

3. Спектры ВРАФ + Собо (источник позитронов + облученные образцы сталей).

С учетом имеющихся экспериментальных результатов можно в суммарном спектре облученных образцов сталей (ВРАФ + Собо) учесть вклад Собо, аннигиляцию позитронов в источнике и выделить компоненты, характеризующие аннигиляцию позитронов в свободном состоянии $\tau \approx 80 - 100$ пс) и захваченных в дефекты (границы зерен $\tau \approx 150 - 200$ пс, радиационно-индуцированные дефекты $\tau \approx 250 - 350$ пс).

Порядок обработки экспериментальных результатов.

Источник позитронов + лавсан. Из этих спектров можно определить время жизни позитронов лавсане и соотношение интенсивностей наблюдаемых компонент.

Аннигиляцией в соли в первом приближении пренебрегаем. Она косвенно войдет в одну из лавсановых компонент.

Спектры ВРАФ в чистых материалах ($\text{Sn} - \tau \approx 200$ пс, $\text{Mo} - \tau \approx 100 - 110$ пс, $\text{Al} - \tau \approx 160$ пс, $\text{Ni} - \tau \approx 110$ пс, $\text{Si} - \tau \approx 210 - 220$ пс). В совокупности с результатами по лавсану можно определить долю позитронов аннигилирующих в источнике. При этом следует учитывать повторное прохождение через источник части позитронов отраженных от образца. Эта доля будет возрастать с возрастанием Z материала образца [22]. Для учета доли позитронов, аннигилирующих в источнике лучше всего подходит Ni , так как Z никеля и железа близки. Из этих спектров можно определить долю позитронов аннигилирующих в материале источника – лавсане (см. приложение – учет аннигиляции в источнике).

Из спектров ВРАФ в облученных образцах (ВРАФ+Собо) убрать Собо. Первый вариант - из спектра ВРАФ+Собо вычесть спектр от Собо. Оба спектра должны быть сделаны в одной геометрии, с одинаковым временем измерения и с одинаковым расположением Собо по отношению к фотоумножителям. Второй вариант – из спектра Собо определить параметры гаусса (ширину на полувысоте и интенсивность) и зафиксировать их при дальнейшей обработке спектров программой PALSfit либо LT. Установлено, что ширина FWHM гаусса, описывающего спектр Собо меняется от ≈ 250 пс для слабо облученных образцов (L2, M2, H2) до ≈ 275 пс для сильно облученных образцов (L3, L4, M3, M4, H3, H4). Пример с вычитанием: из спектра с обозначениями L1-L3-Na22-L3-L1 вычесть спектр L1-L3-X-L3-L1. Второй спектр, сделанный без позитронного источника, содержит только совпадения от Собо и в разностном спектре их не должно быть.

Учет аннигиляции позитронов в источнике.

Из спектров Источник+Ni и Источник+лавсан по интенсивности долгоживущей компоненты определить долю позитронов аннигилирующих в источнике. Из разностного спектра, полученного в пункте 3, вычесть фон и вычесть спектр Источник+лавсан (с вычтенным фоном) с учетом выше определенной доли (веса). Подробнее смотри в приложении.

Обработать необлученные образцы сталей, зафиксировав параметры аннигиляции в источнике. Определить параметры спектров ВРАФ, соответствующие аннигиляции позитронов в стали ($\tau_1 \approx 80-100$ пс, I_1 – определить, $\tau_2 \approx 150-180$ пс, I_2 – определить).

Обработать спектры ВРАФ облученных образцов сталей, зафиксировав ранее определенные параметры гаусса от Собо, источника (лавсан) и часть определенных параметров ВРАФ в необлученной стали (τ_1, τ_2). Найти компоненту, соответствующую аннигиляции позитронов в радиационных дефектах ($\tau_3 = ?$, $I_3 = ?$).

Найти изменение этого параметра в зависимости от флюенса и восстановительного отжига.

5. Учет в спектрах ВРАФ облученных образцов сталей вклада Собо.

В случае двухдетекторной позитронной временной установки, γ -кванты Co-60 могут регистрироваться как «стартовым», так и «стоповым» детекторами спектрометра, нарушая регистрацию позитронных аннигиляционных событий. Обычно при использовании источника позитронов ^{22}Na , энергетические окна дискриминаторов выставляются вокруг значений 1274 и 511 КэВ. Тем не менее, даже если выбрать «окна» достаточно узкими, все равно из-за флуктуаций потерь энергии фотонов в сцинтилляторах, из-за эффекта комптоновского рассеяния невозможно различить фотоны, испускаемые Собо с энергией 1170 и 1330 КэВ, от фотонов Na^{22} , а в некоторых случаях и от аннигиляционных фотонов.

Вследствие этого при исследовании облученных образцов сталей на позитронных спектрах появляется пик мгновенных совпадений от γ -квантов кобальта (один гамма-квант из пары мгновенных фотонов Co запускает спектрометр, а второй останавливает его), а также увеличивается фон случайных совпадений.

На первый взгляд можно просто вычесть кобальтовый пик мгновенных совпадений из позитронного спектра, определив разность двух спектров, измеренных за одно и то же время, в случае, когда источник позитронов находится между парой облученных стальных образцов, и когда источник позитронов удален и вклад в спектр дают только гамма-кванты ^{60}Co . Однако, вследствие достаточно сильной загрузки детекторов, вклады от кобальта и

позитронов не являются аддитивными (фотоны от $Co-60$ и $Na-22$ конкурируют между собой за «запуск» спектрометра). В результате мы не знаем точно веса, с которыми в «суммарном» спектре подмешаны друг к другу «кобальтовый» и «позитронный» спектры. Более того, как было показано выше при загрузке детекторов ~ 1 МБк от $Co-60$ и от $Na-22$ пик мгновенных совпадений (а значит и функция временного разрешения спектрометра) заметно уширяются.

Корректный учет вклада кобальта в суммарный аннигиляционный спектр облученных образцов сталей требует специальных исследований.

Следует отметить, что существует и другой способ решения этой проблемы-использование трех-детекторной установки, регистрирующей как стартовый фотон 1.274 МэВ, так и оба аннигиляционных по 511 кэВ. Эта методика позволяет исключить из спектра присутствие пика мгновенных совпадений от гамма-квантов кобальта, хотя фон случайных совпадений и в этом случае останется завышенным. Однако, следует иметь ввиду, что использование трех-детекторной установки ведет к резкому уменьшению скорости набора спектра [20, 25].

Нами проведены специальные исследования по учету вклада кобальта в спектры ВРАФ облученных образцов сталей.

Совпадения гамма квантов $Co\ 60$ и гамма квантов $Na22$ приводят к увеличению фона в суммарных спектрах примерно на 15–20 % для слабо облученных образцов и на 35–45 % для сильно облученных образцов сталей, а совпадения от двух гамма квантов $Co\ 60$ вносят вклад в суммарный спектр в виде спектра мгновенных совпадений (гаусс). При обработке спектров ВРАФ эти эффекты необходимо учитывать.

5.1. Увеличение фона. Этот параметр отражает случайные совпадения гамма квантов $Co60$ с гамма квантами $Na22$ (1,28 и 0,51 МэВ) и проявляется в виде аддитивной добавки к случайным совпадениям (фону) гамма квантов от разных распадов $Na22$. Численное значение этого эффекта легко определяется как разность фонов в спектрах ВРАФ облученных образцов, необлученных образцов и спектров $Co60$.

Пример. 1. спектр НЗ- Na -НЗ	фон $N_1 = 163$ на канал
2. спектр НЗ- X -НЗ	фон $N_2 = 3,6$ на канал
3. спектр Н1- Na -Н1	фон $N_3 = 102$ на канал

Из этих данных найдем суммарный вклад кобальта в фон спектра ВРАФ облученных образцов сталей $\Delta N = (N_1 - N_3) = 61$ и вклад в фон от совпадений квантов $Co\ 60$ и гамма квантов $Na22$

$\Delta N = (N_1 - N_2 - N_3) = 57,4$. Таким образом вклад $Co60$ в суммарный фон для сильно облученных образцов составляет $\approx (35 - 40)\%$.

Эти же данные позволяют определить общее число гамма квантов $Co60$ зарегистрированных одним из каналов спектрометра (Start либо Stop) за время набора суммарного спектра (НЗ- Na -НЗ). Эта величина будет равна $(N_1 - N_2 - N_3) \cdot n$, где n - число рабочих каналов в спектре ВРАФ.

В нашем примере $(N_1 - N_2 - N_3) \cdot n = 57,4 \cdot 2176 = 124902$, при этом суммарное число событий в спектре от 512 канала до 2599 составляло 1844090, а с вычетом фона 1503909. таким образом вклад фона в суммарный спектр составляет 18,4%.

5.2. Учет вклада мгновенных совпадений гамма квантов кобальта в суммарный спектр ВРАФ облученных образцов сталей. Этот вклад приводит к изменению формы левого края суммарного спектра ВРАФ и к увеличению N_{max} .

В нашем случае

1. спектр НЗ- Na -НЗ	$N_{max} = 27478$ в 692 канале
2. спектр НЗ- X -НЗ	$N_{max} = 3994$ в 682 канале
3. спектр Н1- Na -Н1	$N_{max} = 26834$ в 692 канале

Возникает вопрос - как учесть вклад мгновенных совпадений $Co60$ в суммарном спектре ВРАФ. Один из вариантов - из суммарного спектра ВРАФ (НЗ- Na -НЗ) вычесть спектр (НЗ- X -НЗ) мгновенных совпадений от $Co60$. В этом случае необходимо знать с каким весом нужно проводить вычитание, так как часть гамма квантов $Co60$, участвующих в мгновенных совпадениях с собственными гамма квантами, будет участвовать в совпадениях с гамма квантами $Na22$. Этот эффект, в принципе, должен приводить к уменьшению вклада мгновенных совпадений гамма квантов $Co60$ в суммарный спектр ВРАФ (НЗ- Na -НЗ).

По сути дела задача сводится к определению вероятности регистрации спектрометром совпадения двух генетически связанных гамма квантов ^{60}Co от одного распада, если один из них уже зарегистрирован спектрометром.

Ответ на этот вопрос можно получить сравнивая (случай H3-X-H3) скорости счета мгновенных совпадений гамма квантов ^{60}Co со скоростью счета в каналах (Start, Stop) спектрометра

В рассматриваемом случае $N_{\text{Start}} = 545 \cdot 10^2$, $N_{\text{Stop}} = 223 \cdot 10^2$, $N_{\text{совп}} = 102$ (измерено за 4 секунды).

Эти данные позволяют определить вероятность F одновременной регистрации двух гамма квантов из одного распада ^{60}Co если зарегистрирован один из этой пары.

$$F_{\text{Start}} = \frac{102}{545} \cdot 10^{-2} \approx 2 \cdot 10^{-3}, \quad F_{\text{Stop}} = \frac{102}{223} \cdot 10^{-2} \approx 5 \cdot 10^{-3}$$

Из проведенного анализа фонов можно определить сколько гамма квантов кобальта зарегистрировано одним из каналов спектрометра за время набора суммарного спектра и, зная вышеприведенные вероятности, определить какая часть гамма квантов ^{60}Co , зарегистрированных в качестве фона, могла бы пойти на мгновенные совпадения с генетически связанными гамма квантами ^{60}Co .

В нашем примере

$$(N_1 - N_2 - N_3) \cdot n \cdot F = 57,4 \cdot 2176 \cdot F = 124902 \cdot F$$

Для каналов Start и Stop эти величины соответственно равны 250 и 600 штук.

Доля этих гамма квантов в спектре (H3-X-H3) составляет

$$\frac{124902}{115701} \cdot 5 \cdot 10^{-3}, \text{ т.е. примерно } 0,6\%$$

Таким образом спектр мгновенных совпадений ^{60}Co входит в суммарный спектр с весом 0,994, т.е. практически его можно вычитать целиком.

Если это так, то суммарное число событий в спектре H3-Na-H3 (1503909) после вычитания фона должно равняться сумме событий в спектрах H3-X-H3 (115701) и H1-Na-H1 (1421012). Видно, что в пределах ошибки эти величины совпадают.

Аналогичные результаты получаются и для спектров с участием других облученных образцов (H, M, L).

Для проверки правильности сделанных выводов были измерены спектры PAL в лавсане без кобальта (Lavsan+Na+Lavsan)) и в его присутствии (H3+H4+Lavsan+Na+Lavsan+H4+H3).

Для этого источник позитронов со стенками из лавсана был окружен с двух сторон толстым слоем лавсана, а для выяснения влияния кобальта с каждой стороны сборки добавлялось еще по два облученных с большим флюенсом образца сталей. Фитирование этих спектров (рис. 6) проводилось в трех экспоненциальном приближении с использованием параметров пика мгновенных совпадений от ^{60}Co в качестве функции разрешения. Изменением этого параметра в небольших пределах добивались наилучшего описания спектра (минимальный χ^2). В результате получили времена жизни позитронных состояний в лавсане

$$\begin{array}{ll} \tau_{11} = 0.175 \text{ нс} & I_1 = 28 \%; \\ \tau_{12} = 0.427 \text{ нс} & I_2 = 55.8 \%; \\ \tau_{13} = 1.84 \text{ нс} & I_3 \sim 16.2 \%, \end{array}$$

Полученные результаты находятся в хорошем согласии результатами работы [23]:

$$\begin{array}{ll} \tau_{11} = 0.16-0.21 \text{ нс} & I_1 = 37-49 \%; \\ \tau_{12} = 0.4-0.46 \text{ нс} & I_2 = 35-48 \%; \\ \tau_{13} = 1.8 \text{ нс} & I_3 \sim 15 \%. \end{array}$$

При обработке спектров оказалось достаточным аппроксимировать функцию разрешения суммой двух гауссиан с $\text{FWHM}_1 = 300 \text{ пс}$ и $\text{FWHM}_2 = 583 \text{ пс}$, и, соответственно, с весами $I_1 = 85 \%$ и $I_2 = 15 \%$.

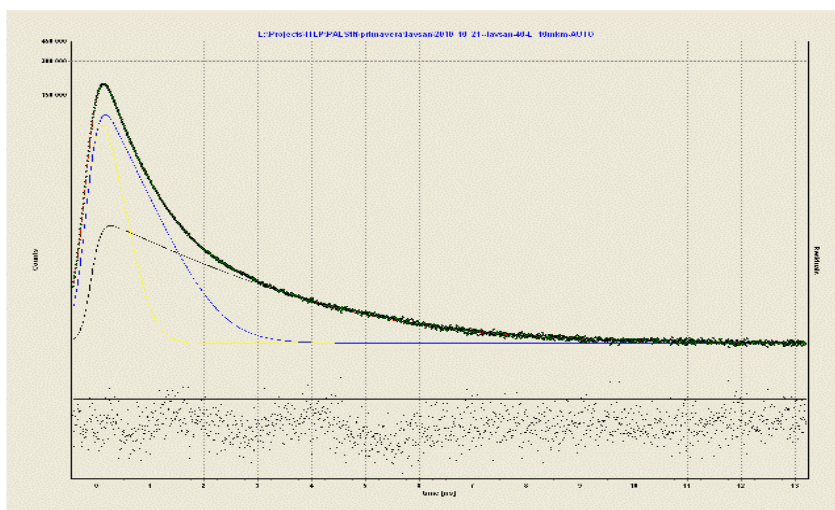


Рис. 6. Аннигиляционный спектр позитронов в лавсане. Видно три экспоненты, соответствующие различным временам жизни

В работе [23] сделан вывод, что короткая и средняя компоненты обусловлены аннигиляцией свободных позитронов, пара-позитрония и позитрониевых образований, Однако разделить эти компоненты не удалось. Третья долгоживущая компонента связана с аннигиляцией орто-позитрония.

Следует отметить, что значение $\tau_2 = 0.427$ нс численно совпадает с рассчитанным нами значением, обусловленным скоростью аннигиляции свободных позитронов в соударениях с валентными электронами лавсана.

Для выяснения вклада кобальта в суммарный спектр PALS проводилась обработка спектров с кобальтом (Рис.7) с вышеприведенными фиксированными временами и интенсивностями, определенными для лавсана в отсутствии кобальта. Получили вклад кобальта равный 11.9-13.3%.

С другой стороны вклад кобальта можно оценить используя результаты независимо полученных спектров $N_1+N_3+X+N_3+N_1$, $N_1+N_4+X+N_4+N_1$, $(N_3+N_4+Lavsan+Na+Lavsan+N_4+N_3)$:

- | | |
|--|--|
| 1. спектр $N_1+N_3+X+N_3+N_1$ | $\sum N_i - \sum background = 116902$ |
| 2. спектр $N_1+N_4+X+N_4+N_1$ | $\sum N_i - \sum background = 122727$ |
| 3. спектр $(N_3+N_4+Lavsan+Na+Lavsan+N_4+N_3)$ | $\sum N_i - \sum background = 1796802$ |

В предположении аддитивности вкладов кобальта и натрия: доля "кобальта" составляет $((239629/1796802)*100)=13.3\%$

Полученное значение вклада кобальта использовалось при обработке 24 спектров PAL лавсана, содержащих кобальт. Оказалось, что фиксирование доли кобальта 13.3% приводит лишь к незначительному изменению параметров аннигиляционных спектров.

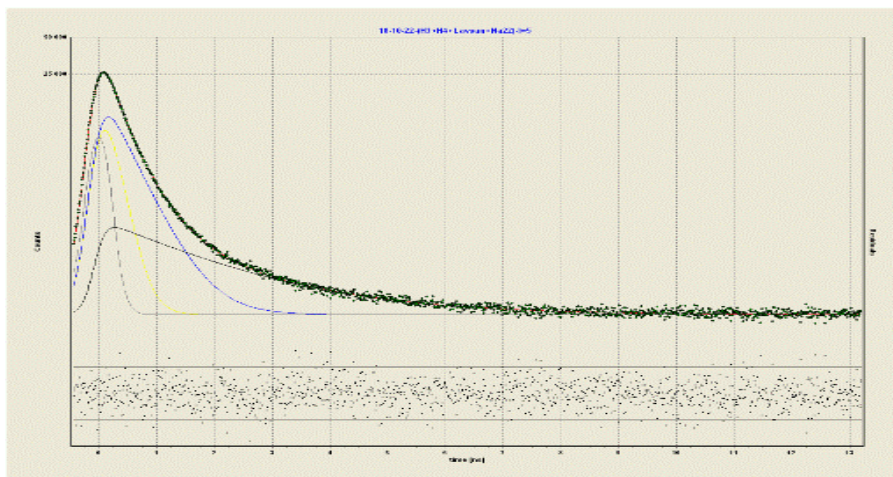


Рис. 7. Аннигиляционный спектр позитронов в лавсане в присутствии Собо – комбинация $H3+H4+Lavsan+Na+Lavsan+H4+H3$. Кобальт аппроксимирован экспонентой с $\tau = 0.01$ пс. На рисунке кобальт представлен самой узкой компонентой с максимумом при нулевом времени

Сделан вывод, что вклад кобальта, в пределах точности проведенных измерений, можно считать аддитивным. Времена жизни позитронов в лавсане не зависят от наличия кобальтовой составляющей в аннигиляционном спектре

6. Измерения аннигиляционных спектров в образцах реакторных сталей.

Проведены измерения временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ) в необлученных, облученных, облученных и отожженных образцах сталей. Спектры ВРАФ измерялись в разной конфигурации образцов по отношению к детекторам и источнику позитронов. Кроме того, для учета влияния геометрии эксперимента, сделаны три серии измерений с различным расстоянием D (distance) источника позитронов до детекторов ($D=0$, $D=5$, $D=10$). Здесь D – расстояние в миллиметрах между исследуемыми образцами и детекторами позитронного спектрометра. Для случая $D=5$ суммарное число совпадений в каждом спектре составляло $(1,5- 2,0) \cdot 10^6$ при скорости совпадений на канал 250–300 событий в секунду. Цена деления спектрометра составляла 10пс на канал.

7. Обработка экспериментальных результатов с использованием персональных компьютеров.

Обработка экспериментальных спектров проводилась с использованием стандартной программы LT, имеющейся в свободном доступе в интернете.

При обработке спектров ВРАФ образцов сталей фиксировались ранее определенные параметры аннигиляции позитронов в материале источника ($\tau_1=0,175$ нс, $\tau_2=0,427$ нс, $\tau_3=1,84$ нс и, соответственно, $I_1=28,63\%$, $I_2=55,50\%$, $I_3=15,87\%$).

Для выявления вклада радиационно-индуцированных дефектов в параметры аннигиляционных спектров облученных сталей, с учетом имеющихся литературных данных [20, 21, 24], обработку спектров проводили в трех экспоненциальном приближении с фиксированием характерных времен 120 пс, 255 пс и 350 пс. Интенсивности этих компонент (I_1 , I_2 , I_3) являлись свободными параметрами и подлежали определению.

Обработка спектров необлученных образцов сталей разного состава (НР, МР, ЛР) показала, что наилучшее описание достигается при фитирование этих спектров в двух экспоненциальном приближении с использованием параметров пика мгновенных совпадений от Со-60 в качестве функции разрешения. При этом оказалось достаточным аппроксимировать функцию разрешения суммой двух гауссиан с $FWHM_1 = 300$ пс и $FWHM_2 = 583$ пс, и, соответственно, с весами $I_1=85\%$ и $I_2=15\%$. При обработке спектров облученных сталей (рис. 8) эти соотношения гауссиан фиксировались, а функция разрешения

варьировалась (в зависимости от активности образцов) в небольших пределах для получения наилучшего описания спектров (минимальный χ^2).

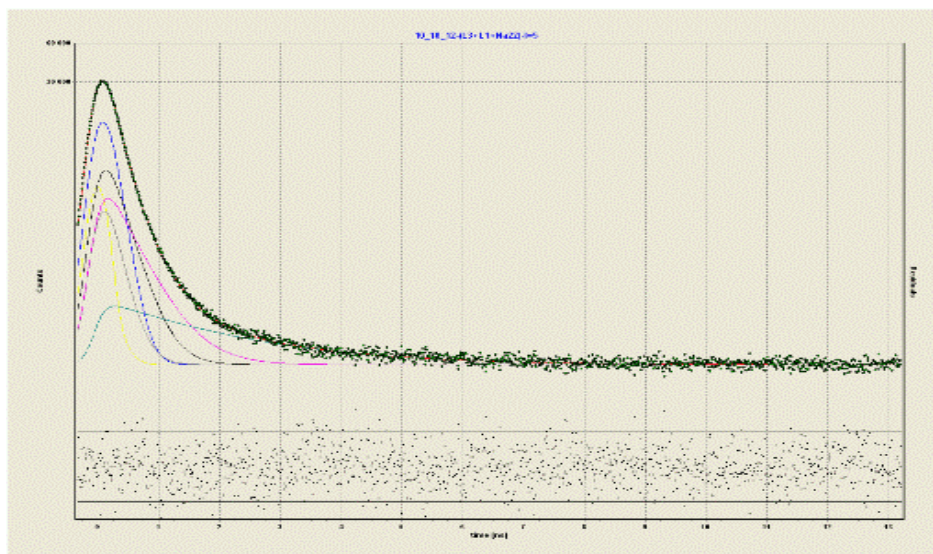


Рис. 8. Типичный аннигиляционный спектр облученных образцов сталей. Показаны шесть компонент, обусловленных аннигиляцией позитронов в материале источника (3 компоненты) и в образцах стали (3 компоненты). Пик мгновенных совпадений Собо на рисунке не показан

Значения доли позитронов, аннигилирующих в источнике, и вклад мгновенных совпадений Собо в суммарный спектр ВРАФ являлись свободными параметрами и подлежали определению.

Результаты измерений для случая $D=5$ представлены в табл. 4.

Таблица 4

Markin of the weld	I_1 (%)	I_2 (%)	I_3 (%)	$FWHM_1$ (ns)	$FWHM_2$ (ns)	Contribution Co60 in the PAL spectrum (%)	Contribution Source (%)	Mean lifetime (ns)	Back ground	χ^2
H1	59,35 $\pm 1,4$	40,65	0	0,2972 $\pm 0,0009$	0,5317 $\pm 0,0050$	0	32,56 $\pm 0,43$	0,1738	102,2	1,0561
H2	64,19 $\pm 0,8$	32,46	3,44	0,3044 $\pm 0,0050$	0,5936 $\pm 0,0062$	2,9	31,15 $\pm 0,29$	0,1667	123,5	0,864
H3	59,17 $\pm 1,40$	37,57 $\pm 1,35$	3,26 $\pm 1,20$	0,3192 $\pm 0,0006$	0,6231 $\pm 0,0057$	11,1	28,34 $\pm 0,54$	0,1583	163,0	0,883
H4	63,96 $\pm 1,44$	28,76 $\pm 1,15$	7,2 $\pm 1,0$	0,3200 $\pm 0,0008$	0,658 $\pm 0,012$	9,95	30,66 $\pm 0,49$	0,1579	164,6	1,0311
M1	59,01	40,99	0	0,2958	0,5306	0	32,83 $\pm 0,13$	0,1758	106,3	0,9989
M2	63,44 $\pm 0,35$	32,58 $\pm 0,34$	3,98 $\pm 0,25$	0,3035 $\pm 0,0005$	0,566 $\pm 0,010$	2,7	30,77 $\pm 0,14$	0,1684	124,8	1,0086
M3	58,76 $\pm 1,37$	41,12 $\pm 1,26$	0,11 $\pm 1,40$	0,3123 $\pm 0,0002$	0,652 $\pm 0,012$	11	30,33 $\pm 0,63$	0,1564	173,4	1,0964
M4	61,31 $\pm 0,34$	34,17 $\pm 0,31$	4,5 $\pm 0,2$	0,3125 $\pm 0,0005$	0,623 $\pm 0,012$	9,76	30,60 \pm	0,1592	164,6	0,8295
L1	56,5 $\pm 1,42$	43,5	0	0,3000	0,580 $\pm 0,016$	0	33,81 $\pm 0,67$	0,1716	95	0,9685
L2	67,44 $\pm 0,58$	25,16 $\pm 0,73$	7,4 $\pm 0,5$	0,3204	0,581	3,43	29,04	0,1651	134,7	1,3570

L3	60,11 ±1,50	35,26 ±1,43	4,7 ±1,1	0,3246 ±0,0008	0,635 ±0,012	13,5	29,18 ±0,56	0,1542	169,2	1,0076
L4	67,43 ±1,48	24,38 ±1,35	8,2 ±1,0	0,3195 ±0,0007	0,653 ±0,008	10,57	28,30 ±0,49	0,1535	167,7	0,922 0

8. Обсуждение экспериментальных результатов.

Анализ экспериментальных данных (таб. №4) показывает, что во всех спектрах компонента I₁ (τ₁ = 0,12нс) практически не зависит от флюенса нейтронов, компонента I₂ (τ₂ = 0,255нс) возрастает с увеличением флюенса и убывает после отжига. В спектрах облученных образцов появляется новая компонента (τ₃ = 0,35нс) с интенсивностью I₃. Основываясь на литературных данных [20,21,26], можно полагать, что компонента I₁ обусловлена суммарным вкладом в аннигиляционный спектр делокализованных позитронов и позитронов, захваченных в дефекты, присутствующие в необлученных образцах (границы зерен) сталей. Компонента I₂ может быть связана с аннигиляцией позитронов захваченных в дефекты (границы зерен, стыки трех кристаллитов, радиационно-индуцированные вакансионные кластеры). Компонента I₃, по нашему мнению, может быть обязана захвату позитронов крупными вакансионными кластерами.

Сопоставление значений параметров спектров ВРАФ необлученных образцов с различным содержанием фосфора в пределах ошибок показало их идентичность. Таким образом можно сделать вывод, что фосфор не является позитрончувствительным элементом. Увеличение интенсивностей I₂ с ростом флюенса нейтронов, по нашему мнению, отражает увеличение концентрации радиационных дефектов вакансионного типа (маленькие вакансионные кластеры, содержащие 5-6 вакансий [20,21]. Уменьшение этого параметра с отжигом связано с уменьшением концентрации вакансионных дефектов этого типа и их частичной трансформации в более крупные дефекты. О таком механизме, по нашему мнению, свидетельствует и появление в спектрах ВРАФ компоненты с временем жизни 0,350 нс. Такому времени жизни соответствует полость радиусом $r = 4 \text{ \AA}$, обусловленная вакансионными кластерами, состоящими из 10-12 моновакансий (см. приложение). Аналогичные выводы были сделаны в нашей работе по исследованию этих же сталей методом углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) [3].

Определение размера дефектов и их концентрации.

Существуют модели, позволяющие сопоставлять параметры аннигиляционных спектров (ВРАФ и УРАФ) со средним размером пор и их концентрацией.

Время жизни позитронов в веществе зависит от пространственной плотности электронов в месте аннигиляции позитронов. При наличии свободного объема (поры) в веществе время жизни позитронов определяется размером поры. Обычно для расчетов используется простая модель, предложенная Тао и Элдрупом [15]: позитрон находится в сферической яме радиусом R₀ с бесконечно высоким потенциальным барьером. При этом скорость λ его аннигиляции в приграничном слое ΔR зависит от радиуса свободного объема поры R

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 - \frac{R}{R_0} + (2\pi)^{-1} \sin\left(\frac{2\pi R}{R_0}\right) \right], \tag{1}$$

где [λ] = [с⁻¹], R = R₀ - ΔR, а λ₀ - скорость аннигиляции в бездефектной части вещества

Анализ аннигиляции позитронов в материалах с известными значениями радиусов пор в молекулярных твердых телах и цеолитах показал, что величина ΔR = R₀ - R = 1,66 Å. Вообще говоря, значение величины ΔR зависит от природы вещества.

Поэтому уравнение возможно применять лишь для оценок размеров радиусов пор. В таком виде модель Тао-Элдрупа используется для определения размера свободного объема $\frac{4\pi R^3}{3}$ полости по наблюдаемой скорости аннигиляции позитронов в ней.

В твердом теле с дефектами позитроны могут аннигилировать как в бездефектной части твердого тела так и захватываться дефектами с последующей аннигиляцией в них. Убыль делокализованных позитронов из объема твердого тела можно записать

$$\frac{d[e^+]}{dt} = -(\lambda_0[e^+] + k_d N_d [e^+]) \quad (2)$$

Здесь $[e^+] = [n]$ – концентрация позитронов в объеме твердого тела, k_d – константа захвата позитронов дефектами, N_d – концентрация дефектов, λ_0 – скорость аннигиляции позитронов в бездефектной части объема. Так что

$$\frac{dn}{n} = -(\lambda_0 + k_d N_d) dt \quad (3)$$

Решение $n(t)$ уравнения (3) для i - делокализованного объемного позитронного состояния имеет вид

$$n(t) = n^0 \exp[-(\lambda_0 + k_d N_d)t] = n^0 \exp(-\lambda_1 t) \quad (4)$$

Здесь $\lambda_1 = \lambda_0 + k_d N_d$ – скорость убыли свободных позитронов из бездефектной части объема твердого тела, обычно измеряемая в экспериментах как самое короткое время жизни позитронов $\tau_1 = 1/\lambda_1$ (при этом предполагается, что скорость аннигиляции позитронов на дефектах много больше скорости захвата их дефектами).

Если позитроны, захваченные дефектами, аннигилируют на дефектах и других трансформаций с ними не происходит, то их доля (I_d) в суммарной аннигиляции составит

$$I_d = \frac{\lambda_d}{\lambda_0 + \lambda_d} \quad (5)$$

Если скорость аннигиляции позитронов на дефектах много больше скорости захвата их дефектами, выражение 5 трансформируется в 6

$$I_d = k_d N_d / (\lambda_0 + k_d N_d) \quad (6)$$

Если параметры аннигиляции позитронов на дефектах и в объеме отличаются, то I_d поддается экспериментальному определению. Рассмотрим два случая с разной концентрацией дефектов. Им будут соответствовать спектры ВРАФ с различной интенсивностью соответствующей компоненты. Разностный спектр можно записать

$$\Delta I = \lambda_0 k_d (N_d^{\parallel} - N_d^{\perp}) / (\lambda_0 + k_d N_d^{\parallel})(\lambda_0 + k_d N_d^{\perp}) \quad (7)$$

В случае $\lambda_0 \gg k_d N_d$

$$\Delta I = k_d (N_d^{\parallel} - N_d^{\perp}) / \lambda_0 \quad (8)$$

Здесь ΔI – экспериментально измеряемая величина методом ВРАФ, λ_0 – скорость аннигиляции в объеме материала.

Зная λ_0 и ΔI , можно найти произведение $k_d (N_d^{\parallel} - N_d^{\perp})$, т.е. скорость захвата позитронов дефектами.

Если мы имеем дело с дефектами типа свободного объема (полость), то электронная плотность в этих дефектах меньше, чем в объеме, и в спектрах ВРАФ будет наблюдаться долгоживущая компонента $\tau_{\text{exp}} = 1/\lambda_{\text{exp}}$

Зная λ_{exp} , I и λ_0 , можно найти скорость аннигиляции позитронов на дефектах λ_d , которая связана со средним размером пор через соотношение (1)

Зная размер пор, из выражения (7) можно оценить концентрацию дефектов

$$k_d N_d \cong \lambda_0 \Delta I \cong \Delta I / \tau_0 \quad (9)$$

С другой стороны, среднее значение константы скорости взаимодействия позитронов с дефектами можно записать в

$$\bar{k}_d = \bar{\sigma}_+ v = 4\pi D_+ \bar{R}_d \quad (10)$$

Здесь $\bar{\sigma}_+$ - сечение захвата позитронов дефектами, v – скорость термализованных позитронов, D_+ - коэффициент диффузии позитронов, \bar{R}_d - средний радиус дефектов (пор). Зная коэффициент диффузии, из выражения (10) можно найти \bar{k}_d , и далее, используя выражения (9), найти концентрацию \bar{N}_d дефектов. Радиус \bar{R}_d дефектов определяется из выражений (1) по экспериментально измеренному значению λ . Таким образом, из приведенных выражений можно определить величины \bar{k}_d , \bar{N}_d и \bar{R}_d , если известны такие параметры, как λ_1 , D_+ , $\bar{\sigma}_+(i)$ и v .

Оценим значение $k_d N_d$ для значения $\Delta I_2 = 0,08$ (см. табл. 4) и известного для железа значения $\tau_0 = (1,10 \pm 0,05) \cdot 10^{-10}$ с [26] для данной стали. С этим значением ΔI получаем $k_d N_d \cong 0,08 / 1,10 \cdot 10^{-10} = 7,3 \cdot 10^8$.

Величина скорости захвата $k_d N_d$ в свою очередь может быть определена на основе известного выражения

$$k_d N_d = \sigma \cdot v \cdot N_d \quad (11)$$

Здесь σ - сечение захвата дефектами позитрона; v - скорость термализованного позитрона; N_d - средняя концентрация дефектов (в дефектной области кристалла). Средняя тепловая скорость позитрона при комнатной температуре $T = 293\text{K}$ оценивалась по формуле $v = (8k_0 T / \pi m_+^*)^{1/2} \approx 1,05 \cdot 10^7$ см/с, где k_0 – постоянная Больцмана, $m_+^* \approx m_0$ - эффективная масса позитрона, $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г - масса свободного позитрона. Предполагая, что сечение захвата позитронов центрами захвата примерно равно среднему значению геометрического сечения дефекта, получим $\sigma \approx \pi \cdot R_d^2 = 3,14 \cdot 0,16 \cdot 10^{-14} \approx 5 \cdot 10^{-15}$ см² (приняли, что $R_d \approx 0,4$ нм). Используя определенные выше значения $R_d \approx 0,4 \cdot 10^{-7}$ см, k_d и v , можно оценить среднее значение концентрации центров захвата позитронов в облученных образцах стали $N_d = \lambda_0 \Delta I / \sigma \cdot v = 7,3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 10^{-15} \cdot 10^7 \approx 1,4 \cdot 10^{16}$.

Заключение. Методами позитронной аннигиляционной спектроскопии проведены исследования облученных нейтронами образцов корпусных сталей, используемых в действующих реакторах ВВЭР-440. Предложен способ учета вклада радиоактивного кобальта, содержащегося в исследованных образцах, в суммарный спектр временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ), при использовании двух детекторного спектрометра.

В исследованных образцах сталей выявлены вакансионные дефекты, в том числе вызванные нейтронным облучением, определены их размеры и концентрация в зависимости от флюенса нейтронов и восстановительного отжига. Показано, что концентрация радиационных дефектов возрастает с ростом флюенса и убывает с отжигом. Наблюдается трансформация мелких дефектов (5-6 моновакансий) в более крупные, состоящие из 10-12 моновакансий (полость радиусом 3-4 ангстрем).

Ранее проводились исследования этих же образцов сталей методом углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ). В этих работах были определены концентрации электронов в зоне проводимости, энергии Ферми, концентрации дефектов и химический состав материала окружающего дефект.

Выявлена корреляция между изменениями температуры хрупко-вязкого перехода этих сталей и изменениями концентрации делокализованных электронов в зависимости от флюенса нейтронов.

Совместное использование различных методов позитронной аннигиляционной спектроскопии (ВРАФ и УРАФ) для исследования конденсированных сред позволяет учесть все каналы аннигиляции позитронов и тем самым получить развернутую информацию об электронной и дефектной структуре исследуемых сред.

Показано, что метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) является одним из эффективных методов определения размеров нанообъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции позитронов в дефектных материалах.

Установлено, что позитронная спектроскопия может с успехом применяться для исследования внутренних связей в металлах и, в частности, для исследования границ раздела кристаллитов. Применение позитронных методик в атомной отрасли позволяет исследовать радиационно-индуцированные дефекты размером до одного кубического нанометра. Порог чувствительности ПАС в отношении подобных дефектов составляет примерно 10^{14} дефектов/куб.см.

Примечания:

1. A. Chernobaeva, J. Shtrombah, A. Krjukov, D. Erak, P. Platonov, J. Nikolaev, E. Krasikov, L. Debarberis, Yu. Kohopaa, M. Valo, Vodenicharov, Int. J. Pres. Vess. Pip. 84 (2007) 151–158.
2. S. Rogozkin, A. Chernobaeva, A. Aleev, A. Nikitin, A. Zaluzhnyi, D. Erak, Ya. Shtrombakh, O. Zabusov, L. Debarberis, A. Zeman, in: Proceedings of Pressure Vessels and Piping Conference, Prague, July 2009, pp. 26–30.
3. V. Grafutin, O. Ilyukhina, V. Krsjak, R. Burcl, P. Hahner, D. Erak, A. Zeman, J. Nucl. Mater 406 (2010) 257–262.
4. V. I Grafutin, E.P. Prokopen, Phys. – Uspekhi 45 (1) (2002) 59–74. 63.
5. M.J.Puska and R.M.Nieminen, J.Phys.F:Met.Phys.13.(1983) 333-346.
6. M.J.Puska and R.M.Nieminen, Rev. Mod. Phys. 66, (1994) 841.
7. Anatoly P. Druzhkov and Denis A. Perminov, «Characterization of nanostructural features in reactor materials using positron annihilation spectroscopy», In: Nuclear Materials Research Developments ISBN 1-60021-432-0.
8. R. Burcl, V.I. Grafutin, O.V. Ilyukhina, G.G. Myasishcheva, E.P. Prokop'ev, S.P. Timoshenkov, Yu.V. Funtikov, Physics of the Solid State, 2010, Vol. 52, No. 4, pp. 700–705.
9. V. Slugen, et al., Journal of Nuclear Materials, Volume 274, Issue 3, September 1999, p.273–286
10. L. Debarberis et al., International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 81, Issue 8, August 2004, Pages 695-701.
11. V. Slugen, A. Zeman, J. Lipka and L. Debarberis, NDT & E International, Volume 37, Issue 8, 651-661 (2004).
12. V. Slugen, G. Kogel, P. Sperr, W. Triftshauser, Journal of Nuclear Materials 302 (2002), p.89–95.
13. Y. Nishiyama et al., Acta Materialia, Volume 56, Issue 16, September 2008, p.4510–4521.
14. V. Krsjak, V. Slugen, M. Miklos, M. Petriska, P. Ballo, Appl. Surf. Sci. 255 (2008) 153–156.
15. S.J.Tao, J.Phys. Chem., 1972, v.56. № 11, p. 5499.
16. Y.C.Jean, J.Microchem. 1990,v.42, №, p.72.
17. Amarendra G., Rajaraman R., Venugopal Rao G. et al. Phys. Rev. B. 2001. V.63. №22. P.224112-1-224112-6.
18. V. Krsjak, W. Egger, M. Petriska, S. Sojak, Problem Atom. Sci. Technol. 4 (2009) 109–115.
19. Schaefer H.-E., Phys. Stat. Sol.(a). 1987. V.102. №1. P.47-65.

20. J.Cizek, F.Becvar, I.Prochazka «Three-detector for positron-lifetime spectroscopy of solids containing ^{60}Co radionuclide». Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 450 (2000) 325-337.
21. J. Kocik, E. Keilova, J. Cizek, I. Prochazka, J. Nucl. Mater. 303 (2002) 52–64.
22. N Djourellov and M Misheva, J. Phys.: Condens. Matter 8 (1996) 2081–2087.
23. Hamdy F. M. Mohamed, Yasuo Ito, Masayuki Imai. J. Chem. Phys., Vol. 105, No. 11, 15 September 1996.
24. M. Eldrup, B.N. Singh, Journal of Nuclear Materials 276 (2000) 269-277.
25. V. Krsjak, W. Egger, M. Petriska, S. Sojak, Problem Atom. Sci. Technol. 4 (2009).
26. J. Kuriplach et al., Applied Surface Science 252 (2006) 3303–3308.

References:

27. A. Chernobaeva, J. Shtrombah, A. Krjukov, D. Erak, P. Platonov, J. Nikolaev, E. Krasikov, L. Debarberis, Yu. Kohopaa, M. Valo, Vodenicharov, Int. J. Pres. Vess. Pip. 84 (2007) 151–158.
28. S. Rogozkin, A. Chernobaeva, A. Aleev, A. Nikitin, A. Zaluzhnyi, D. Erak, Ya. Shtrombakh, O. Zabusov, L. Debarberis, A. Zeman, in: Proceedings of Pressure Vessels and Piping Conference, Prague, July 2009, pp. 26–30.
29. V. Grafutin, O. Ilyukhina, V. Krsjak, R. Burcl, P. Hahner, D. Erak, A. Zeman, J. Nucl. Mater 406 (2010) 257–262.
30. V. I Grafutin, E.P. Prokopev, Phys. – Uspekhi 45 (1) (2002) 59–74. 63.
31. M.J.Puska and R.M.Nieminen, J.Phys.F:Met.Phys.13.(1983) 333-346.
32. M.J.Puska and R.M.Nieminen, Rev. Mod. Phys. 66, (1994) 841.
33. Anatoly P. Druzhkov and Denis A. Perminov, «Characterization of nanostructural features in reactor materials using positron annihilation spectroscopy», In: Nuclear Materials Research Developments ISBN 1-60021-432-0.
34. R. Burcl, V.I. Grafutin, O.V. Ilyukhina, G.G. Myasishcheva, E.P. Prokop'ev, S.P. Timoshenkov, Yu.V. Funtikov, Physics of the Solid State, 2010, Vol. 52, No. 4, pp. 700–705.
35. V. Slugen, et al., Journal of Nuclear Materials, Volume 274, Issue 3, September 1999, p.273–286
36. L. Debarberis et al., International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 81, Issue 8, August 2004, Pages 695-701.
37. V. Slugen, A. Zeman, J. Lipka and L. Debarberis, NDT & E International, Volume 37, Issue 8, 651-661 (2004).
38. V. Slugen, G. Kogel, P. Sperr, W. Triftshauser, Journal of Nuclear Materials 302 (2002), p.89–95.
39. Y. Nishiyama et al., Acta Materialia, Volume 56, Issue 16, September 2008, p.4510–4521.
40. V. Krsjak, V. Slugen, M. Miklos, M. Petriska, P. Ballo, Appl. Surf. Sci. 255 (2008) 153–156.
41. S.J.Tao, J.Phys. Chem., 1972, v.56. No 11, p. 5499.
42. Y.C.Jean, J.Microchem. 1990,v.42, No, p.72.
43. Amarendra G., Rajaraman R., Venugopal Rao G. et al. Phys. Rev. B. 2001. V.63. No22. P.224112-1-224112-6.
44. V. Krsjak, W. Egger, M. Petriska, S. Sojak, Problem Atom. Sci. Technol. 4 (2009) 109–115.
45. Schaefer H.-E., Phys. Stat. Sol.(a). 1987. V.102. No1. P.47-65.
46. J.Cizek, F.Becvar, I.Prochazka «Three-detector for positron-lifetime spectroscopy of solids containing ^{60}Co radionuclide». Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 450 (2000) 325-337.
47. J. Kocik, E. Keilova, J. Cizek, I. Prochazka, J. Nucl. Mater. 303 (2002) 52–64.
48. N Djourellov and M Misheva, J. Phys.: Condens. Matter 8 (1996) 2081–2087.
49. Hamdy F. M. Mohamed, Yasuo Ito, Masayuki Imai. J. Chem. Phys., Vol. 105, No. 11, 15 September 1996.
50. M. Eldrup, B.N. Singh, Journal of Nuclear Materials 276 (2000) 269-277.
51. V. Krsjak, W. Egger, M. Petriska, S. Sojak, Problem Atom. Sci. Technol. 4 (2009).
52. J. Kuriplach et al., Applied Surface Science 252 (2006) 3303–3308.

УДК 621

Применение методов позитронной аннигиляционной спектроскопии в ядерных технологиях

1. Исследования конструкционных материалов активной зоны реакторов (метод ВРАФ)

¹ В.И. Графутин

² В.А. Илюхин

³ О.В. Илюхина

⁴ Г.Г. Мясищева

⁵ Е.П. Прокопьев

⁶ Ю.В. Фунтиков

¹⁻⁶ НИЦ «Курчатовский институт», ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» им. А.И.Алиханова

Аннотация. Методом позитронной аннигиляционной спектроскопии (метод временного распределения аннигиляционных фотонов (метод ВРАФ)) проведены экспериментальные исследования сталей, применяемых в атомной промышленности. Обработка экспериментальных результатов и сопоставление их с литературными данными позволила выявить вакансионные дефекты, в том числе и вызванные нейтронным облучением, и определить их размеры.

Ключевые слова: позитронная аннигиляционная спектроскопия; метод ВРАФ; ядерные технологии.

UDC 620.9

Power Facilities on the Basis of Renewable Energy Resources and Electrochemical Systems with Hydrogen Store *¹Sergei A. Grigor'ev²Viktor I. Kostin³Aleksandr S. Grigor'ev

¹Russian Research Center "Kurchatov Institute", Russian Federation
Dr. (Technical), Assistant Professor
E-mail: sergey.grigoriev@outlook.com

²Russian Research Center "Kurchatov Institute", Russian Federation

³Russian Research Center "Kurchatov Institute", Russian Federation
PhD (Technical)
E-mail: grig@dserver.dhtp.kiae.ru

Abstract. The article considers the aspects of power facilities on the basis of renewable energy resources with the use of electro-chemical systems with hydrogen store for energy accumulation. It was shown that energy storage in the form of hydrogen – high-efficiency energy source is considerably superior in capacity to traditional accumulator batteries and enables to smooth both daily and seasonal voltage variation from renewable energy resources.

Keywords: power plant; renewable energy source; electrochemical system; energy storage; hydrogen.

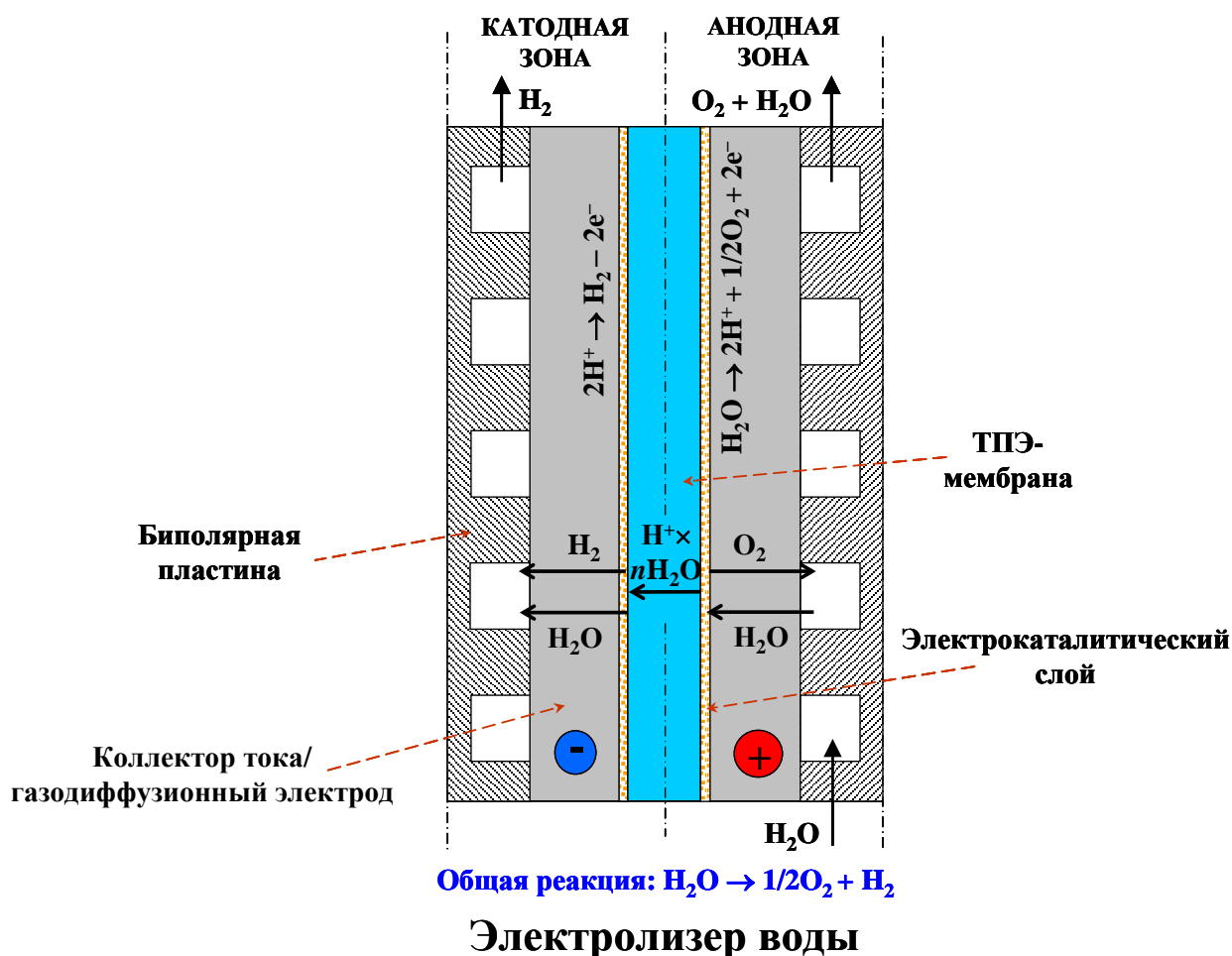
Введение. В последние годы во всем мире значительно возрос интерес к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. Дополнительный импульс к широкомасштабному внедрению энергоустановок на основе ВИЭ дала авария на Фукусимской АЭС (2011 г.), после которой ряд стран приняли решение о сворачивании атомных электростанций и их замене энергосистемами на основе ВИЭ. Так, уже сегодня в Германии доля энергии, производимой солнечными фотопанелями (24 %), практически сравнялась с энергией, производимой атомными станциями (25 %), и скоро ее превзойдет (к 2050 г. планируется полностью перейти на возобновляемую энергетику и отказаться от атомной). Для России масштаб задачи создания автономных энергоустановок и локальных энергетических сетей на основе ВИЭ можно оценить по тому факту, что приблизительно 70 % территории нашей страны, на которой проживает до 20 млн населения, не имеют возможности присоединения к централизованным электросетям [2] и получают электроэнергию от дизель-генераторов ограниченной мощности. Завоз дизельного топлива в такие регионы затруднен из-за чего финансовые затраты на его закупку постоянно растут.

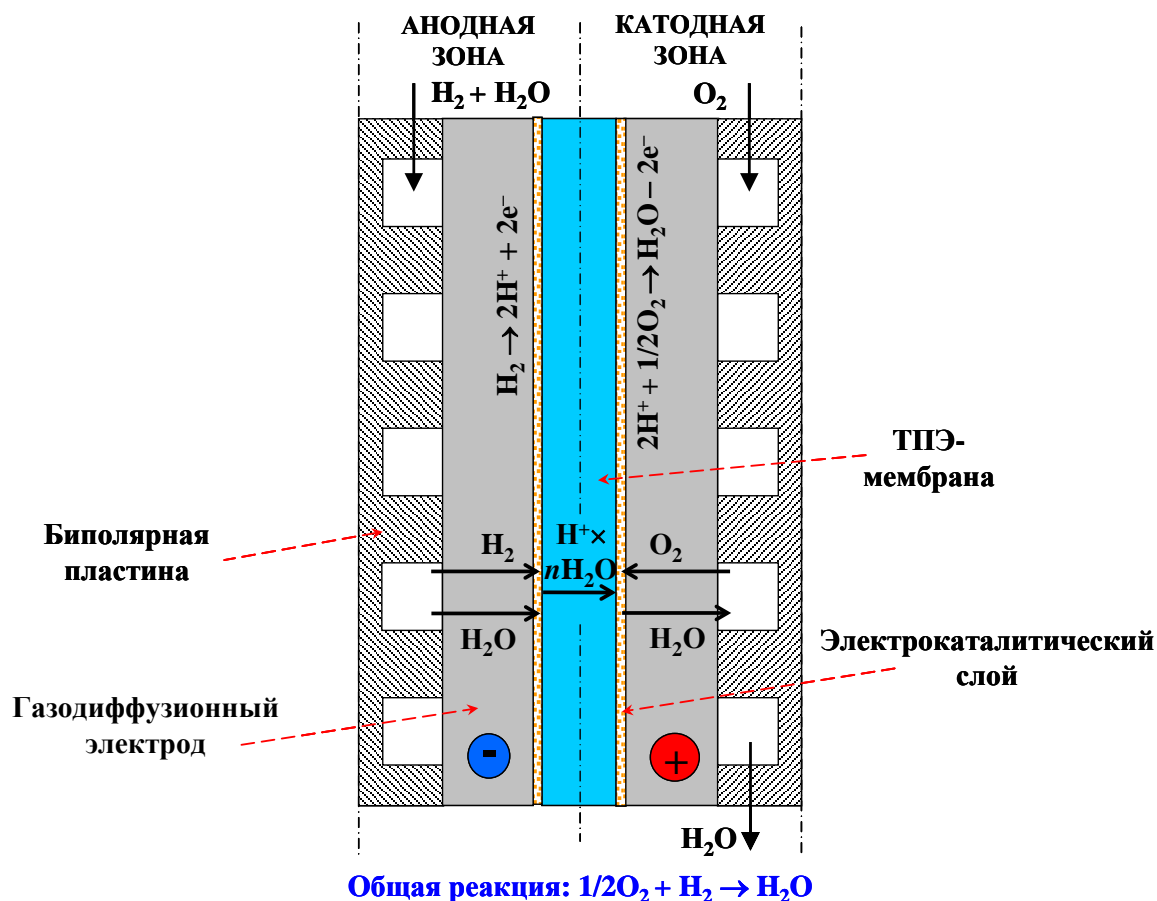
В качестве первичных источников энергии для установок на основе ВИЭ, как правило, используется энергия солнца и ветра [3]. Причем в первом случае потребитель может быть обеспечен как электрической (от фотопанелей [4]), так и тепловой энергией (от солнечных коллекторов [5]). Однако график выработки энергии такими установками, как правило, не совпадает с графиком потребления энергии. Одним из путей решения этой проблемы является разработка систем, позволяющих аккумулировать энергию на пиках выработки с последующим пополнением дефицита энергии на пиках потребления. Наиболее распространенным и традиционным является использование электрохимических аккумуляторов электроэнергии (на основе свинцово-кислотных, никель-кадмиевых и литий-ионных батарей). Однако, несмотря на значительный технический прогресс в этой области, указанные аккумуляторы по-прежнему имеют определенные ограничения, такие как недостаточная емкость, срок службы и количество циклов заряда-разряда, обусловленные

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (государственный контракт № 14.516.11.0044).

необратимыми изменениями их электрохимических свойств, особенно в условиях нерегламентированного графика нагрузки и глубоких разрядов [6]. В результате их замена требуется ранее, чем это необходимо для других узлов установки на основе ВИЭ. Это является негативным фактором, поскольку децентрализованные энергоустановки на основе ВИЭ располагаются зачастую в труднодоступных территориях и доставка оборудования может быть осуществлена или в определенный период года, или на вертолете.

Одним из перспективных путей создания систем хранения энергии является использование водородных электрохимических систем с накопителями водорода [7-8]. В этом случае в состав энергоустановки включается электролизер воды, в котором осуществляется преобразование электрической энергии от ВИЭ в химическую энергию водорода [10-12]. Для последующего накопления и хранения водорода могут быть использованы газовые баллоны, металлгидридные системы и т.п. [13]. В период, когда ВИЭ в силу их непостоянства природного характера недоступны, или потребителю требуется дополнительная энергия, из запасенного водорода посредством топливных элементов производится электроэнергия и тепло. Здесь необходимо подчеркнуть, что среди различных видов электролизеров воды и топливных элементов с системами на основе ВИЭ наиболее удачно komponуются низкотемпературные электрохимические устройства с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) (рис. 1). Для обозначения такого типа электрохимических систем в англоязычной литературе используется аббревиатура PEM (Proton Exchange Membrane) или SPE (Solid Polymer Electrolyte).





Водородный топливный элемент

Рис. 1. Схемы электрохимических систем с ТПЭ и основных процессов в них

Электрохимические системы с ТПЭ стали активно разрабатываться с 1950-х годов. Первыми устройствами этого типа были топливные элементы, созданные компанией General Electric в рамках американских космических программ Gemini и Apollo. Значительный прогресс в области создания ТПЭ-систем связан с разработкой в середине 1960-х годов компанией DuPont de Nemours перфторированной протонообменной мембраны марки Nafion®. Основными достоинствами электрохимических систем с ТПЭ являются высокая эффективность и экологическая чистота, а также низкая инерционность, высокий ресурс, достаточно высокий уровень взрывопожаробезопасности. Системы с ТПЭ компактны, могут быть сконструированы в различных геометрических конфигурациях, малочувствительны к ударам, вибрации, радиации, могут использоваться в условиях вакуума и невесомости. Электрохимические системы с ТПЭ характеризуются высокими значениями удельной мощности и электрического КПД (около 50 % для топливных элементов и 80 % для электролизеров), минимальным временем старта (в том числе, при отрицательных температурах).

В отличие от элементов с жидким электролитом, в системах с ТПЭ отсутствует необходимость регенерации электролита в ходе работы (нет разбавления электролита продуктом реакции – водой, и электролит не реагирует с углекислым газом, как в случае щелочного электролита). Отсутствие жидкого щелочного электролита резко снижает коррозию металлических частей оборудования. Возможно проведение процесса при значительных перепадах давления между анодной и катодной камерами (до нескольких десятков и даже сотен атмосфер). Хотя ТПЭ-мембрана тонка, она обладает низкой газопроницаемостью, что снижает вероятность смешения реагентов, по сравнению, например, со щелочными элементами. Снижение расстояния между электродами до

толщины мембраны (так называемый, zero-gap design) приводит к уменьшению омических потерь. В системах с ТПЭ используются высокодисперсные порошковые катализаторы, имеющие высокие значения удельной активной поверхности.

Поскольку ТПЭ-системы имеют модульную конструкцию, и возможно как параллельное, так и последовательное соединение отдельных электрохимических ячеек и батарей на их основе, они могут быть скомпонованы в соответствии с теми или иными требуемыми электрическими параметрами, принятыми в системах с солнечными фотопанелями, ветрогенераторами [14] и другими ВИЭ. И, наоборот, системы на основе ВИЭ, солнечных панелей и ветрогенераторов могут быть адаптированы для обеспечения оптимального режима работы электролизера воды. За счет такой модульной архитектуры можно, в принципе, отказаться от использования инверторов и трансформаторов или свести их количество и мощность к минимуму. Пример такой электрохимической подсистемы, встроенной в автономную энергосистему на основе ВЭИ, показан на рис. 2.

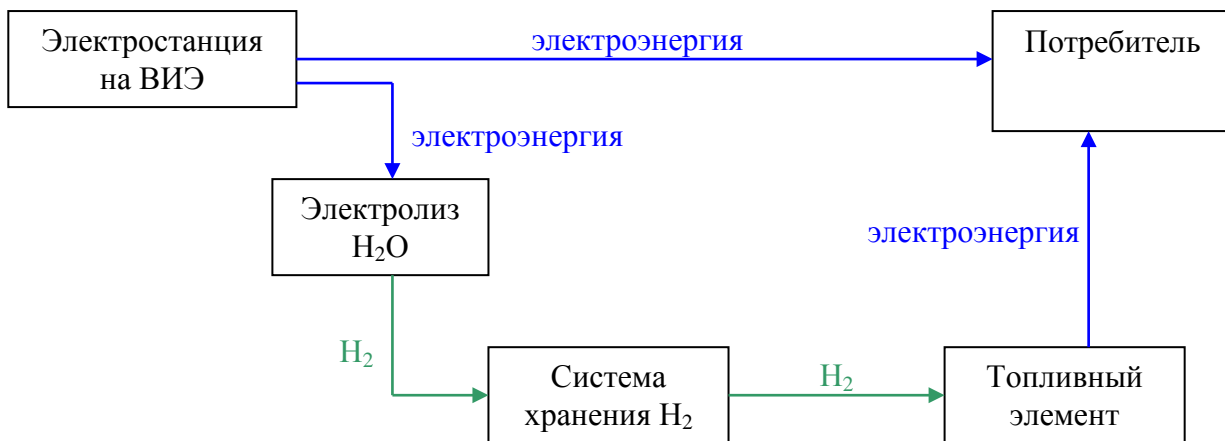


Рис. 2. Схема энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии, электрохимических систем и системы хранения водорода

Недостатком системы энергоснабжения, схема которой приведена на рис. 2, являются значительные энергопотери, обусловленные тем, что тепло, выделяющееся в процессе работы электрохимических модулей, не используется. Так, электрический КПД электролизера составляет около 80 %, а топливного элемента – около 50 %. Следовательно, общий электрический КПД системы хранения энергии составит около 40 %. В этом случае оставшиеся 60 % выделяются в виде тепла, которое целесообразно утилизировать для отопительных и пр. целей, как показано на рис. 3.

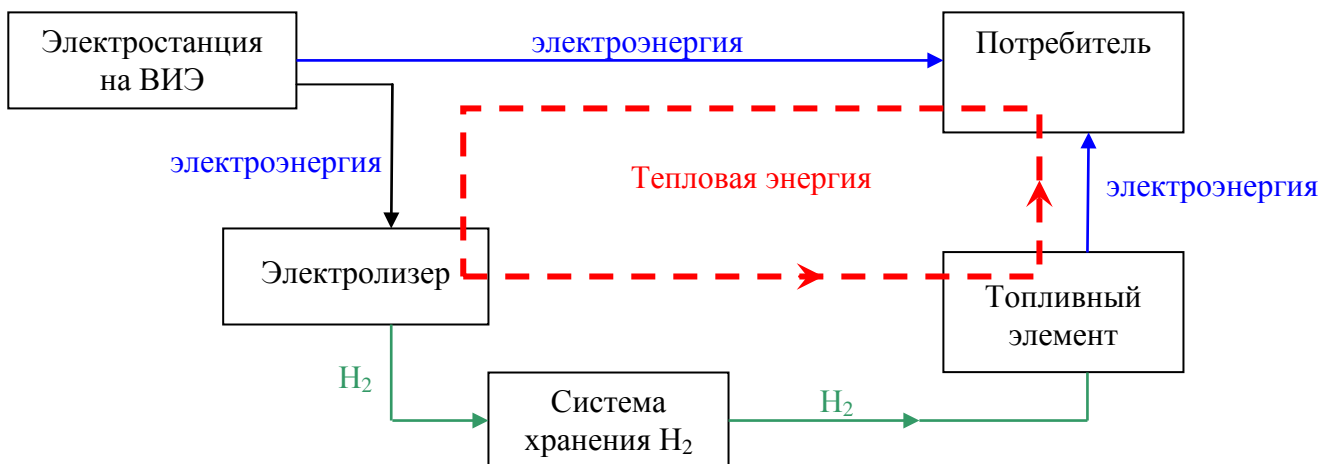


Рис. 3. Схема энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии, электрохимических систем и системы хранения водорода с утилизацией тепла

Однако, учитывая, что потребность в тепловой энергии может превышать тепловыделения в электролизерах и топливных элементах (в частности, зимними короткими днями в северных широтах), и, кроме того, имеет свой график потребления, наиболее перспективной представляется схема энергоснабжения, предусматривающая возможность получения тепловой энергии за счет сжигания части водорода в котельной (рис. 4).

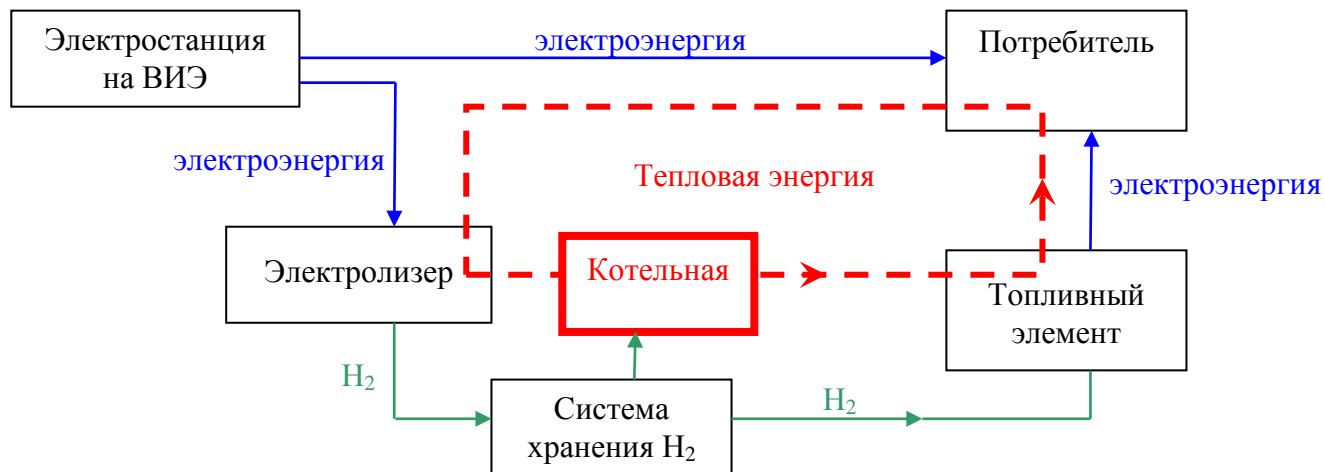


Рис. 4. Схема энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии, электрохимических систем и системы хранения водорода с утилизацией тепла и сжиганием части водорода в бойлере

Заметное преимущество предлагаемых энергоустановок с водородными накопителями по массогабаритным показателям особенно существенно при создании систем в удаленных и/или труднодоступных районах. Другим важным преимуществом является возможность наращивания энергоемкости водородного накопителя путем подсоединения дополнительных газовых баллонов или использования газгольдеров большей емкости. Также несомненным преимуществом водородных накопителей по отношению к традиционным электрохимическим аккумуляторам является простота утилизации и отсутствие при этом токсичных компонентов. Немаловажными преимуществами водородных электрохимических систем являются отсутствие саморазряда, самобалансированность, модульная архитектура, обратимость процесса и большое количество циклов заряда-разряда. Примечательно, что с ростом емкости хранения падает удельная стоимость системы, т.к. для запаса дополнительной энергии требуется только дополнительный объем для хранения водорода. Снижение стоимости, массы и габаритов системы возможно посредством объединения электролизера воды и топливного элемента в бифункциональное (обратимое) электрохимическое устройство [15], работающее попеременно то в режиме электролизера (вырабатывая водород), то в режиме топливного элемента (вырабатывая электрическую энергию и тепло).

НИЦ «Курчатовский институт» ведет разработку систем на основе ВИЭ, в том числе, с водородными накопителями энергии. Созданы эффективные технические решения по использованию электрохимических водородных систем с ТПЭ в локальных энергетических системах. Разработаны новые мембранные, электродные и электрокаталитические материалы для низкотемпературных водородных электрохимических систем.

Примечания:

1. Фортов В.Е. Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 168 с.

2. Андреев В.М. Интегрированная солнечно-ветровая энергетическая установка с накопителем энергии на основе водородного цикла / В.М. Андреев, А.Г. Забродский, С.О. Когновицкий // Альтернативная энергетика и экология. 2007. №2. С. 99–105.

3. Елистратов В.В. Использование возобновляемой энергии. Учебное пособие. С.-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. 224 с.
4. Григорьев А.С. Выбор критериев оптимизации при разработке гибридных установок на основе солнечных модулей для электропитания локальных удаленных потребителей промышленно-бытового назначения / А.С. Григорьев, С.А. Григорьев, Ю.В. Кухмистров, Ю.А. Нечаев // Альтернативная энергетика и экология. 2011. №12. С. 39–48.
5. Григорьев А.С. Моделирование нестационарных процессов в системе теплоснабжения на базе возобновляемых источников энергии / А.С. Григорьев, С.А. Григорьев, В.В. Скорлыгин // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №6. в печати.
6. Груздев А.И. Опыт создания батарей на базе литий-ионных аккумуляторов большой емкости / А.И. Груздев // Электрохимическая энергетика. 2011. №3. С. 128–135.
7. Hebling C. The Role of Hydrogen in Renewable Energy Economy // Proceedings of Intersolar Europe 2012, June 11-15, Munich.
8. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications / G. Gahleitner // International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38. P. 2039–2061.
9. Григорьев А.С. Аккумуляция энергии с использованием электролизёров и топливных элементов в установках на основе возобновляемых источников энергии / А.С. Григорьев, С.А. Григорьев, Д.В. Павлов // Альтернативная энергетика и экология. 2012. №11. С. 55–64.
10. Кулешов Н.В. Низкотемпературные электролизеры воды для автономных энергоустановок с водородным накоплением энергии / Н.В. Кулешов, С.А. Григорьев, В.Н. Кулешов, А.А. Терентьев, В.Н. Фатеев // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №6. С. 23–27.
11. Grigoriev S.A. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy / S.A. Grigoriev, V.I. Porembsky, V.N. Fateev // International Journal of Hydrogen Energy. 2006. Vol. 31. P. 171–175.
12. Millet P., Grigoriev S. Water electrolysis technologies / Chapter of book Renewable Hydrogen Technologies. Production, Purification, Storage, Applications and Safety. Edited by: Luis M. Gandia, Gurutze Arzamendi and Pedro M. Dieguez, Elsevier, 2013, P. 19–41.
13. Козлов С.И. Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / С.И. Козлов, В.Н. Фатеев. Под ред. Е.П. Велихова. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009, 520 с.
14. Григорьев А.С. Учет характеристик при разработке гибридных установок солнечных модулей и ветрогенераторов / А.С. Григорьев, С.А. Григорьев, Ю.В. Кухмистров, Ю.А. Нечаев, Д.В. Павлов, Е.А. Пунина // Новое в российской электроэнергетике. 2012. №1. С. 5–20.
15. Джусь К.А. Разработка и исследование обратимого топливного элемента с твердым полимерным электролитом / К.А. Джусь, А.С. Глухов, С.А. Григорьев // Альтернативная энергетика и экология. 2011. №11. С. 21–28.

УДК 620.9

Энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии и электрохимических систем с водородными накопителями

¹Сергей Александрович Григорьев

²Виктор Иванович Костин

³Александр Сергеевич Григорьев

¹Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Россия
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Доктор технических наук, доцент, начальник отдела

E-mail: sergey.grigoriev@outlook.com

² Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Россия
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Начальник группы

³ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Россия
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Кандидат технических наук, начальник отдела

E-mail: grig@dserver.dhttp.kiae.ru

Аннотация. В статье рассматриваются аспекты создания энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с использованием электрохимических систем с водородным накопителем для аккумуляции энергии. Показано, что хранение энергии в виде водорода – высокоэффективного энергоносителя – значительно превосходит по своим емкостным показателям традиционные аккумуляторные батареи и позволяет сглаживать не только суточную, но и сезонную неравномерность поступления энергии от ВИЭ.

Ключевые слова: энергоустановка; возобновляемый источник энергии; электрохимическая система; хранение энергии; водород.

UDC 621.313

Influence of Rotation Rate on the Parameters of Non-contact Permanent Magnet Generator

¹ Flyur R. Ismagilov² Vyacheslav E. Vavilov¹ Ufa State Aviation Technical University, Russian Federation
12, Karl Marx Str., Ufa, 450000

PhD, Professor

E-mail: S2_88@mail.ru

² Ufa State Aviation Technical University, Russian Federation
12, Karl Marx Str., Ufa, 450000

Assistant

E-mail: S2_88@mail.ru

Abstract. The article discusses an urgent task for the development of decentralized power in the Russian Federation – the design and development of high-speed non-contact magneto-electric generators for microturbine systems for biogas. On the basis of the equations of Arnold and equations that characterize the mechanical strength of the rotor, designed the expression reflecting the dependence of the power of high-speed non-contact magneto generator on the speed of its rotor, adjusting the air gap. Designed expression can be used for the design of electrical machines in its class, and as a single-purpose or multi-purpose optimization function. The effect of thickness of the high-coercivity permanent magnets in the rotor to the power of high-speed non-contact magneto generator varies with the frequency of rotation.

Keywords: high-speed permanent-magnet generator; high-coercivity permanent magnets; rotor sleeve bandage.

Введение. Наряду с централизованным электроснабжением потребителей электроэнергетики, перспективным является и децентрализованное, при котором потребитель не зависит от линии электропередачи значительной протяженности, а, следовательно, и от аварий, которые могут возникнуть на этой линии. Особый интерес представляет применение автономного электроснабжения в отдаленных малонаселенных районах, например в районах крайнего севера РФ, в связи с большой протяженностью кабельных линий, сложностью ландшафта и малым числом потребителей. Также автономное электроснабжение применяется в качестве резервного на различных объектах, согласно требованиям правил устройства электроустановок.

Эффективным, как в экономическом, так и в техническом плане, для решения задач автономного электроснабжения является применение микротурбинных установок (МТУ). К достоинствам которых относятся: минимальное количество вращающихся узлов (в современных конструкциях МТУ турбина, компрессор и генератор расположены на одном валу), возможность когенерации и тригенерации, универсальность потребляемого топлива (МТУ может одинаково эффективно работать как на традиционных видах топлива природном и сжиженном газе, дизельном топливе и керосине, так и на низкокалорийных и высокосернистых газах, таких как попутный газ, шахтный газ и биогаз). Кроме того МТУ обладает высоким КПД (в режиме когенерации КПД может достигать 92 %) [1, 2, 3].

Как было обозначено выше, МТУ достаточно эффективно работает на шахтном и попутном газе, что является перспективным для нефтегазовых и горнорудных компаний, а также на биогазе, что может разрешить проблемы автономного электроснабжения агропромышленного комплекса и лесоперерабатывающих предприятий.

На рис. 1 представлена структурная схема системы автономного электроснабжения с МТУ на биогазе.

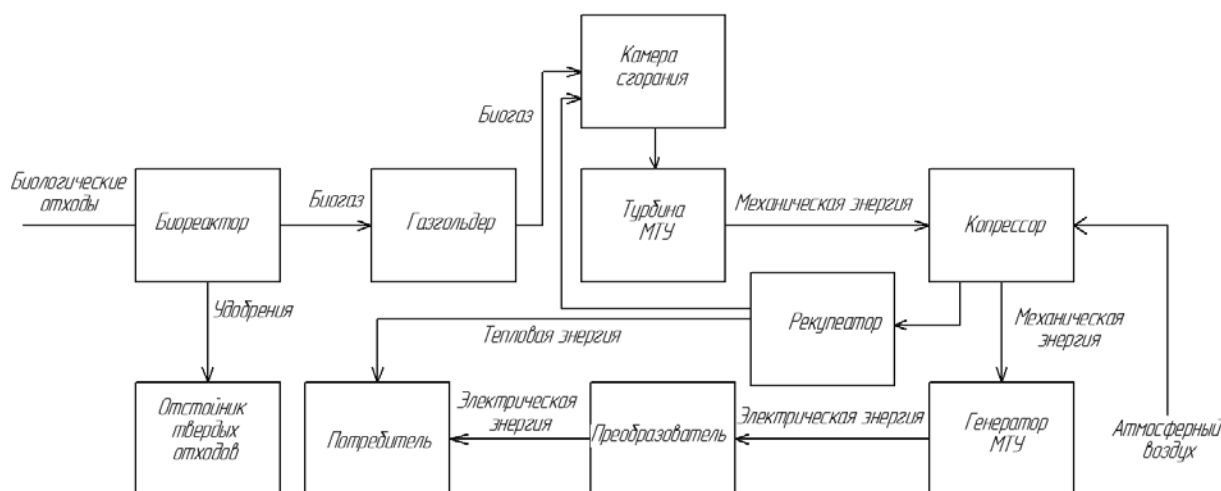


Рис. 1. Структурная схема системы автономного электроснабжения с МТУ на биогазе

Как видно из рисунка 1, основным энерговырабатывающим элементом в системе автономного электроснабжения (САЭ) является генератор. Для обеспечения экономической рентабельности применения САЭ ее генератор должен обладать максимальными энергетическими показателями, необходимой надежностью при эксплуатации в экстремальных условиях и простотой конструкции. Наиболее полно сегодня представленным требованиям отвечают бесконтактные магнитоэлектрические генераторы (БМГ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) [4].

Для достижения максимальных энергетических показателей и минимизации массогабаритных показателей возникает необходимость повышение частоты вращения ротора БМГ, при этом для минимизации потерь на трение в БМГ применяются бесконтактные подшипниковые опоры [5-7].

Материалы и методы. Традиционно взаимозависимость объема, частоты вращения и выходной мощности БМГ устанавливается согласно уравнению [8]:

$$S = 0,163\alpha_{\phi} k_{\phi} nAB_{\delta} l D^2, \quad (1)$$

где n – частота вращения ротора; A – линейная токовая нагрузка; l – активная длина ВПМ; D – диаметр ротора; k_{ϕ} – коэффициент формы поля; $k_{\phi 0}$ – обмоточный коэффициент; α_{ϕ} – коэффициент полюсного перекрытия.

Обычно ВПМ соединяются со спинкой ротора посредством клея, и для того чтобы ВПМ не оторвались от спинки ротора в процессе эксплуатации поверх них устанавливается бандажная оболочка, рисунок 2, которая является дополнительным воздушным зазором. То есть рабочий зазор в БМГ складывается из двух составляющих:

$$\delta = \delta_n + \delta_b, \quad (2)$$

где δ_n – воздушный зазор в БМГ; δ_b – толщина немагнитного бандажа ротора.

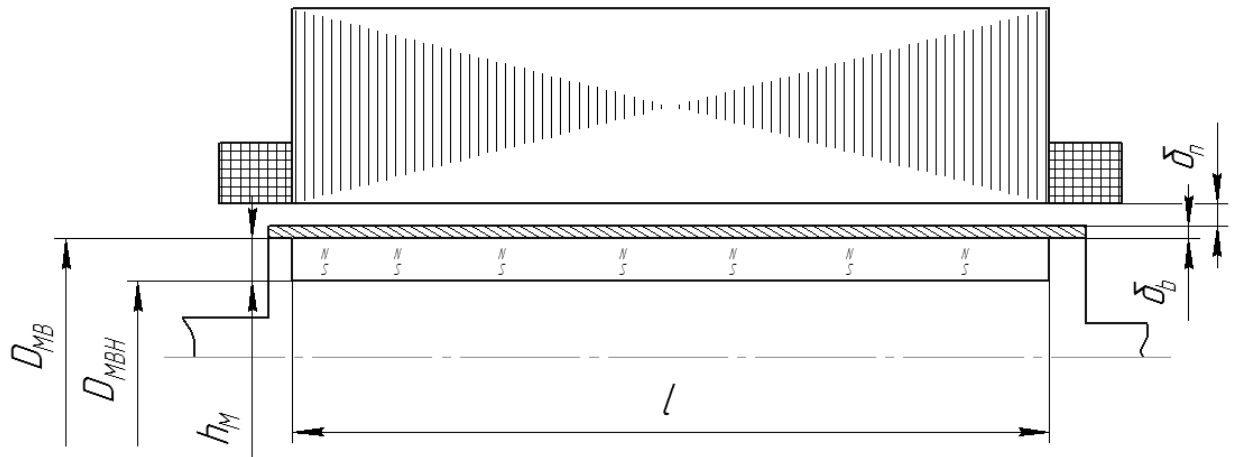


Рис. 2. Расчетная схема БМГ

Данная особенность БМГ при увеличении частоты вращения ротора, заключающаяся не в электромагнитных процессах, а в механических и технологических, не учитывается в (2) и соответственно может являться причиной погрешности при расчетах. А принимая во внимание ответственное назначение БМГ в САЭ, данная погрешность может являться причиной значительных экономических убытков.

В связи с этим целью данной работы является уточнение зависимости мощности БМГ от частоты вращения его ротора. При этом рассматривается БМГ представленный на рисунке 2.

Зависимость толщины бандажной оболочки от частоты вращения ротора может быть определена в следующем виде [9]:

$$\delta_b = \frac{n^2 \gamma R_{cp} (D_{MB}^2 - D_{MBH}^2)}{728 \sigma}, \quad (3)$$

где n – частота вращения ротора; γ – плотность материала бандажа; R_{cp} – средний радиус магнитов; D_{MB} – внешний диаметр магнитов; D_{MBH} – внутренний диаметр магнитов; σ – предел прочности материала немагнитного бандажа.

С учетом того, что максимально возможный внешний диаметр ротора, определяется по условиям механической прочности и также зависит от частоты вращения ротора [10]:

$$D_p = D_{MB} = \frac{c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}}, \quad (4)$$

γ_{pm} – плотность материала ВПМ; c_p – постоянный коэффициент; k_p – коэффициент запаса прочности ВПМ; σ_{pm} – предел прочности материала ВПМ.

Средний радиус ВПМ:

$$R_{cp} = \frac{1}{4} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right), \quad (5)$$

И соответственно толщина бандажной оболочки:

$$\delta_b = \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) \left[h_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) h_M \right]}{2912 \sigma}, \quad (6)$$

Представляя магнитную индукцию в воздушном зазоре БМГ как зависимость от величины зазора:

$$B_{\delta} = \frac{b_m B_r}{\tau \alpha_i \left(1 + \frac{\delta B_r k_{\delta}}{\mu_0 H_c h_M \kappa} \right) \kappa}, \quad (7)$$

где B_r, H_c – остаточная индукция и коэрцитивная сила ВПМ соответственно; τ – полюсное деление ротора; k_{δ} – коэффициент воздушного зазора; h_M – высота ВПМ; b_m – ширина ВПМ; κ – коэффициент рассеяния магнитной системы ротора; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

С учетом (3) индукция в рабочем зазоре БМГ с ВПМ при холостом ходе определяется в виде:

$$B_{\delta} = \frac{b_m B_r}{\tau \alpha_i \left(1 + \frac{\delta_n B_r k_{\delta}}{\mu_0 H_c h_M \kappa} + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + h_M \right) \left[k_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + h_M \right) B_r k \right]}{2912 \sigma \mu_0 H_c \kappa} \right) \kappa}, \quad (8)$$

И соответствующей ей магнитный поток:

$$\Phi_{\delta} = \frac{b_m l_m B_r}{1 \kappa \frac{\delta_n B_r k_{\delta}}{\mu_0 H_c h_M \kappa} + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + h_M \right) \left[k_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + h_M \right) B_r k \right]}{2912 \sigma \mu_0 H_c \kappa}}, \quad (9)$$

Анализируя выражения (8), (9) можно сделать следующий вывод, что в БМГ при увеличении частоты вращения ротора происходит снижение магнитной индукции в зазоре, вызванное увеличением толщины бандажной оболочки. В связи с этим необходимо произвести корректировку выражения (1) с учетом описанных выше особенностей.

Линейная токовая нагрузка БМГ представляется в виде:

$$A = \frac{2m N_{\phi} I_{\phi}}{\pi D_{cm} a_1}, \quad (10)$$

где m – число фаз; N_{ϕ} – число витков в фазе; I_{ϕ} – фазный ток; D_{cm} – диаметр расточки статора; a_1 – количество параллельных ветвей в фазе.

Представляя число витков в фазе как функцию магнитного потока и частоты вращения:

$$N_{\phi} = \frac{60 U_{\phi} \sqrt{2(d) + \sin}}{4,44 k_{\phi} k_{\phi 0} n p}, \quad (11)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение; k_{ϕ} – коэффициент формы поля; $k_{\phi 0}$ – обмоточный коэффициент; p – число полюсов БМГ.

Диаметр расточки статора также представляется как функция частоты вращения ротора БМГ:

$$D_{cr} = \frac{\delta_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + 2 n \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + h_M \right) \left[h_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k_{\sigma}}} + h_M \right) h_M \right]}{1456 \sigma}, \quad (12)$$

Тогда линейная токовая нагрузка БМГ, с учетом изменения воздушного зазора представляется в виде:

$$A = \frac{120mU_{\phi}I_{\phi}\sqrt{2(1+\sin\alpha)} \left[\frac{\delta_n B_r k_{\delta}}{\mu_0 H_c h_M \kappa} + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) \left[h_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) B_r k \right]}{2912 \sigma \mu_0 H_c \kappa} \right]}{\pi 4,44 k_{\phi} k_{\sigma} b_m l_m B_r n p a_1 \left[\frac{c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + 2 \delta_n + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) \left[h_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) h_M \right]}{1456 \sigma} \right]}}, \quad (13)$$

Так как:

$$P = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \quad (14)$$

Помножив и разделив правую часть выражения (13) на $\sqrt{3} \cos \varphi$ и представим в следующем виде:

$$\chi = \frac{120\sqrt{2(1+\sin\alpha)} \left[\frac{\delta_n B_r k_{\delta}}{\mu_0 H_c h_M \kappa} + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) \left[h_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) B_r k \right]}{2912 \sigma \mu_0 H_c \kappa} \right]}{7,698 k_{\phi} k_{\sigma} b_m l_m B_r n p a_1 \left[\frac{c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + 2 \delta_n + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) \left[h_M^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p}{n^2} \sqrt{\frac{\sigma_{pm} g}{\gamma_{pm} k \sigma}} + h_M \right) h_M \right]}{1456 \sigma} \right]} \cos \varphi}, \quad (15)$$

где $\chi = \frac{A}{P}$.

С целью визуализации полученных результатов, производится численный анализ выражения 15 в математическом пакете *Matchad*, результаты которого представлены на рисунке 3.

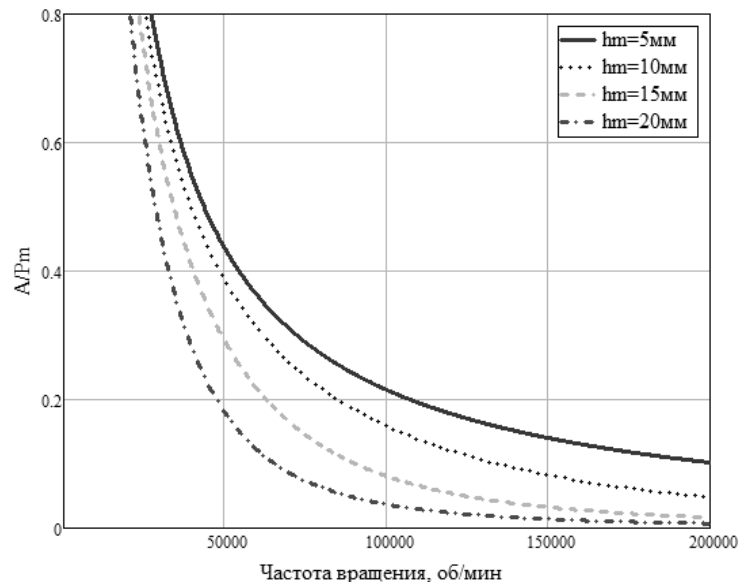


Рис. 3. Зависимость отношения линейной токовой нагрузки БМГ к потерям в меди от частоты вращения ротора при различных значениях h_M

Обсуждение. Анализ полученных результатов показал, что при увеличении частоты вращения ротора отношение линейной токовой нагрузки к мощности БМГ снижается, другими словами линейная токовая нагрузка БМГ либо убывает, что противоречит природе исследуемого процесса, либо возрастает много медленнее, чем его мощность.

Очевидно, что при увеличении толщины ВПМ, мощность БМГ возрастает, а отношение его линейной токовой нагрузки к мощности снижается. При этом рассматривая полученные результаты для различных значений толщины ВПМ, можно сделать вывод, что повышение

мощности БМГ, путем повышения толщины ВПМ эффективно только в области частот вращения от 12 000 до 150 000 об/мин. В области частот вращения ротора не входящих в этот промежуток, увеличении толщины ВПМ в 2 раза приводит к незначительному увеличению мощности.

Для инженерных расчетов более удобным видом является выражение отражающее зависимость мощности от прочих параметров. Тогда (15) представляется в следующем виде:

$$P = \frac{7,69 \times 10^{-6} A_{\phi} k_{\phi} k_{\sigma} b_m l_m B_r n p a_1 \left[\frac{c_p \sqrt{\sigma_{pmg}}}{n^2 \sqrt{\gamma_{pmk\sigma}}} + 2 \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p \sqrt{\sigma_{pmg}}}{n^2 \sqrt{\gamma_{pmk\sigma}}} + h_M \right) \left[h_M^2 \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p \sqrt{\sigma_{pmg}}}{n^2 \sqrt{\gamma_{pmk\sigma}}} + h_M \right) h_M \right]}{1456\sigma} \right] \cos \varphi}{120 \sqrt{2(1 + \sin \delta)} \left[1 + \frac{\delta_n B_r k_{\delta}}{\mu_0 H_c h_M k} + \frac{n^2 \gamma \left(\frac{2c_p \sqrt{\sigma_{pmg}}}{n^2 \sqrt{\gamma_{pmk\sigma}}} + h_M \right) \left[h_M^2 \frac{1}{2} \left(\frac{2c_p \sqrt{\sigma_{pmg}}}{n^2 \sqrt{\gamma_{pmk\sigma}}} + h_M \delta \right) B_r k \right]}{2912\sigma \mu_0 H_c k} \right] k^2}, \quad (16)$$

Таким образом, получено выражение, в котором отражается зависимость мощности БМГ от частоты вращения с учетом изменения при этом величины воздушного зазора.

Результаты. В результате исследования выведена аналитическая зависимость мощности бесконтактного магнитоэлектрического генератора от частоты вращения с учетом изменения толщины бандажной оболочки.

Установлено, что повышение мощности бесконтактного магнитоэлектрического генератора, путем повышения толщины высококоэрцитивных постоянных магнитов более всего эффективно в области частот вращения от 12 000 до 150 000 об/мин.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании и оптимизации бесконтактных магнитоэлектрических генераторов.

Примечания:

1. Elliott Energy Systems, Inc. 2901 S.E. Monroe Street Stuart, FL 34997 772-219-9449. www.tapower.com. Rick Lucas – Sales Engineer. January 17, 2003.
2. Advanced MicroTurbine System. REVIEW © 2002. Capstone Turbine Corporation: www.microturbine.com. Matthew Stewart. March 12, 2002.
3. Риккинен А. Эффективное решение – микротурбины // СтройПрофиль. 2011. №1(87). С. 46–48.
4. Герасин А.А., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Особенности применения гибридных магнитных подшипников в быстроходных магнитоэлектрических машинах // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/105-6935>
5. Герасин А.А. Имитационная модель электромеханических преобразователей энергии с учетом процессов в подшипниковых опорах / А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, М.М. Зюков, В.Е. Вавилов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. №2. с.35–39.
6. Исмагилов Ф.Р. Определение силовых характеристик радиальных магнитных подшипников с осевой намагниченностью в зависимости от геометрических параметров / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электричество. 2013. №5. С. 40-45
7. Хайруллин И.Х. Высокоскоростная магнитоэлектрическая машина с вертикальным валом / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Д.Ю. Пашали // Пат. 2475928 РФ, МПК H02K 21/22, Заявлено 16.06.2011; Опубл. 20.02.2013, Бюл. №5.
8. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами – Москва: Энергоатомиздат, 1988. 279 с.
9. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. М.: Энергоатомиздат, 1985. 169 с.
10. Шаров В.С. Особенности расчета магнитного подвеса роторов высокоскоростных электродвигателей М.: МЭИ, 1982. 84 с.

References:

1. Elliott Energy Systems, Inc. 2901 S.E. Monroe Street Stuart, FL 34997 772-219-9449. www.tapower.com. Rick Lucas – Sales Engineer. January 17, 2003.
2. Advanced MicroTurbine System. REVIEW © 2002. Capstone Turbine Corporation: www.microturbine.com. Matthew Stewart. March 12, 2002.
3. Rikkinen A. Effektivnoe reshenie – mikroturbiny // StroiProfil'. 2011. №1(87). s. 46–48
4. Gerasin A.A., Ismagilov F.R., Khairullin I. Kh., Vavilov V.E. Osobennosti primeneniya gibridnykh magnitnykh podshipnikov v bystrokhodnykh magnitoelektricheskikh mashinakh // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/105-6935>
5. Gerasin A.A. Imitatsionnaya model' elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii s uchetom protsessov v podshipnikovykh oporakh/ A.A. Gerasin, F.R. Ismagilov, I.Kh. Khairullin, M.M. Zyukov, V.E. Vavilov // Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii. 2013. №2. s.35–39.
6. Ismagilov F.R. Opredelenie silovykh kharakteristik radial'nykh magnitnykh podshipnikov s osevoi namagnichennost'yu v zavisimosti ot geometricheskikh parametrov/ F.R. Ismagilov, I.Kh. Khairullin, V.E. Vavilov // Elektrichestvo. 2013. №5. S.40-45
7. Khairullin I. Kh. Vysokoskorostnaya magnitoelektricheskaya mashina s vertikal'nym valom /I.Kh. Khairullin, F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, D.Yu. Pashali // Pat. 2475928 RF, MPK N02K 21/22, Zayavleno 16.06.2011; Opubl. 20.02.2013, Byul. №5
8. Balagurov V.A. Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami. Moskva: Energoatomizdat, 1988. 279 s.
9. Ledovskii, A.N. Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami / A.N. Ledovskii. M. : Energoatomizdat, 1985 . 169 s.
10. Sharov V.S. Osobennosti rascheta magnitnogo podvesa rotorov vysokoskorostnykh elektrodvigatelei M.: MEI, 1982. 84 s

УДК 621.313

Влияние частоты вращения на параметры бесконтактного магнитоэлектрического генератора

¹Флюр Р. Исмагилов

²Вячеслав Е. Вавилов

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия
450000, республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса 12
Доктор технических наук, профессор
E-mail: S2_88@mail.ru

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия
450000, республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса 12
ассистент
E-mail: S2_88@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача для развития децентрализованной энергетики в Российской Федерации – разработка и проектирование высокоскоростных бесконтактных магнитоэлектрических генераторов для микротурбинных установок на биогазе. На основе уравнений Арнольда и уравнений, характеризующих механическую прочность ротора, разработано выражение отражающее зависимость мощности высокоскоростного бесконтактного магнитоэлектрического генератора от частоты вращения его ротора с учетом изменения величины воздушного зазора. Разработанное выражение может использоваться как для проектирования электрических машин подобного класса, так и в качестве одноцелевой или многоцелевой оптимизационной функции. Проведены исследования влияния толщины высококоэрцитивных постоянных магнитов ротора на мощность высокоскоростного бесконтактного магнитоэлектрического генератора при изменении частоты вращения.

Ключевые слова: высокоскоростной магнитоэлектрический генератор; высококоэрцитивные постоянные магниты; бандажная оболочка ротора.

UDC 532.5

Wave Reflection in SUBMARINE Canyons *¹ Katline Koblev A. Julio² Konstantin N. Makarov¹ Sochi State University, Russian Federation

26 a, Sovetskaya St., Sochi, 354000

PhD student

E-mail: anzor-the-black@yandex.ru

² Sochi State University, Russian Federation

26 a, Sovetskaya St., Sochi, 354000

Dr. (Hydraulic engineering), Professor

E-mail: ktk99@mail.ru

Abstract. Wave transformation in the areas of submarine canyons through their reflections on slopes is considered. As shown by field observations, including the destruction of the protective breakwater sections of the port of Imeretinskiy, and laboratory tests, the height of the waves on the windward edge of the parapet of submarine canyons in oblique approach of waves can be increased by 30–50 % compared with the waves outside the canyons. A mathematical model describing these effects and can simulate the excitement of the field in the areas of submarine canyons.

Keywords: Submarine canyon; canyon brow; shallow zone; wave height; wave approach angle; oblique reflection; the reflection coefficient.

Введение. По классификации, предложенной одним из основоположников исследований подводных каньонов Ф. Шепардом [7], под подводными каньонами понимаются извилистые долины V-образного профиля с многочисленными притоками, пересекающими материковый склон.

Проблемы распространения волн в зонах подводных каньонов привлекли к себе пристальное внимание исследователей после строительства берегозащитных сооружений в этих зонах. На ряде участков побережий (Имеретинская низменность в Адлерском районе г. Сочи, Бзыбь-Пицундская литодинамическая система в Абхазии, Рионская литодинамическая система в Грузии и другие), где берегозащитные сооружения располагались против вершин каньонов, произошло их повреждение или разрушение. При этом сооружения на соседних участках оказались вполне устойчивы [1, 6].

Попытка обоснования увеличения высот волн в зонах подводных каньонов была предпринята в работе [4]. В ней исследовалась концентрация энергии волн в зоне их обрушения.

Однако известно, что увеличение высот волн на берегах с подводными каньонами наблюдается также в мелководной зоне при косом подходе волн к осям каньонов.

В данной работе дается математическое обоснование увеличения высот волн в прибрежной мелководной зоне при косом подходе волн к осям подводных каньонов за счет их отражения.

Материалы и методы.

Во время строительства нового морского порта Имеретинского, возведенного на побережье Имеретинской низменности в Адлерском районе г. Сочи, изобилующей подводными каньонами, в декабре 2009 г. штормом были повреждены две секции строящегося оградительного сооружения. При этом разрушенные секции располагались не на осях подводных каньонов, а между ними – рис. 1.

* Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР № 7.3694.2011 Сочинского государственного университета.

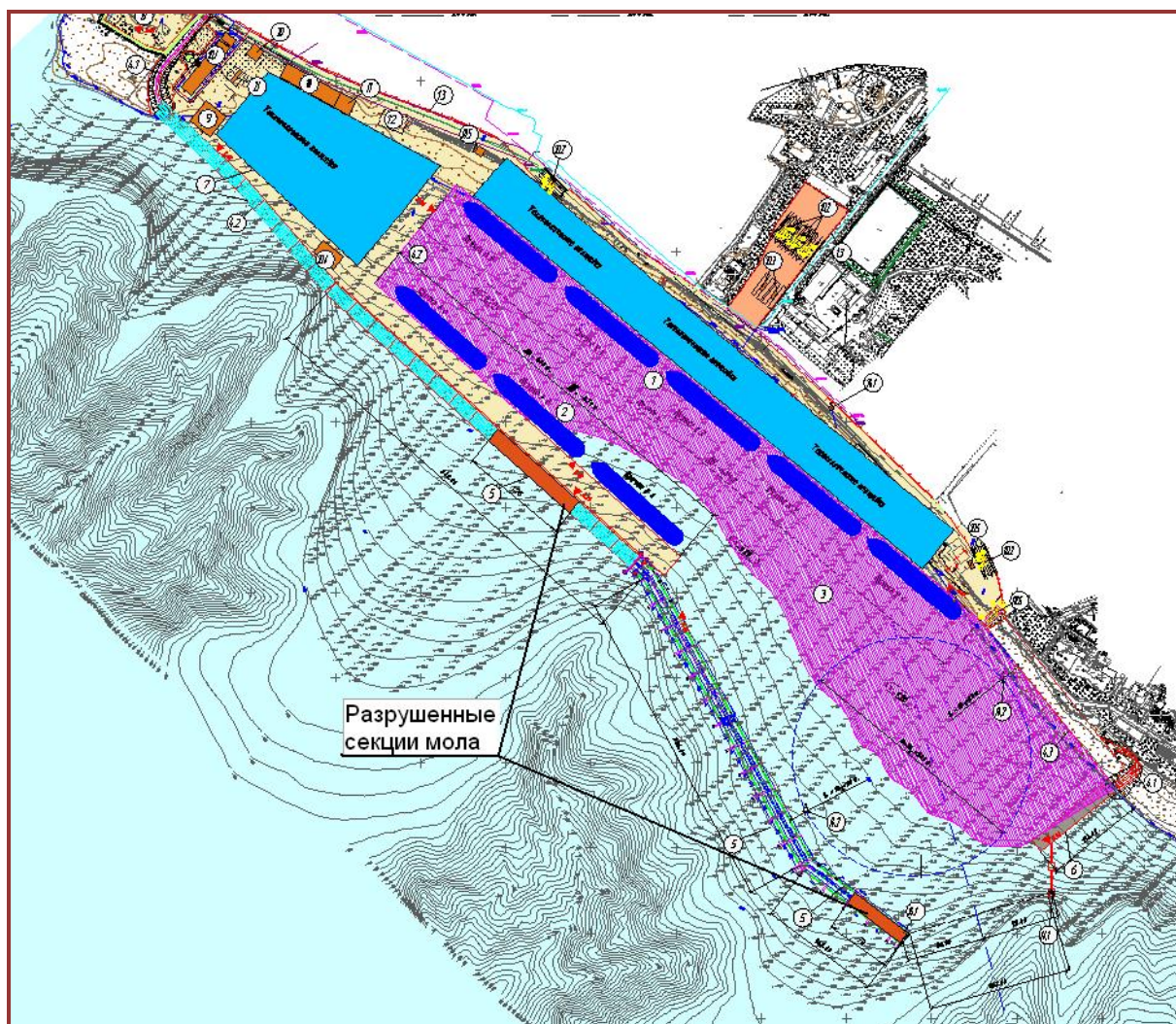


Рис. 1. План порта Имеретинского с разрушенными секциями оградительного мола

После аварии в порту Имеретинском было выполнено гидравлическое моделирование волнения на акватории, прилегающей к порту, на пространственной модели в волновом бассейне Научно-исследовательского центра (НИЦ) «Морские берега» (г. Сочи).

В процессе моделирования в шторме от ЮЗ направления в точках, соответствующих зонам разрушений мола наблюдалось существенное (до 1.5 раза) увеличение высот волн по сравнению с соседними участками. Таким образом, модельные исследования в полной мере воспроизвели картину реального шторма.

Математическое обоснование увеличения высот волн на наветренных участках акваторий, прилегающих к подводным каньонам, заключается в следующем.

В случае косо́го подхода волн к оси каньона, имеет место двойное неполное косое отражение волн – от передней и задней по отношению к подходящей волне бровок каньона [3]. Это приводит к образованию картины косой интерференции волн с наветренной стороны каньона – рис. 2.

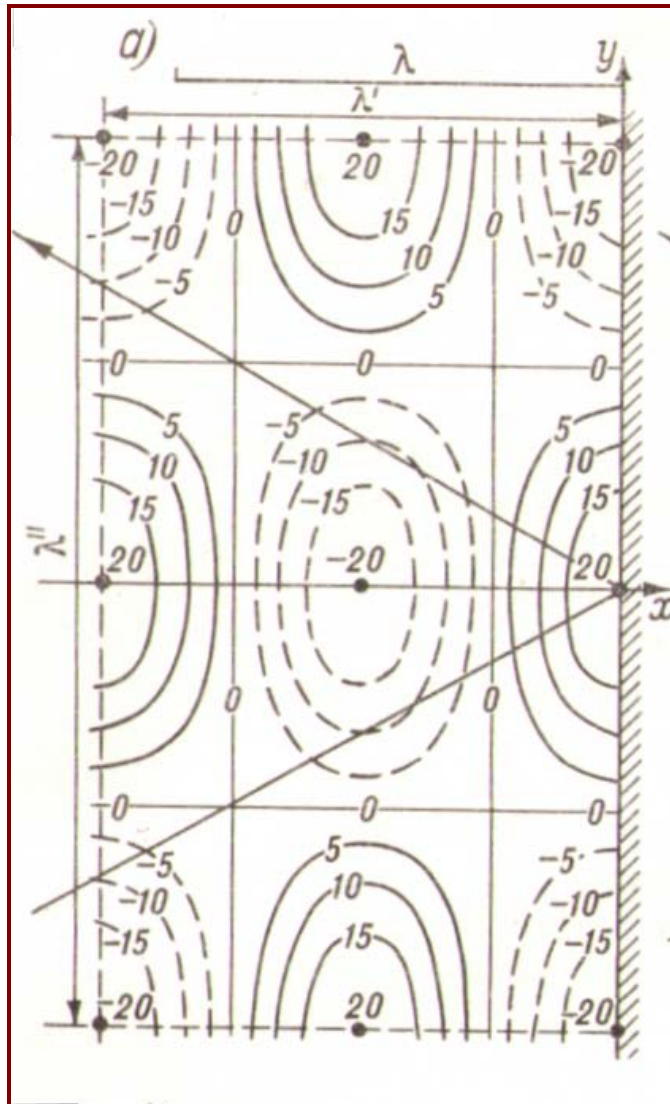


Рис. 2. Свободная поверхность при косом отражении волн от преграды, лежащей «справа» от подхода волны

Возвышение свободной поверхности η , являющееся результатом интерференции падающей и отраженной волн, выразится в виде:

$$\eta = \eta_n + \eta_{от} = (h + \kappa_{от} h) \cos k'x \cos (\sigma t - k'y), \quad (1)$$

где $\kappa_{от}$ – коэффициент отражения волны от наветренной бровки каньона,

$k' = k \cos \alpha$, $k'' = k \sin \alpha$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина, h – высота исходной волны, $\sigma = 2\pi/T$, T – период волны.

Суммарное колебание свободной поверхности можно представить себе как прогрессивную волну длиной $\lambda'' = 2\pi/k''$, движущуюся вдоль оси y , с амплитудой, косинусоидально изменяющейся вдоль оси x .

Максимальные значения амплитуда имеет при

$x = -n\pi/k'$ (где $n=0, 1, 2, \dots$), в то время как при $x = -(2n+1)\pi/2k'$ уровень будет неизменно оставаться в среднем положении. Водная поверхность покрыта поднятиями и впадинами в шахматном порядке, и вся эта система перемещается вдоль преграды со скоростью $c'' = c_0 \operatorname{cosec} \alpha = c_0 \operatorname{cosec}(\delta/2)$, где $c_0 = (gh)^{0.5}$ – скорость каждой из первоначальных – падающей и отраженной волн.

Таким образом, для моделирования волновых полей в зонах подводных каньонов, необходимо рассчитать коэффициенты отражения и прохождения волн через наветренную и подветренную бровки каньона.

Гашение и отражение волн подводным каньоном (рис. 3) происходят аналогично гашению и отражению наброской или волноломом за счет изменения свойств волнопроводящей среды, в данном случае – глубины.

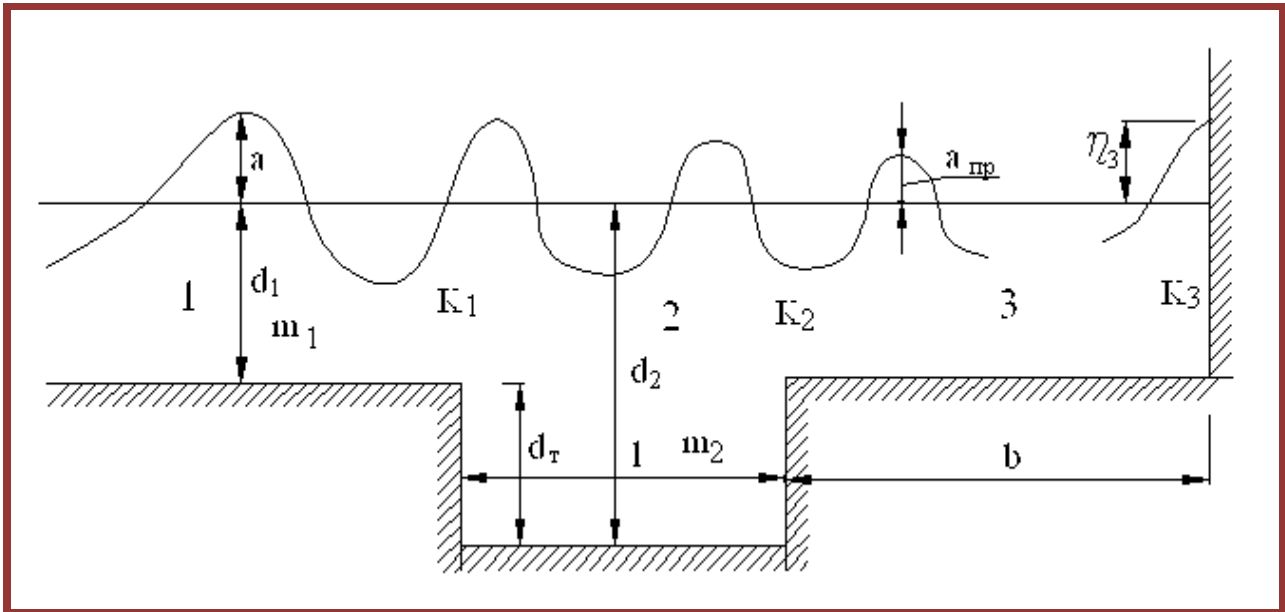


Рис. 3. Схема к расчету взаимодействия волн с подводным каньоном

На рис. 3 a – амплитуда исходной волны; $a_{пр}$ – амплитуда прошедшей волны; d_1 – глубина на подходе волн к каньону; d_2 – глубина в зоне каньона; $d_τ$ – глубина каньона от дна; K_1, K_2, K_3 – коэффициенты отражения волн от морской и береговой бровок каньона и от береговой границы; l – ширина каньона; b – расстояние от подветренной бровки каньона до ближайшего мыса; m_1, m_2 – волновые числа на подходах к каньону и в зоне каньона

В линейном приближении, уравнения движения жидкости в зонах 1, 2, 3 имеют вид [2]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + d \frac{\partial U}{\partial x} = 0; \tag{2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \tag{3}$$

где U – осреднённая по глубине горизонтальная скорость жидкости; t – время; x – расстояние по горизонтали; η – возвышение свободной поверхности; d – глубина; g – гравитационное ускорение.

Волновые числа в зоне вне каньона:

$$m_1 = 2\pi/\lambda_1, \tag{4}$$

в зоне каньона

$$m_2 = 2\pi/\lambda_2, \tag{5}$$

где длины волн вне зоны каньона и в зоне каньона определяются из выражений [2]:

$$\lambda_1 = T \times ((g \times \lambda_1 / 2\pi) \times th(2\pi \times d_1 / \lambda_1))^{0,5}, \tag{6}$$

$$\lambda_2 = T \times ((g \times \lambda_2 / 2\pi) \times th(2\pi \times d_2 / \lambda_2))^{0,5} \tag{7}$$

методом итераций. При этом в качестве первого приближения принимается длина волны на глубокой воде $\lambda_d = 1.56T^2$, T – период волны.

Начальные условия: $\eta(x) = 0, U(x) = 0$ при $t = 0$.

Граничные условия:

$$\eta(-\lambda) = a \cos(m_1(-\lambda) - \omega t), \tag{8}$$

$$U(-\lambda) = a(g/d)^{0.5}(\cos(m_1(-\lambda) - \omega t)).$$

Решение уравнений (2), (3) в зоне перед каньоном представляет собой линейную суперпозицию прямой волны с амплитудой a и отражённой волны с амплитудой aK_1 :

$$\eta_1 = \eta_{ПР1} + \eta_{ОТ1} = a[\cos(m_1x - \omega t) + K_1\cos(m_1x + \omega t)]; \quad (9)$$

$$U_1 = U_{ПР1} - U_{ОТ1} = a(g/d)^{0.5}[\cos(m_1x - \omega t) - K_1\cos(m_1x + \omega t)]. \quad (10)$$

В зоне за каньоном:

$$\eta_2 = K_{np} a[\cos(m_2(x-l) - \omega t) + K_3\cos(m_2(x-l+b) + \omega t)]. \quad (11)$$

Результаты.

Из изложенного следует, что определяющими параметрами подводных каньонов при их взаимодействии с волнами являются коэффициенты отражения K_1 , K_2 , коэффициент прохождения K_{np} , расстояние от подветренной бровки каньона до ближайшего мыса b , ширина каньона l и его глубина d_k . Коэффициент отражения от береговой границы K_3 должен быть всегда задан. Для непроницаемой береговой стены $K_3 = 1$, для открытой акватории или свободного пологого откоса $K_3 = 0$. Следовательно, для каньона $K_3 = 0$.

Определение коэффициентов K_1 , K_2 может быть выполнено теоретическим путем с учетом некоторых допущений. В частности, можно показать, что при $K_3 = 0$, выражения для коэффициентов отражения имеют вид:

$$K_2 = \frac{1 - \cos(m_2l)}{1 + \cos(2m_2l)}, \quad (12)$$

$$K_1 = \frac{K_2 \cos(m_2l)}{2 - K_2 \cos(m_2l)}. \quad (13)$$

Изложенная методика реализована в специальной компьютерной программе, которая была использована для моделирования волновых полей в расчетных штормах для участка расположения порта Имеретинского.

Примечания:

1. Имеретинская низменность. Природно-геологические условия, проблемы освоения // Под ред. И.П. Балабанова. М.: ООО «Издательский дом Недра», 2011. 330 с.

2. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. Л.: Гидрометеиздат, 1974, 367 с.

3. Некрасов А.В. Приливные волны в окраинных морях. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 367 с.

4. Радионов А.Е. Взаимодействие волн большой амплитуды с гидротехническими сооружениями в зонах влияния подводных каньонов.- Дисс. канд. техн. наук, С. Петербург, ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 2005.

5. Katline Koblev A. Julio, K.N.Makarov. Wave Run Up in Zones of Underwater Canyons // European Researcher, 2013. № 5-1 (48), pp.1185-1188.

6. Сафьянов Г.А., Меншиков В.А., Пешков В.М. Подводные каньоны – их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. – Краснодар, 2007, 378 с.

7. Шеппард Ф., Дилл Р. Подводные морские каньоны. - Л.: Гидрометеиздат, 1972.

УДК 532.5

Отражение волн в зонах подводных каньонов

¹ Катлине Коблев Анзор Хулио

² Константин Николаевич Макаров

¹ Сочинский государственный университет, Россия
354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Советская, 26 а
аспирант

E-mail: anzor-the-black@yandex.ru

² Сочинский государственный университет, Россия
354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Советская, 26 а
Доктор технических наук, профессор
E-mail: ktk99@mail.ru

Аннотация. Рассматривается трансформация волн в зонах подводных каньонов за счет их отражения от бровок. Как показали натурные наблюдения, включая разрушение секций оградительного мола порта Имеретинского, и лабораторные исследования, высоты волн на наветренных бровках подводных каньонов при косом подходе волн могут увеличиваться на 30–50 % по сравнению с волнами вне каньонов. Предлагается математическая модель, описывающая указанные эффекты и позволяющая моделировать поля волнения в зонах подводных каньонов.

Ключевые слова: Подводный каньон; бровка каньона; мелководная зона; высота волны; угол подхода волн; косое отражение; коэффициент отражения.

UDC 626.01

Calibration of Mathematical Model of the Island Pebble Beach *¹ Igor G. Kantargi² Nikolay K. Makarov¹ Moscow State Building University, Russian Federation

26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337

Dr. (Hydraulic engineering), Professor

E-mail: kantardgi@yandex.ru

² Sochi State University, Russian Federation

26 a, Sovetskaya St., Sochi, 354000

PhD student

E-mail: ktk99@mail.ru

Abstract. The mathematical model of transformation of waves and dynamics of pebble beaches on artificial island complexes is offered. Results of hydraulic modeling of dynamics of a pebble beach on the artificial island on the Southern coast of the Crimea near the cape Fiolent are given. The mathematical model is calibrated according to experiments and it is offered for optimization of beach protection constructions at design of island beaches.

Keywords: Artificial island complex; transformation of waves; beach protection constructions; dynamics of a pebble beach.

Введение. В ряде случаев создание искусственных пляжей и рекреационных территорий непосредственно в море на определенном удалении от берега в виде искусственных островных комплексов (ИОК) может оказаться экономически целесообразным. В этом случае возникает задача оптимизации параметров оградительного сооружения острова, а также сооружений для удержания островного пляжа.

Задача может быть решена как методом гидравлического моделирования на пространственных моделях, что весьма не дешево, так и математического моделирования с использованием компьютерных моделирующих систем, откалиброванных по данным натурных или лабораторных исследований.

В данной работе приводится пример разработки и калибровки компьютерной моделирующей системы для оптимизации пляжеудерживающих сооружений островных комплексов.

Материалы и методы. Для базы отдыха «Каравелла», расположенной на Южном берегу Крыма в районе мыса Фиолент (рис. 1) был запроектирован традиционный береговой вариант искусственного галечного пляжа.

Берег на участке проектирования характеризуется исключительно сложными условиями: береговой обрыв имеет высоту до 100 м, подводный склон приглубый, что обуславливает тяжелый волновой режим, естественный пляж отсутствует. Береговая линия имеет бухтовое очертание.

Традиционный береговой вариант пляжа включал камнеулавливающие стены, волнозащитную стену и набережную, буну-пирс и каменнонабросную шпору для удержания пляжеобразующего материала в объеме 12 тыс. м³, обеспечивающего надводную полосу пляжа площадью 2 тыс. м².

* Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР № 7.3694.2011 Сочинского государственного университета.

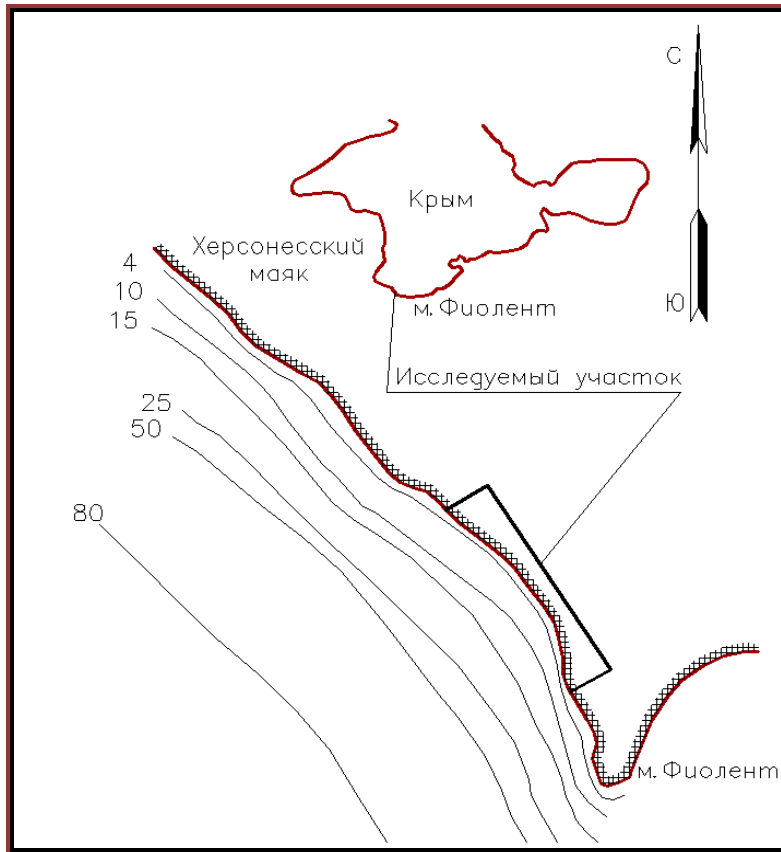


Рис. 1. Ситуационный план расположения проектного участка

Поскольку разработанный береговой вариант пляжного комплекса оказался весьма затратным, был разработан альтернативный – островной его вариант. На рис. 2 представлена схема островного варианта пляжного комплекса для рассматриваемого участка берега [1].

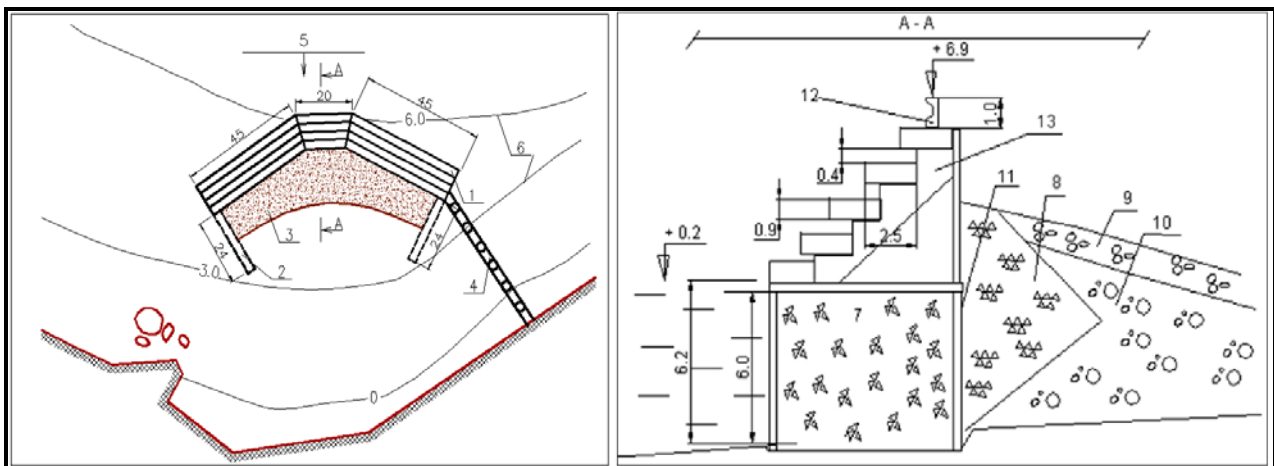


Рис. 2. Схема островного пляжного комплекса на м. Фиолент

На рис. 2 обозначены следующие элементы островного комплекса: 1 – верхнее сквозное откосно-ступенчатое строение; 2 – пляжеудерживающие шпоры; 3 – пляж; 4 – свайный мост; 5 – фронт волны; 6 – изобаты; 7 – каменная засыпка оболочки; 8 – обратный фильтр; 9 – галька; 10 – горная масса; 11 – ж/б оболочка; 12 – волноотбойный козырек; 13 – волновая камера.

Для оценки устойчивости искусственного галечного пляжа за оградительным сооружением острова было выполнено гидравлическое моделирование в волновом бассейне в масштабе 1:25 [1]. При этом изменялась длина оградительных пляжеудерживающих шпор (от 0 до 24 м). Результаты моделирования показаны на рис. 3.

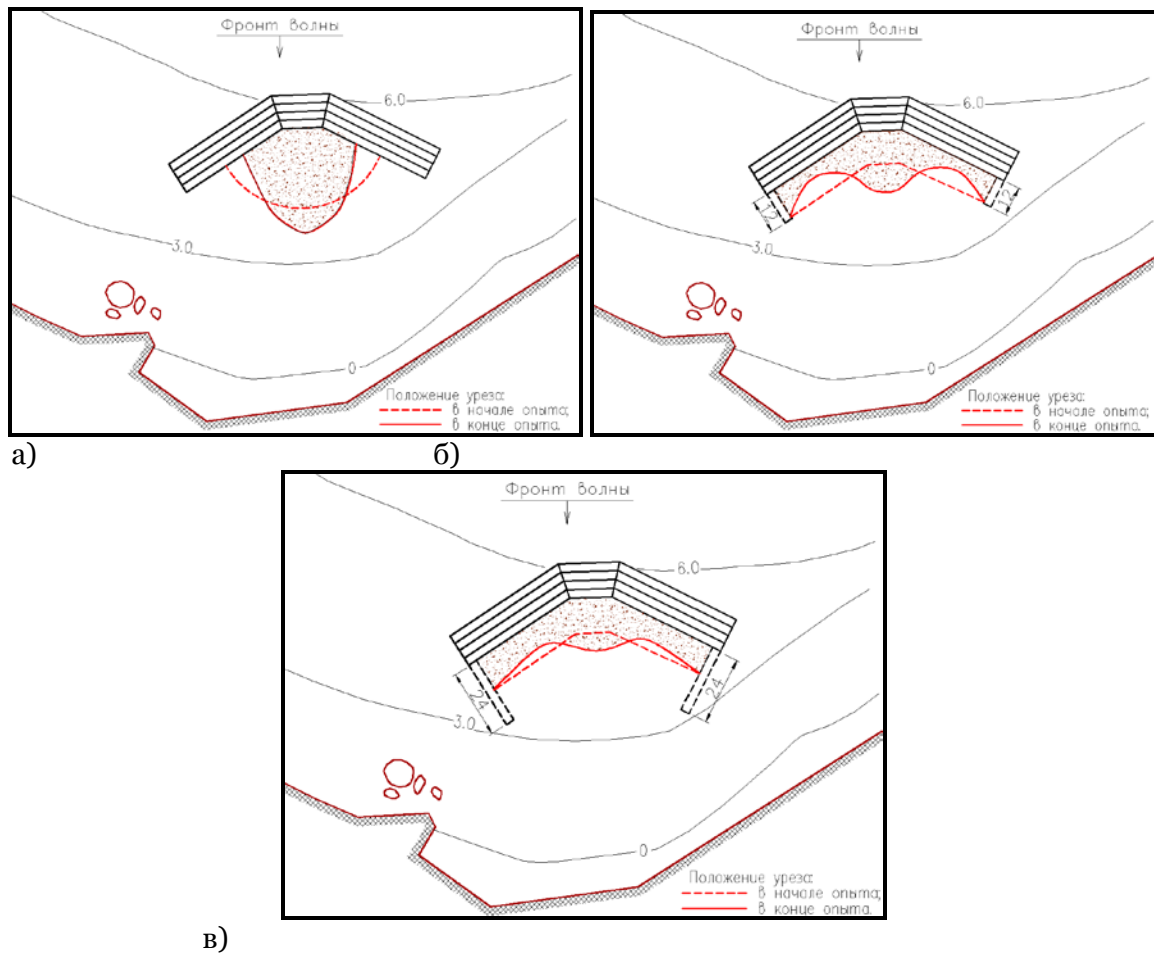


Рис. 3. Результаты гидравлического моделирования динамики пляжа при отсутствии оградительных шпор а), при длине шпор 12 м – б), при длине шпор 24 м – в)

В работе [2] представлена комплексная математическая модель для расчета параметров волн на акватории ИОК и динамики островного галечного пляжа.

Эта модель реализована в компьютерной программе, которая была откалибрована по данным приведенных лабораторных исследований.

Результаты. На рис. 4 показаны результаты математического моделирования волновых полей на акватории ИОК в расчетном шторме при различной длине пляжеудерживающих шпор.

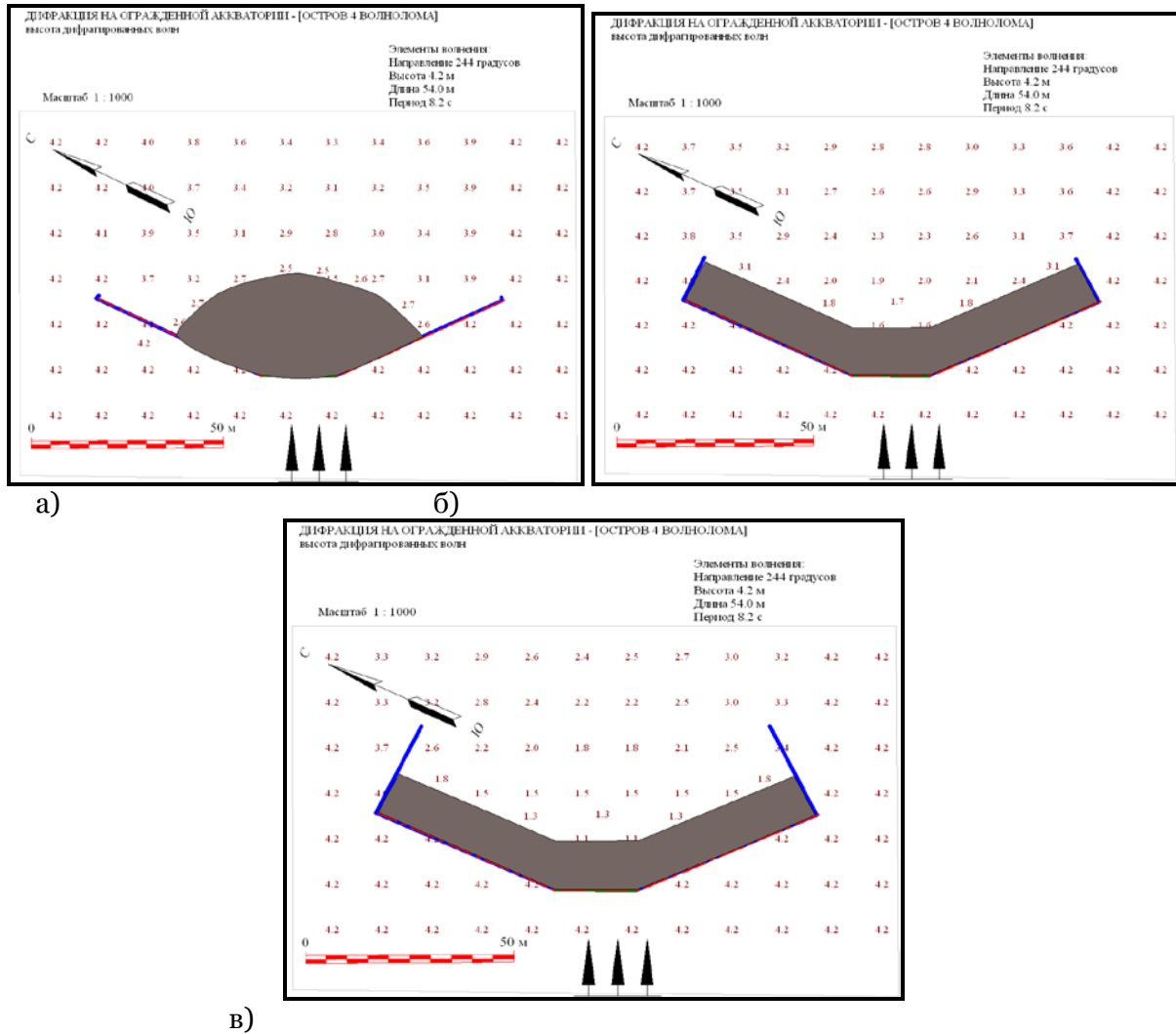


Рис. 4. Расчетное волновое поле на акватории ИОК при отсутствии пляжеудерживающих шпор а), при длине шпор 12 м – б), при длине шпор 24 м – в)

Основой для моделирования деформаций пляжа является фундаментальное уравнение сохранения массы вещества:

$$\partial d / \partial t + (1/(1-n)) \times (\partial Q_m / \partial x + \partial Q_m / \partial y) = 0, \quad (1)$$

где d - глубина; t - время; n - коэффициент пористости грунта; x, y - оси координат; Q_m - расход наносов.

Для практических расчетов величины расхода наносов имеется большое количество зависимостей, предложенных различными авторами. Все они в той или иной степени теоретико-эмпирические.

В разработанной математической модели [2] применяется зависимость для расчета транспорта галечных наносов, рекомендованная Черноморским отделением ЦНИИС (ныне Центр «Морские берега») [7], которая имеет вид:

$$Q_T = 0,087 \frac{\rho}{\rho_n} g \frac{h_{sur.1\%}^3 \bar{T} \Delta t}{k_{ок} d_{50\%}} \sin 2\alpha_{cr.u.}, \quad (2)$$

где $h_{sur.1\%}$ - высота волны 1 % обеспеченности в системе по линии последнего обрушения, м; \bar{T} - средний период волн, с; $d_{50\%}$ - медианный диаметр пляжеобразующего материала, м; ρ_n - объемный вес наносов; ρ - объемный вес воды; $\alpha_{cr.u.}$ - угол подхода волн к линии

обрушения; Δt - время действия данного волнения; $k_{ок}$ - коэффициент, учитывающий влияние степени окатанности пляжевого материала на интенсивность его перемещения [7].

Выражение для моделирования динамики береговой линии имеет вид:

$$\Delta Y = K \frac{\Delta Q \Delta t}{\Delta X d_{cr}}, \quad (3)$$

где ΔY – изменение положения береговой линии, Q – расход вдольберегового потока наносов, определяемый по формуле (2), t – время, X – расстояние вдоль берега, d_{cr} – глубина обрушения расчетных волн, K - калибровочный коэффициент, учитывающий изменение профиля пляжа в процессе шторма и подлежащий определению по лабораторным или натурным измерениям, что и было сделано в данной работе.

Результаты расчетов динамики пляжа для трех вариантов оградительного сооружения после калибровки модели приведены на рис. 5.

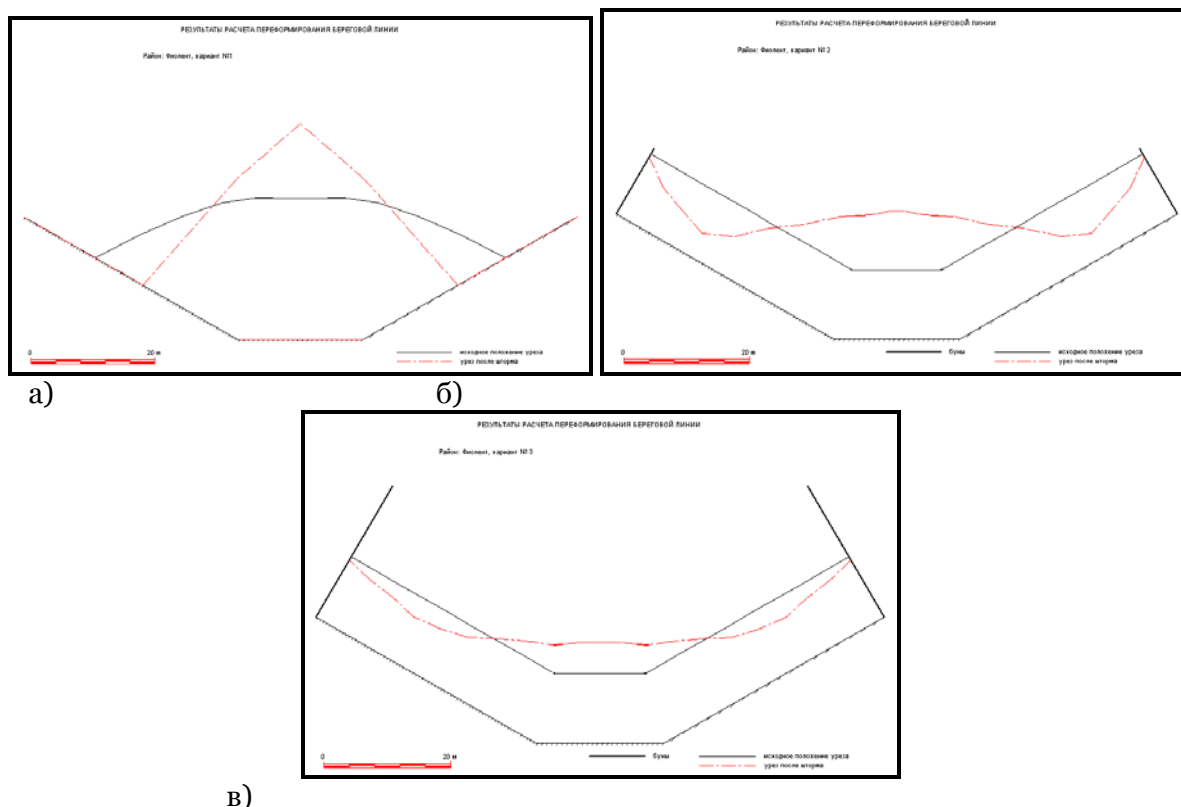


Рис. 5. Результаты математического моделирования динамики островного галечного пляжа при отсутствии пляжеудерживающих шпор а), при длине шпор 12 м – б), при длине шпор 24 м – в)

Заключение.

Сопоставление результатов гидравлического (рис. 3) и математического (рис. 5) моделирования показывает, что разработанная модель динамики пляжей на островных комплексах удовлетворительно соответствует данным физических экспериментов и может быть использована для прогноза переформирования пляжей ИОК и оптимизации их пляжеудерживающих сооружений.

Примечания:

1. Мальцев В.П., Макаров К.Н., Николаевский М.Ю. Разработка и исследование островного пляжного комплекса // Гидротехническое строительство. 1993. № 11. С. 15-17.
2. Макаров Н.К. Математическая модель динамики галечных пляжей искусственных островных комплексов // Гидротехника. 2012. № 2 (27). С. 84-87.

3. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Минрегионразвития РФ, 2012.
4. Лапко Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. М., 1990.
5. Макаров К.Н., Королев К.И. Будущее островных портов и гаваней // Мир транспорта, 2007, № 4, с. 100-105.
6. Макаров К.Н., Королев К.И. Конфигурация оградительных сооружений островных портов на Черноморском побережье Кавказа. / Строительство в прибрежных курортных регионах. // Материалы 5-й международной научно-практической конференции, г. Сочи, 12 – 17 мая 2008 г., С. 113–116.
7. СП 32-103-97. Проектирование морских берегозащитных сооружений. М.: Трансстрой, 1998.

УДК 626.01

Калибровка математической модели островного галечного пляжа

¹ Игорь Григорьевич Кантаржи
² Николай Константинович Макаров

¹ Московский государственный строительный университет, Россия
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26
д.т.н., профессор, кафедры водного хозяйства и морских портов
E-mail: kantardgi@yandex.ru

² Сочинский государственный университет, Россия
354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Советская, 26 а
аспирант
E-mail: ktk99@mail.ru

Аннотация. Предложена математическая модель трансформации волн и динамики галечных пляжей на искусственных островных комплексах. Приводятся результаты гидравлического моделирования динамики галечного пляжа на искусственном острове на Южном берегу Крыма в районе мыса Фиолент. Математическая модель откалибрована по данным экспериментов и предлагается для оптимизации пляжеудерживающих сооружений при проектировании островных пляжей.

Ключевые слова: Искусственный островной комплекс; трансформация волн; пляжеудерживающие сооружения; динамика галечного пляжа.

UDC 697

Significance of Thermal Comfort in Buildings and Its Relation to the Building Occupants

¹Muhammad Khairil Aizad Senin²Md Azree Othuman Mydin^{1,2}School of Housing, Building and Planning Universiti Sains Malaysia, Malaysia¹Building Surveying Graduate

E-mail: khairilaizad8@gmail.com

²Dr. Education

E-mail: azree@usm.my

Abstract. It should be pointed out that indoor climates in buildings is significant to the accomplishment of a building not only in making it comfortable, but also in deciding its energy consumption holistically and the thermal comfort of the occupants in the building. Thermal comfort can be defined as a psychological state of mind, often expressing a sensation of considerable heat or cold and it occurs when there is a balanced exchange of heat between a person's body and the environment, marked by the absence of regulatory sweating. Thermal comfort is imperative in both psychological and physical aspect where it could affects morale of the people. Based on their degree of thermal comfort, residents may complain, productivity may suffer and in some situations, people may refuse to work in a particular environment. This paper will discuss thoroughly the concept of thermal comfort, effects of thermal condition on occupants and some of the significant factors that influencing thermal comfort. In addition, thermal transition between the external environment and internal spaces of the buildings, human body interaction with surroundings and effective comfort range will also be presented to get a clear picture on how thermal comfort affects the building occupants comprehensively.

Keywords: thermal comfort; building occupants; human body; heat transfer; external environment.

1. Introduction

The term thermal comfort describes a psychological state of mind, often expressing a sensation of considerable heat or cold. In terms of bodily sensations, thermal comfort is the feeling of being cold, cool, slightly cooler, neutral, slightly warmer, warm, and hot. From a physiological point of view, thermal comfort occurs when there is a balanced exchange of heat between a person's body and the environment, marked by the absence of regulatory sweating.

According to Fanger (1973) there is no substantial statistical difference between women and men. It seen that the men skin temperature of thermal comfort is declining as the activity level increase as also shown by the negative correlation coefficient. Based on Fanger theory, there have 2 kinds of fluid loss by evaporation in the human body. Firstly from the latent. This is mean that the fluid loss comes from the latent respiration and vapour diffusion through the skin. The second way is active. This means that the through sweating.

Thermal comfort is important in both psychological and physical aspect. It also can affects morale of the people. Based on their degree of thermal comfort, residents may complain, productivity may suffer and in some situations, people may refuse to work in a particular environment. The factors of thermal comfort included heating, ventilation, air conditioning, and the activities of its occupants (Jones et al, 2007). Based on Nicol & Humphreys in 2002, a perfect indoor climate is important to the success of a building. It not only because makes its residents feel comfortable, but also because it affects the building's sustainability and energy consumption.

2. Effects of Thermal Condition on Occupants

According to previous studies, there are known effect of thermal condition on occupants which are decrease productivity and poor performance and health.

2.1 Decrease Productivity

Fanger (2005) reported that indoor air quality and thermal comfort have attracted growing

attention as people increasingly spend more time in buildings. This is same like the hostel cafeteria. The indoor condition of hostel cafeteria can make people spent more time in the cafeteria. Based on Hao et al. (2007), displacement ventilation gives good indoor air quality although it creates a huge vertical temperature gradient that leads to thermal discomfort, which may result in decreased productivity.

A comfortable interior environment can be achieved through increase energy consumption. Rosenlund (2000) reported that productivity can be increased by 5% - 10% just by improving indoor air quality. If the productivity is decrease, the building can be categorized as the unsuccessful building. The productivity of the buildings is very important to help the buildings achieve its goal and objective. For example, if the number of students that used hostel cafeteria to having a meal, discussion or study decrease, the shops and the cafeteria lost its' function.

2.2 Poor Performance and Health

Performance is progressively reduced as more people occupy the same indoor building space with no personal means of regulating temperature. According to Hescong (2002), students with the greatest access to window areas or daylight obtain 7% to 18% higher scores than other students. This mean that the cafeteria also need open ventilation and open space so that the daylight can be move in the cafeteria. So that the students that study or having discussion at the cafeteria can have comfort situation for them. Fisk (2000) reported that indoor environments significantly influence human health in terms of allergy, asthma, respiratory illness, headaches and productivity.

Higher air temperature and humidity trigger behaviour actions such as fanning one's self, drinking cold water, wearing light-coloured clothes, increase fan speed, going out opening doors and windows and so on. Some people take this action to solve the problem of thermal comfort. Unfortunately, this action does not solve the thermal comfort problem. Instead, the solution comes from a proper understanding of how climatic factor (air temperature, relative humidity, air velocity, and globe temperature) work together.

An indoor environment can achieve satisfactory thermal comfort through natural ventilation. Based on Liping et al. (2007) reported two strategies to help the indoor environment achieve thermal comfort. Firstly is providing higher wind speed (more than 1m/s). This is to ensure the ventilation is good and suitable to people. Secondly is use of suitable designs, materials, and shading device. This is from the design stage of the building. We must make sure the designs is good, many open space and ventilation, the materials that have been chosen is good quality and not give negative effect to people and good shading devices. This technique can reduce indoor temperature by 2°C - 3°C.

A wind-catcher is an effective means of providing night cooling. Jones et al. (2007) reported that it can also function effectively as part of a natural ventilation system.

3. Factors Influencing Thermal Comfort

Properly researched internal design conditions can provide the best thermal comfort conditions for its occupants. These thermal conditions despite being subjective sensations are important elements of building design. Therefore, the aspects discussed below must be examine further to achieve optimum thermal comfort for building occupants.

3.1 Environmental Factors

For the environmental factors, there have 4 factors can affecting thermal comfort which are air velocity (V), relative humidity (RH), air temperature (Ta) and mean radiant temperature (Tr).

3.1.1 Air Velocity

Most of people are sensitive to air velocity. So the air velocity can become the important factor of thermal comfort. Still or static air in indoor environments that are artificially created may cause occupants to feel tired and uncomfortable. Air velocity can increase heat loss through convection without any change in air temperature, although when air temperature is lower than skin temperature, convective heat loss increases significantly. This can happen in warm or humid conditions. In addition with that, physical activity also can increase air movement (Liping et al., 2007).

According to Nicol (1993) the measurement of air velocity poses a number of problems due to air's erratic movement and direction. The optimum solution is to maintain a small sphere of measurement that can be kept constant in size and characteristics.

3.1.2 Relative Humidity

Relative humidity (RH) is the amount of moisture carried in the air, expressed as a percentage of the maximum amount that can be carried at that temperature (Parsons, 2003). Relative humidity also the ratio of the mole fraction of water vapour present in the air to the mole fraction of water vapour present in saturated air at the same temperature and barometric pressure. For the simple words is relative humidity is equal to the ratio of the partial pressure or density of water vapour in the air to the saturation pressure or density of water vapour at the same temperature. Prevailing humidity is a significant determinant of heat stress level, but plays only a minor role in thermal comfort.

3.1.3 Air Temperature

Air temperature (T_a) can be defined as the temperature of the air surrounding human body. Besides that, air temperature also is an essential factor in heat stress. It is representative of that part of the surrounding environment that determines heat flow between the human body and the air. According to Parsons (2003) and Randall (2005), air temperatures are uneven. Usually variations in temperature occur continuously among human bodies, and the temperature of the air cross the majority of the surface of the human body does not necessarily determine the limit of heat flow. Neither is air temperature very near a clothed body representative, because it is affected by "boundary conditions". For example, even in cold environments, a layer of warmer air encircles the body.

Air temperature is assumed to be the most significant climate factor affecting thermal comfort. However, other factor should be taken into consideration as well.

3.1.4 Mean Radiant Temperature

Radiant temperature (T_r) is heat transferred from a higher-temperature mass to a lower-temperature mass with no effect on the intervening space. According to ASHRAE Standard (55-1992), mean radiant temperature is the uniform temperature of an imaginary room or enclosure at which radiant heat transfer from the human body is balanced with the surrounding radiant heat transfer. The mean radiant temperature is defined by the ISO in relation to the human body, which is why spherical globe thermometers used to measure heat stress give a reasonable approximation of a seated person's body shape.

In an occupied space, the temperature of the floor, walls and ceiling may be very close to that of the air. Sometimes, radiant temperature is constant in all directions and essentially the same as air temperature. Similarly, in spaces with radiant floors or other forms of radiant heating, average radiant temperature exceeds air temperature during the heating season.

3.2 Individual Factors

There have 2 individual factors that can affect the thermal comfort. Clothes and activity are two individual factors that have significant correlation with thermal comfort.

3.2.1 Clothes

Human can control the exchange of heat between the body and its surroundings to a large extent though changes in clothing. Clothes can react as a barrier against heat transfer and reduce the sense of object difference in air temperature and velocity. According to the ASHRAE Standard (55-1992) on covered areas of the body, clothing acts as an insulator that slows down the heat loss from the body, enhancing endurance and comfort at lower temperatures. To know the level of thermal comfort of the place, information on the occupants' clothing must be obtained because the thermal resistance of their clothes provide heat transfer between the human body and the environment. Therefore, the "Clo" value is used as a numerical representation of clothing, and acts similarly to thermal resistance: $1 \text{ Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$. Evaporative resistance, meanwhile, is a measure of moisture permeability. It affects both latent heat transfer from the skin through the layer of clothing and evaporative heat loss from the skin surface. Based on Fanger (1973), the interaction between activity and thermal aspects of clothing can be evaluated with reasonable precision by considering the usage of the room being occupied. Table 1 shows typical insulation values for clothing sets.

Table 1:

Typical insulation values for clothing

Garment description	Clo value	Garment description	Clo value
Bra	0.01	Pantyhose/stocking	0.02
Panties	0.03	Sandals/thongs	0.02
Men's brief	0.04	Shoes	0.02
T-shirt	0.08	Slippers	0.03
Sleeveless/scoops-neck blouse	0.13	Short shorts	0.06
Short-sleeve knit sport shirt	0.17	Walking shorts	0.08
Short-sleeve dress shirt	0.19	Straight trousers (thin)	0.15
Long-sleeve dress shirt	0.25	Straight trousers (thick)	0.24
Long-sleeve flannel shirt	0.34	Sweat Pants	0.28
Skirt (thin)	0.14	Sleeveless vest (thick)	0.22
Sleeveless vest (thin)	0.10	Short-sleeve short robe (thin)	0.34
Sleeveless vest (thick)	0.17	Short-sleeve pajamas (thin)	0.42
Long-sleeve Pajamas (thick)	0.57	Long-sleeve long gown (thick)	0.46
Long-sleeve Long wrap robe (thick)	0.69	Long-sleeve short wrap robe (thick)	0.48

(Source: ASHRAE standard – 55-1992)

3.2.2 Activity

The impact of metabolic rate on thermal comfort is critical. Human bodies continuously generate heat through metabolism, which is defined by the ASHRAE Standard (55-1992) as “the rate of energy production of the body” and is expressed in a standard unit called met. Physical work will produce heat, and the more heat we produce, the more we need to lose it in order to maintain a stable core temperature and avoid overheating. The average heat production by the body known as the metabolic rate. Metabolic rate is measured as 1 met = 58.2 w/m², and comprises all of the heat processes due to chemical reactions in the body. Table 2 shows typical metabolic rates for specific activities.

Table 2:

Typical metabolic rates for activity

Activity	Met	w/m ²
Reclining	0.8	46.6
Seated and quiet	1.0	58.2
Sedentary activity (office, dwelling, lab, school)	1.2	69.8
Standing, relaxed	1.2	69.8
Light activity, standing (shopping, lab, light industry)	1.6	93.1
Medium activity, standing (shop assistant, domestic work, machine work)	2.0	114.4
High activity (heavy machine work, garage work, if sustained)	3.0	174.6

(Source: ASHRAE standard – 55-1992)

3.3 Other Factors

In addition to human, individual and environmental factors, other factors influencing thermal comfort include acclimatization, diet, body build, and health conditions. According to Fanger (1970) body build, that is, surface to volume ratio, has an effect on thermal comfort. Besides that, Koenigsberger et al. (1974) reported that age and sex influence thermal preference.

Huizenga et al. (2006) reported that aside from other factors affecting thermal comfort include acclimatization, age, sex, body form, health condition, fat stored under the skin, quality of activity and system diet. Rosenlund (2000) reported that when adapting to the climate of a specific region or to a new season in the year, changes in the metabolic system and blood circulation affect people's perception of comfort. In such times, older people adapt more slowly than the young, and metabolism rates decrease for women and increase for men (Griefahn et al. 2001).

4. Thermal Transition between the External Environment and Internal Spaces of the Buildings

Basically when solar radiation falls on the walls of a building, part of it is reflected back into the surrounding atmosphere. The other part is absorbed, increasing the surface temperature of the outer wall and merging with the indoor air of the building. In other words, heat is absorbed and transferred into the building via three processes which are radiation, conduction and convection (Cowan 1980). Figure 1 shows the thermal transfer in space.

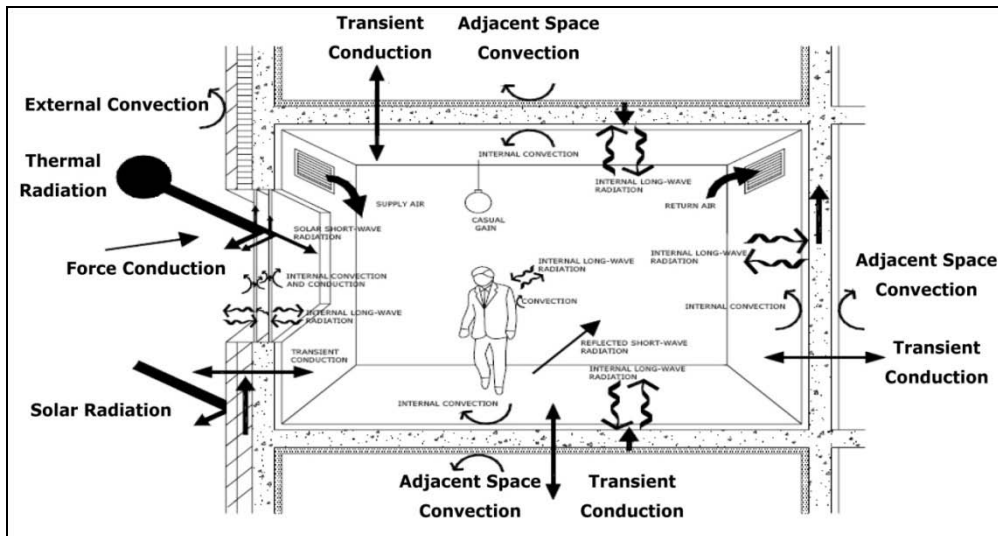


Figure 1: Thermal transfer in a space (Source: Energy Plus, 2009)

4.1 Thermal Convection

Thermal convection can be divided into two types. First, natural or free convection is the process whereby a fluid moves due to variations in its density. These variations result from temperature changes. Second, forced convection occurs when the liquid is moved by mechanical means, such as through pumps, fans, or the wind. In addition, heat can be transferred via convection from a surface to a liquid or surrounding gas, or vice versa. If the exterior surface is at a higher temperature than the air, heat is transmitted from the surface to the neighbouring air via conduction, because of the alteration in the density of the heated air. This phenomenon causes attraction resulting from variations in the density of air currents; the impact of this trend on the movement of air temperature is much higher than if the air is completely motionless (Thomas 2006).

4.2 Thermal Conduction

The flow of heat through molecules from molecules with larger thermal energy to those with the least thermal energy is called thermal conduction. Nearly all heat exchange by conduction happens between the building frame and the ground, and this occurrence becomes most noticeable in very cold climates. According to Thomas (2006), thermal conduction is the transport of heat

energy from the warmer part to the colder part of the same mass or from a warmer to a colder mass in physical contact with each other without displacement of the particles of the mass or masses.

4.3 Thermal Radiation

Thermal radiation can be both an external and internal process. Radiant heat refers to heat transfer through a vacuum of electromagnetic waves. Mossberg (2001) reported that buildings rely on the sun as their primary sources of heat gain. Actually, air temperature does not usually cause heat discomfort, but radiant energy from direct or indirect sunlight results in long infrared waves. Thus, the first function of defence against heat in building construction is to minimize surfaces affected by sunlight. The interior of the dwelling that is thusly heated tends to get very hot in the day, unless storage mass is supplied. Indirect solar radiation gain, for its part, occurs due to heat gain brought about by solar radiation absorbed by the building envelope and transmitted into the building by conduction, convection, or infrared radiation.

5. Human Body Interaction with Surroundings

Based on the Yao et al. (2007), thermal comfort is achieved when there is thermal equilibrium between the production of metabolic heat inside the body and wasted heat from the body through the mechanisms of convection, conduction, radiation and evaporation. When the person is in thermal equilibrium, the person feels neither very cold nor very hot, although different people have different thresholds for warmth or cold. That why some people may feel comfortable whereas others feel uncomfortable in the same environment. Still, humans usually respond similarly to varying environmental conditions.

Heat production due to metabolism depends primarily on activity. Therefore, engaging in increased physical stress leads to increased metabolic heat production within the body. The amount of heat virtually transferred by several mechanisms of movement is affected by a number of factors, such as convection, radiation, conduction, and evaporation. Behavioural factors, such as activity level and clothing selection, also affect this process, as do environmental factors, such as air temperature, mean radiant temperature, relative humidity, and air velocity.

5.1 Internal Body Temperature

The normal body internal temperature for the human is 37 °C, with a range of 36.2 °C– 37.5 °C. Yao et al. (2007) assigned temperature between 37.5 and 38.0 °C as “the territory of fever” and temperatures greater than 38.0 °C as fever. Actually body temperatures are evaluated based on specific reference group’s characteristic normal range. Figure 2 shows the heat exchange from a body to its surroundings.

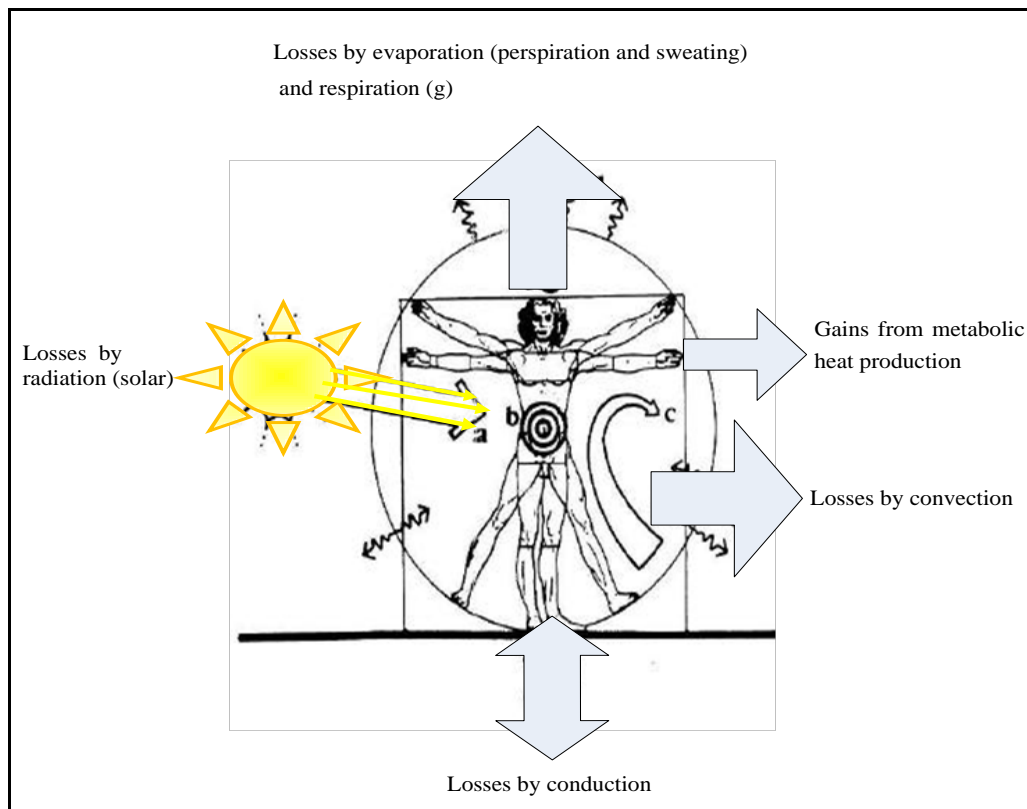


Figure 2: Heat exchange from a body to its surroundings (Yao et al., 2007)

5.2 Thermoregulation

Thermoregulation is the human ability to keep one's body temperature within assured boundaries despite the surrounding temperature. According Tanabe et al. (2002) the thermoregulation system consists of four control processes which are vasodilatation, vasoconstriction, perspiration and heat production through shivering. Thermoregulation is an important autonomic response, with fast changes in the environment leading to immediate physiological responses (Parsons, 2003). The body's thermoregulatory system emits heat through the body, which in turn warms the blood. Meanwhile, the surrounding clothing preserves a homeostatic temperature. Thus, body temperature is the sum of heat production and heat loss. The hypothalamus located in the brain is the body's thermostat; it continually adjusts the body's temperature using the nervous system's pathways to maintain the set point of approximately 37 °C.

5.3 Evaporation

Usually human sheds heat by water evaporation through the skin at low surrounding temperatures. Based on Cena and Clark (1981), evaporative heat loss depends on the body's capacity to secrete sweat, and on the physical properties of the environment.

5.4 Sweating

When body temperature rises, sweat is excreted from the skin to allow by evaporation. There are two types of sweat glands. First is vestigial apocrine glands are found in the ampits and pubic regions and are responsible for the characteristic smell of these areas. Second is the eccrine glands are distributed all over the body. (Parson, 2003)

6. The Effective Comfort Range

Nicol and Humphreys (2002) reported that acclimatization to thermal comfort can potentially narrow the actual temperature required to achieve comfort to ± 2 °C. In cases where these acclimatization opportunities are obtainable and suitable, the comfort zone may be much wider.

6.1 Heat Balance

Heat transmittance among people in an enclosed environment can be formulated to establish the activity level. Heat that produced by human either raises body temperature or is transferred to the surroundings directly through the skin or through perspiration. According to Parsons (2003), there have three conditions are necessary for a person to enjoy whole-body thermal comfort which are body heat balance, sweating rate within comfortable limits and mean skin temperature.

6.2 Thermal Comfort Requirement

Each building must meet thermal comfort requirements for human occupancy. According to Muncey (1979), to evaluate human comfort, the temperature of the air and surfaces within the building should assessed and relative humidity must be kept between 30 % and 70 %. These measures reduce the risk of distastefully wet or dry skin, eye discomfort, stable heat, microbial growth, and respiratory sickness. If the environmental conditions are within the bounds of comfort, more than 80 % of the residents will find the thermal conditions acceptable. According to Olesen and Brager (2004), there are two methods of estimating comfort requirements: one involves a resident survey, and the other involves environmental variables that delimitate comfort conditions.

6.3 Comfort Zones

Comfort zones means it can provide an acceptable thermal environment for occupants wearing typical indoor clothing and performing near-sedentary activities. Usually a thermal environment is considered acceptable for occupancy when at least 80% of the occupancy find the area thermally acceptable. Humans regulate their body temperature through circulation of blood, excretion of sweat (perspiration), shivering, and other physical manifestations. The idea temperature for internal tissues is 37.2 °C (Aouf Abed Rahim Said, 2000). However, although thermal equilibrium is essential to human life, it is insufficient for thermal comfort.

Establishing a clear and specific definition for the concept of thermal comfort is difficult. Relating ultimately to a sense of personal well-being, thermal comfort refers to the acclimatization of a person to his or her surroundings, and the maintenance of thermal balance between the body and the environment while considering other factors, such as sex and age. There is no similar method for regulating an occupant's clothing or metabolism, which explain why two people sitting next to one another may perceive significant difference in temperature. Nevertheless, most people do not feel thermally comfortable within a narrow temperature range between 18 °C – 26 °C and with relative humidity between 30% – 60%. The range of thermal comfort is a combination of various factors. This including air temperature, radiation temperature, relative humidity and air speed at which the majority of the people feel a sense of total comfort and satisfaction. If a person is unable to determine the climatic to be either cool or warm it called the sense of thermal comfort. This range, known as neutral thermal to a certain group of people, depends on the following : acclimatization, quality of clothing, and activity. Furthermore, the thermal comfort zone is contained within the thermal equilibrium in the narrow limits of the components' interaction, which in turn, consists of climatic elements affecting the thermal exchange between the climate and humans.

7. Conclusion

Thermal comfort describes a person's psychological state of mind and is usually referred to in terms of whether someone is feeling too hot or too cold. Thermal comfort is very difficult to define because you need to take into account a range of environmental and personal factors when deciding what will make people feel comfortable. These factors make up what is known as the 'human thermal environment'. People working in uncomfortably hot and cold environments are more likely to behave unsafely because their ability to make decisions and/or perform manual tasks deteriorates. Thermal comfort is related to the daily lives of humans; it is a condition that results from the complex interactions of the human body with the surrounding air. Thus, reaching a balance in temperature is important in maintaining an optimum level of comfort.

References:

1. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (1992) Thermal environmental conditions for human occupancy. (ASHRAE Standard 55-1992). Atlanta, GA: ASHRAE.
2. Aouf, Abd Rahim. Said. (2000) The climate element and architectural design, 45-39
3. Cena, K. M. & Clark, A. J. (1981) Bioengineering thermal physiology and comfort, 1-34
4. Cowan, J. H. (1980) Solar energy applications in the design of buildings, 19-23
5. Fanger's, P. O. (2005) what is IAQ? In: Proceedings of Indoor Air 2005, Beijing, China, 4-9 September 2005.
6. Fanger, P. O., Melikov, A. K., Hanzawa, H. & Ring, J. (1988) Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*; 12(1): 21-39.
7. Fanger's, P. O. (1973) Conditions for thermal comfort – a review. In: Building Research Establishment Report 2. Thermal comfort and moderate heat stress. Proceedings of the CIB Commission W45 (Human requirements) Symposium held at the Building Research station, 13-15 September 1972, published, 1973.
8. Fisk, W. J. (2000) Health and productivity gains from better indoor environment and their relationship with building energy efficiency, 134-144
9. Griefahn, B. & Kunemund, C. (2001) The effects of gender, age, and fatigue on susceptibility to draft discomfort, 1-5
10. Hao, X., Zhang, G., Chen, Y., Zou, S. & Moschandreas, D. J. (2007) A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification, 101-107
11. Heschong, L. (2002) Daylighting and human performance. published in ASHRAE Journal, June, 2002
12. Huizenga, C., Abbaszadeh, S., Zagreus, L. & Arens, E. (2006) Air quality and thermal comfort in office buildings, 67-73
13. Jones, B.M., Kirby, R., Kolokotroni, M. & Payne, T. (2007) Air quality measured in a classroom served by roof mounted natural ventilation wind catchers, 18-24
14. Liping, W. & Hien, W. N. (2007) Applying natural ventilation for thermal comfort in residential buildings in Singapore, 145-157
15. Mossberg, C. (2001) Passive Cooling, part II – applied construction. Available at:
16. http://www.homepower.com/article/?file=HP83_p66_Mossberg
17. Muncey, R. W. (1979) Heat transfer calculations for buildings, 1-128
18. Nicol, J. F. & Humphreys, M. A. (2002) Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, 38-44
19. Olesen, B. W. & Brager, G. S. (2004) A better way to predict comfort: The new ASHRAE Standard 55-2004. UC Berkeley: Center for the Built Environment., available at: <http://escholarship.org/uc/item/2m34683k>
20. Parsons, K. C. (2003) Human thermal environments, 2nd Ed., 258–92, Taylor & Francis, London, 1-143
21. Randall, T., Fordham, M. & Partners. (2005) Environmental Design An introduction for architects and engineers., 134-139
22. Rosenlund, H. (2000) Climatic design of buildings using passive techniques. Publisher: Lund university, 10 (1): 1-12
23. Tanabe, S. I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y. & Konishi, M. (2002) Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), 67-71
24. Thomas, R. (2006) Environmental Design: An introduction for architects and engineers Third edition, 86-99
25. Yao, Y., Lian, Z., Liu, W. & Shen, Q. (2007) Experimental study on skin temperature and thermal comfort of the human body in a recumbent posture under uniform thermal environments, 2-6

УДК 697

Значение температурного комфорта в зданиях и его влияние на жителей¹Мухамад Хаирил Аизад Сенин²Мд Азри Отхуман Мудин^{1,2} Университет Малайзии, Малайзия¹ Аспирант

E-mail: khairilaizad8@gmail.com

² Доктор педагогических наук

E-mail: azree@usm.my

Аннотация. Нужно отметить, что внутренний климат в зданиях важен для здания не только с точки зрения комфорта, но и для энергопотребления в целом и для температурного комфорта жителей. Температурный комфорт можно охарактеризовать как психологическое душевное состояние, часто определяющееся ощущением жары или холода. Оно наступает, когда существует сбалансированный обмен теплом между организмом человека и окружающей средой, характеризующееся отсутствием регулятивного потоотделения. Температурный комфорт обязателен как в психологическом, так и в физическом понимании, когда он может влиять на моральное состояние человека. В зависимости от уровня температурного комфорта, жители могут жаловаться, может страдать их продуктивность, а в некоторых ситуациях, они могут отказываться работать в определенном климате. В данной статье тщательно исследуется понятие температурного комфорта, влияние температурных условий на жителей и некоторые важные факторы, которые влияют на температурный комфорт. Кроме того, тепловой обмен между внешней средой и внутренним помещением зданий, взаимодействие человеческого организма с окружающей средой и эффективный диапазон комфорта также представлен в работе, с целью получения ясной картины влияния температурного комфорта на жителей.

Ключевые слова: температурный комфорт; жители дома; организм человека; транспортировка тепла; внешняя среда.

UDC 004.4'41: 004.942

Complexity Index

Victor Y. Tsvetkov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russian Federation
Dr. (Engineering), Professor
E-mail: cvj2@list.ru

Abstract. The article describes the methods for estimating the specific characteristics of objects and systems that is called complexity. The article describes the "dogma of dimensionality" as a method to eliminate or reduce complexity. The article describes the kinds of difficulty. The article reveals the causes of difficulty. The article argues that the complexity is a correlate. The article describes the internal and external factors of complexity. The article describes the main evaluation methods of complexity.

Keywords: complexity; the dogma of the one-dimensionality; formalization; system analysis; evaluation of complexity; types of complexity; the causes complexity the correlative analysis; constructive objects.

Введение. Сложность является часто встречающейся характеристикой объектов, явлений, ситуаций, задач и процессов. Она служит причиной трудности или невозможности исследования, решения задач или анализа результатов. В тоже время, исследование проблемы сложности и оценка сложности является недостаточно широким. Исторически эта проблема хорошо исследована в области вычислительных алгоритмов. Но в более широком понимании исследование проблемы оценки сложности остается открытым. Понятие сложности часто формируется на основе интуиции с учетом психологических факторов, что говорить о ее недостаточной изученности. Таким образом, задача оценки сложности является актуальной при научных исследованиях и анализе результатов исследования [1]. Данная статья является этапом исследования оценки сложности в междисциплинарном аспекте.

Догма одномерности как пример преодоления сложности. В настоящее время осознанно или неосознанно в ряде научных исследований применяют догму одномерности. Догма одномерности характеризуется тремя признаками. Эти признаки проявляются как совместно, так и раздельно.

Первый признак догмы одномерности: Попытка определить сложное понятие (полисемическое понятие), сложную ситуацию, сложное явление — одним определением или одной трактовкой.

Второй признак догмы одномерности. Попытка рассмотреть и трактовать сложное явление с одной точки зрения, в одном аспекте или с учетом одной причинно-следственной связи.

Третий признак догмы одномерности. Исключать, искажать или упрощать другие определения, другие точки зрения, другие аспекты, которые наряду с принятой трактовкой дают альтернативное объяснение данному явлению, процессу или закономерности.

Все три признака связаны с упрощением «сложной сущности» и заменой «сложной сущности» на «простую сущность».

В ряде случаев применение догмы одномерности дает положительные результаты. Если исключаются второстепенные признаки, упрощение и снижение «сложности» позволяет выявить сущность явления. Этот подход является основой моделирования. Процесс упрощения допустим, если при этом сохраняются существенные признаки и исключаются второстепенные.

Во многих науках такой процесс называют редуцированием, например, взятие сложного интеграла методом оценивания параметров. Но при упрощении с исключением существенных признаков, появляется неадекватность исследования и неадекватность трактовки результатов такого исследования. Сам по себе процесс упрощения также является сложным. Это приводит к необходимости оценки сложности.

Виды «сложности» и свойства сложности. *Связанность.* Особенность термина «сложность» в том, что он является связанной сущностью (или атрибутом) и с другой сущностью. Это порождает различные виды сложности. Например, различают виды сложности по связи с объектом: сложность системы (объекта) [2], сложность процесса (действия), сложность явления, условная колмогоровская сложность, простая колмогоровская сложность, префиксная сложность [3], сложность ситуации, сложность теории и т.д.

Следовательно, термин «сложность» требует указания связанного объекта, по отношению к которому сложность оценивается. В противном случае оценка сложности будет неадекватной. Сложности качественно разных сущностей или разных атрибутов могут быть не сопоставимы.

Коррелятивность. Особенность термина «сложность объекта» в том, что он является коррелятом [4]. Это означает, что существует второй коррелят – «простой объект», который показывает предельный случай отличия от первого коррелята – «сложность объекта». Например, термин «сложная система» подразумевает характеристику такой системы и ее отличие от «несложной системы» или «простой системы». Оппозиционным коррелятом сложности является «простота». По словам Пригожина [1] – «сложность представляет собой понятие, принадлежащее обиходному словарю, и всегда соседствует с понятием простоты».

В частности, при разложении функции в ряд, чем меньше членов имеет ряд, тем больше оснований считать его более простым и менее сложным. Соответственно, чем больше членов имеет ряд, тем выше его сложность и меньше простота.

Следовательно, для полноты исследования термин «сложность объекта» требует указания альтернативного объекта, который такой сложностью не обладает. Это задает предельный случай отсутствия данной сложности. В противном случае оценка сложности будет не полной.

Сравнительность. Особенность термина сложность в том, что он может быть сравнительным, если задан ряд «сложностей». Например, «первый вариант сложнее второго», «третий вариант сложнее второго», «десятый вариант - самый сложный». Это дает возможность для оценки сложности на множестве альтернативных вариантов выстраивать бинарные отношения порядка [5].

Атрибутивность и агрегативность. Особенность термина «сложность» в том, что он может характеризовать не только объект в целом, но и атрибут объекта, то есть может характеризовать сложность определенного качества объекта. Это свойство называется атрибутивностью. «Сложность» может характеризовать не только объект в целом, но и его части, что в совокупности определяет сложность объекта. Это свойство называется агрегативностью. Например, различают разные сложности одного и того же объекта:

- структурная сложность объекта [6];
- сложность процессов, в которых участвует объект [7];
- сложность получения решения в допустимое время – временная сложность [8, 9];
- сложность, обусловленная ограниченным объемом памяти вычислительной системы при больших объемах перерабатываемой информации – ёмкостная сложность [9];
- сложность определения положения в пространстве – пространственная сложность позиционирования;
- сложность формы объекта – морфологическая сложность;
- сложность ситуации [10], в которой находится объект – ситуационная сложность;
- сложность позиции [10], в которой находится объект – позиционная сложность;
- сложность декодирования объекта [3] – криптографическая сложность.
- сложность описания явления, с которым взаимосвязан объект;
- сложность теории, описывающей поведение объекта, и т.д.

Следовательно, для полноты исследования можно говорить об «обобщенной сложности» объекта и об «атрибутивной сложности» характеристик объекта. Это дает возможность декомпозиции обобщенной сложности на атрибутивные сложности и выявления причинно–следственной связи между ними.

Когнитивность (субъективность). Особенность термина «сложность» в том, что оценка сложности связана с субъектом, проводящим исследование или анализ, и

формируется с учетом уровня интеллекта этого субъекта. Например, сложная шахматная позиция для шахматиста–любителя может быть простой для гроссмейстера.

Следовательно, говоря о сложности, необходимо указывать те интеллектуальные и информационные ресурсы (теории, методы, принципы), которые послужили основой для оценки данной сложности. Для объективной оценки сложности необходимо максимальное исключение субъективного подхода и таких критериев как «по моему мнению», «мой опыт», «опыт или мнение коллег» и т.д. Говоря языком эпистемологии, следует избегать «эпистеме» - субъективного и правдоподобного знания, если есть возможность использования достоверного знания – «докса». Это приводит к понятию «внутренняя сложность».

Влияние внешних факторов на оценку. Особенность термина «сложность объекта» в том, что он имеет двойственную связь: с субъектом, проводящим исследование объекта, и с внешней средой, которая задает условия существования и поведения объекта, в этой среде. Например, сложность управления кораблем (самолетом) в штормовую (неблагоприятную для полета) погоду зависит как от штормовой погоды, так и от компетенций капитана корабля (самолета). Это дает основание выделять сложность обусловленную изменением внешней среды безотносительно к субъекту. Следовательно, по критерию субъективного и объективного можно разделять сложность на «внутреннюю» («субъектную») и «внешнюю» («ситуационную»). Это независимые виды сложностей, которые в совокупности определяют «обобщенную сложность» ситуации.

Внутренняя сложность лежит в области интеллекта субъекта. Ее уменьшение обусловлено повышением уровня интеллекта и набором стереотипов преодоления сложных ситуаций.

Внешняя сложность обусловлена непредсказуемостью внешней среды и созданием новых ситуаций, значительно отличающихся от ранее встречавшихся. Внешняя сложность обусловлена увеличением числа связей, информационных объемов, при описании объекта. Это приводит к понятию «статическая сложность». Внешняя сложность обусловлена увеличением числа связей, информационных объемов, при описании процессов. Это приводит к понятию «динамическая сложность».

Кроме того, для динамической и статической сложности можно выделить «сложность по объему» и «сложность по связям».

Процессуальность. Во многих источниках литературы, сложность делят на два вида [11]: сложность описания и сложность действия (процесса, вычисления).

Сложность описания может соотноситься с любой сущностью из перечисленных выше. Эта сложность имеет внешние и внутренние причины и, соответственно, может выражаться другими сложностями.

Причины появления сложности. Причины появления сложности различны. Например, сложность описания явления чаще обусловлена нехваткой ресурсов (теории, методов, моделей) для описания данного явления [3]. Сложность теории чаще всего лежит в когнитивной области восприятия человека.

Одной из основных причин сложности можно выделить такую характеристику как «многообразие». Многообразие может проявляться в количестве связей и в больших объемах информации.

Существует подход, при котором сложность описания оценивается параметрами: большим объемом информации, числом связей, видом моделей. Связи между элементами системы или объекта описывают графом. Это определило направление оценки сложности на основе анализа графа, который называют графом сложности. Узлы соответствуют элементам системы, дуги связям. Однако в этом случае возможны два варианта.

Если рассматривать всю систему целиком, не вникая во взаимосвязи элементов то получается плоский граф. Такой анализ называется «поиском в ширину». Если исследовать связи между элементами и подсистемами, то граф становится объемным гиперграфом. Такой анализ называют «поиском в глубину» [11].

В работе [12] выделен ряд специальных характеристик сложной системы, некоторые из которых можно перенести на характеристики внутренней сложности описания. Эти характеристики включают такие качества: обзримость, воспринимаемость, сравнимость, интерпретируемость. Соответственно, возможны сложности: сложность

обозрения, сложность восприятия, сложность сравнения, сложность интерпретации. Эти виды сложности лежат в когнитивной области интерпретатора (человек, компьютер, интеллектуальная система).

Внутренняя сложность описания связана со сложностью представления. В лингвистике и в области вычислительной техники (особенно в сфере параллельных вычислений) эту сложность связывают с семантическим разрывом [13].

Сложность процесса, в частном случае процесса вычисления имеет свои причины. Например, она может быть обусловлена лингвистическими средствами и типами вычислительного устройства. В частности применение последовательной или параллельной вычислительной системы влияет на алгоритм и сложность вычисления.

Сложность вычисления имеет такие характеристики как: ветвление, логика, тупики. В редких случаях она описывается простыми графами. Чаще для описания вычислительных алгоритмов используют сети Петри и другие модифицированные модели.

В последнее время к видам сложности добавился новый. Он связан с динамическими ситуациями и принятием решений. Этот вид сложности называют сложностью временного согласования. Например, такая сложность встречается в высокоскоростных транспортных системах. Эта сложность обусловлена противоречием между допустимым временем и техническим временем решения. Допустимое время – это время решения задачи управления по ситуации, в которой находится объект управления. Техническое время решения – это время решения задачи системой управления на основе алгоритма или на основе используемой модели.

Взаимосвязь оценок сложности. Несмотря на разнообразие видов сложности, оценки разных видов сложности могут быть получены на основе небольшого числа методов и подходов.

Например, сложность кодирования может быть оценена с помощью показателя криптографическая стойкость.

Морфологическая сложность может быть оценена коррелятивно, сравнительно и с использованием методологии колмогоровской сложности. Сравнительная оценка морфологической сложности может задаваться рядом возрастающих по сложности объектов: плоская кривая, пространственная кривая, односторонняя поверхность, тело с четкой поверхностью, тело с нечеткой поверхностью. Коррелятом или предельным случаем морфологической «простоты» для кривых будет прямая, а для поверхностей будет плоскость.

Методология колмогоровской сложности дает основание использовать при описании морфологической сложности конструктивные объекты [3]. При описании графических образов конструктивные объекты являются простыми семантическими моделями [14], на основе которых конструируют сложные морфологии.

Объемная сложность, временная сложность, сложность описания, пространственная сложность позиционирования, внутренняя сложность – могут оцениваться по степени нехватки информационных ресурсов для решения соответствующей задачи. Эта оценка может быть сведена к оценке информационной асимметрии между имеющимися и необходимыми информационными и интеллектуальными ресурсами.

Сложность процессов, алгоритмов оценивают с использованием графов, которые разделяют на плоские и гиперграфы. Кроме того, применяют четкие и нечеткие графы.

Ситуационную и позиционную сложность оценивают по набору стереотипов (конструктов), применяемых для анализа ситуаций и позиций. Это приводит к информационной асимметрии между необходимым набором стереотипов и имеющимся в распоряжении исследователя. Дополнительно для анализа ситуационной и позиционной сложности применяют графовый подход. Примером могут служить различные вариации применения транспортных графов.

Сложность объекта или системы как совокупности конструктов может быть оценена с помощью коэффициента эмерджентности [15], который показывает степень различия между суммарным числом состояний конструктов и числом состояний системы, как объединения конструктов.

Выводы. При оценке сложности необходимо указывать вид сложности и сущность, для которой оценивается сложность. В противном случае оценка сложности будет неполной.

Несмотря на разнообразие видов сложности для их оценки может быть использованной достаточно ограниченное число методов и подходов. Общим для всех видов сложности может служить сравнительная оценка и коррелятивная оценка, которая показывает предельный случай «простоты».

Для оценки большинства видов сложностей могут быть использованы конструктивные объекты [3], которые могут служить базой для оценки сложности составных объектов.

Для оценки сложности связей, структур, ситуаций, позиций и процессов достаточно апробированными являются графовые методы.

Для оценки объемной, временной сложности и сложности семантических разрывов [13] оценкой может служить вид информационного взаимодействия и информационная асимметрия. В свою очередь информационное взаимодействие может характеризоваться графом сложности.

В общем, различные виды сложности можно сводить друг к другу, что позволяет осуществлять междисциплинарный перенос оценок сложности.

Примечания:

1. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 343 с.
2. Тихонов А.Н., Иванников А.Д., Соловьёв И.В., и др. Основы управления сложной организационно-технической системой. Информационный аспект. М.: МаксПресс, 2010. 228 с.
3. Вьюгин В.В. Колмогоровская сложность и алгоритмическая случайность. М.: ИППИ РАН, 2012. 131 с.
4. Tsvetkov V.Ya. Framework of Correlative Analysis // European Researcher, 2012, Vol.(23), № 6-1, p. 839–844.
5. Толстых С.С., Подольский В.Е., Бучнева В.В. Современное состояние теории сложности и возможности ее применения в сфере телекоммуникаций / Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению "Информационно-телекоммуникационные системы", 2008. 46 с.
6. Толстых С.С. Разработка алгоритмического и программного обеспечения вычисления рекурсивных функций структурной сложности / С.С. Толстых, А.Г. Клещев // Труды ТГТУ. 1999. Т. 4, № 2–3. С. 135–138.
7. Солодовников, В.В. Теория сложности и проектирование систем управления. (Теория и методы системного анализа) / В.И. Тумаркин. М.: Наука, 1990. 168 с.
8. Tsvetkov V.Ya. Multipurpose Management // European Journal of Economic Studies 2012, Vol.(2), № 2 p.140-143.
9. Адигеев М.Г. Введение в теорию сложности. Ростов–на–Дону: РГУ, 2004. 35 с.
10. Tsvetkov V.Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool // European Researcher, 2012, Vol.(36), № 12-1, p. 2166–2170.
11. Подольский В.Е., Толстых С.С. Повышение эффективности региональных образовательных компьютерных сетей с использованием элементов структурного анализа и теории сложности. М.: Машиностроение, 2006. 176 с.
12. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Среда поддержки интеллектуальных систем // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 6. С. 6-8.
13. Tsvetkov V.Y. Information Interaction as a Mechanism of Semantic Gap Elimination // European Researcher, 2013, Vol.(45), № 4-1, p. 782–786.
14. Tsvetkov V.Ya. Information objects and information Units // European Journal of Natural History. 2009. № 2. P. 99.
15. Харкевич А.А. Избранные труды в 3-х томах. Том 3. Теория информации. Опознавание образов. М.: Наука, 1973. 524 с

УДК 004.4'41: 004.942

Оценка сложности

Виктор Яковлевич Цветков

Московский государственный университет геодезии и картографии, Российская Федерация
Доктор технических наук, профессор
E-mail: cvj2@mail.ru

Аннотация. В статье описана оценка специфической характеристики объектов и систем, которая называется сложность. Кратко дается описание догмы одномерности как метода исключения или уменьшения сложности. Описаны виды сложности. Показаны причины появления сложности. Показано, что сложность является коррелятом. Показано, что сложность формируется на основе внутренних и внешних факторов. Описаны основные методы оценки сложности.

Ключевые слова: сложность; догма одномерности; формализация; системный анализ; оценка сложности; виды сложности; причины сложности; коррелятивный анализ; конструктивные объекты.

UDC 681.5

An Ensemble-Based Feature Selection Algorithm Using Combination of Support Vector Machine and Filter Methods for Solving Classification Problems

¹Lev V. Utkin

²Yulia A. Zhuk

³Anatoly I. Chekh

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University, Russian Federation
5, Institutski pereulok, Saint-Petersburg, 194021

E-mail: lev.utkin@gmail.com

²Saint-Petersburg State Forest Technical University, Russian Federation
5, Institutski pereulok, Saint-Petersburg, 194021

E-mail: zhuk_yua@mail.ru

³Saint-Petersburg State Forest Technical University, Russian Federation
5, Institutski pereulok, Saint-Petersburg, 194021

E-mail: anatoly.chekh@gmail.com

Abstract. A new feature selection algorithm for solving classification problems is proposed. The algorithm exploits the ensemble-based methodology and iteratively combines classifiers in order to assign weights to features characterizing their importance in classification. The algorithm is based on the joint use of a filter method and the well known support vector machine. Moreover, the filter method uses only support vectors instead of the total training set to calculate the feature weights. Numerical experiments with publicly available data sets show that the proposed algorithm improves the classification accuracy.

Keywords: composition algorithm; support vector method; filtration method.

Introduction

Classification is one of the most common and studied statistical analysis tools which is often regarded as a part of a general framework of learning theory proposed by Vapnik [23]. A main goal of statistical machine learning is prediction of an unobserved output value y based on an observed input vector \mathbf{x} , which requires estimation of a predictor function f from training data consisting of pairs (\mathbf{x}, y) . In classification, the output variable is in one of a finite number of classes and the main task is to classify the output y corresponding to each input \mathbf{x} into one of the classes by means of a separating function. We consider below only classification problems with two classes referred as binary classification problems.

The *binary classification* problem can be formally written as follows. Given n training data (examples, instances, patterns) $S = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\}$, in which $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^m$ represents a feature vector involving m features and $y_i \in \{-1, 1\}$ represents the class of the associated examples, the task of classification is to construct an accurate classifier $c : \mathbf{R}^m \rightarrow \{-1, 1\}$ that maximizes the probability that $c(\mathbf{x}_i) = y_i$ for $i = 1, \dots, n$. Generally \mathbf{x}_i may belong to an arbitrary set, but we consider the special case for simplicity \mathbf{R}^m .

A classification problem is usually characterized by an unknown probability distribution $p(\mathbf{x}, y)$ (or a cumulative probability distribution function $F(\mathbf{x}, y)$) on $\mathbf{R}^m \times \{-1, +1\}$ defined by the training set or examples \mathbf{x}_i and their corresponding class labels y_i . Many classification models accept the uniform distribution $p(\mathbf{x}, y)$ which means that every example in the training set has the probability $1/n$. In particular, the empirical risk functional [23] and the well known *support vector machine* (SVM) method [4] exploit the assumption of the uniform distribution.

One of the very popular approaches to classification is the *ensemble* methodology [7, 14, 20]. A basic idea of the classifier ensemble learning is to construct multiple classifiers from the original data and then to aggregate their predictions when classifying unknown samples. It is carried out by means of weighing several weak or base classifiers and by combining them in order to obtain a classifier that outperforms every one of them. The improvement in performance arising from ensemble combinations is usually the result of a reduction in variance of the classification error. This occurs because the usual effect of ensemble averaging is to reduce the variance of a set of classifiers.

Accuracy of classifiers can be substantially improved if a smaller subset of variables is used [2]. It can be done by using a procedure called feature selection which can be viewed as a process of determining what inputs should be presented to a classification algorithm. Many feature selection methods are based on the assumption that the feature set contains irrelevant and redundant features. Roughly speaking, *irrelevant features* contain no useful information improving the corresponding classifier or the classification model using the training sets with irrelevant features. *Redundant features* contain information which is already present in more informative features. Therefore, one of the aims of the feature selection is to select a set of non-irrelevant and non-redundant features and to remain relevant features which contain useful information. In many cases, the problem of feature selection is reduced to ranking features by assigning some weights to them, which show the importance of every feature in classification results.

In the paper, we propose a new algorithm for solving the problem of feature selection which includes some elements of the ensemble-based classifiers and use an iterative procedure for computing the weights of features in order to rank them. The proposed algorithm is based on exploiting a weighted modification of the SVM.

Feature selection approaches

Three main groups of methods have been developed for feature selection: filter, wrapper, and embedded methods.

The first group of methods called *filter methods* uses statistical properties of the features to filter out poorly informative ones. Filter methods constitute a preprocessing step to remove irrelevant features. This step is performed independently from the specific learning algorithm. Selection by means of the filter methods is usually carried out before applying any classification algorithm. An excellent review of filter methods is provided by Altidor et al. [1]. Other interesting and comprehensive reviews can be found in [15, 21].

When it is assumed that the two classes are distributed with a multivariate Gaussian distribution with different mean values, but with an equal covariance matrix, and it is assumed that features are independent, then the relevance of feature i for discrimination is measured by the t -statistics as follows:

$$r(i) = \frac{|\mu_i^+ - \mu_i^-|}{\sqrt{\frac{n^+(\sigma_i^+)^2 + n^-(\sigma_i^-)^2}{n^+ + n^-}}},$$

where n^+ and n^- denote the number of examples in positive and negative class; μ_i^+ and μ_i^- are the mean values of the i -th feature in the positive and negative classes, respectively; σ_i^+ and σ_i^- are the respective standard deviations.

The t -test is a well-known statistical method for detecting differential features between two samples in training data [16,17,24]. A feature having a higher t -statistics between two classes is assumed to have higher class separability. This measure is such a filter method which computes the importance of each feature independently of the other features by comparing that feature's correlation to the output labels.

Closely related to the t -test statistical measure is the Fisher criterion score $F(i)$ defined for feature i as

$$F(i) = \left| \frac{\mu_i^+ - \mu_i^-}{(\sigma_i^+)^2 + (\sigma_i^-)^2} \right|.$$

A feature i can be considered better than a feature j if $F(i) > F(j)$. Fisher criterion score are sensitive to all changes in the values of features.

Another measure is the Information Gain which is commonly used in the fields of information theory and machine learning. Information Gain measures the number of bits of information gained about the class prediction by knowing the value of a given feature when predicting the class.

Chi-squared test is also a popular statistical test of the divergence between the observed and expected distribution of a feature. In feature selection, it tests whether the distribution of a feature differs between groups. The chi-square score uses the summation of squared differences between observed and expected values divided by expected values. It is based on the χ^2 -statistics, and it evaluates features independently with respect to the class labels. The larger the Chi-squared, the more relevant the feature is with respect to the class [1].

Relief-F [5, 12] is an instance-based feature selection method which evaluates a feature by how well its value distinguishes samples that are from different groups but are similar to each other. For each feature s , Relief-F selects a random sample and k of its nearest neighbors from the same class and each of different classes. Then s is scored as the sum of weighted differences in different classes and the same class. If s is differentially expressed, it will show greater differences for samples from different classes, thus it will receive higher score (or vice versa).

Gheyas and Smith [9] mention also additional used filter methods including Mann-Whitney-Wilcoxon U-test [6], mutual information [18], Pearson correlation coefficients [3], principal component analysis [11].

A second approach (*wrapper methods*) generally provides more accurate solutions than the filter methods, but it is computationally demanding [13]. According to the wrapper methods, feature selection is wrapped in a learning algorithm. A wrapper algorithm explores the feature space to score feature subsets according to their predictive power, optimizing the subsequent induction algorithm that uses the respective subset for classification. One of the well-known wrapper methods is the Recursive Feature Elimination (RFE).

RFE is a recently proposed feature selection algorithm described by Guyon et al. [10]. The algorithm is based on the assumption that removing a redundant feature leads to small changes of the risk measure or the cost function. Hence, we have to find and order differences between the risk measure R being minimized and the risk measure $R(t)$ caused by removing the t -th feature.

The wrapper methods are often used in combination with the filter methods. For example, Mundra and Rajapakse [17] enhance the support vector machine recursive feature elimination (SVM-RFE) method for gene selection by incorporating a minimum-redundancy maximum-relevancy filter method. In spite of the efficiency of wrapper methods, Smialowski et al. [22] show some problems with their using.

The third approach (*embedded methods*) performs feature selection in the process of model building. One of the interesting embedded methods is the so-called l_0 -SVM or Concave Feature Selection (FSV), based on the minimization of the zero norm: $\|\mathbf{w}\|_0 = |\{i : w_i \neq 0\}|$.

Support vector machine

In order to solve a classification problem, we have to find a real valued function $f(\mathbf{x}, \mathbf{w}, b)$ called the separating function whose sign determines the class label prediction. The separating function $f(\mathbf{x}, \mathbf{w}, b)$ may be parameterized with some parameters $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_m)$, b that are determined from the training examples by means of a learning algorithm. In particular, the function f may have the form $f(\mathbf{x}, \mathbf{w}, b) = \langle \mathbf{w}, \varphi(\mathbf{x}) \rangle + b$, where φ is a feature map such that the data points are mapped into an alternative higher-dimensional feature space G . In other words, this is a map into an inner product space G such that the inner product in the image of φ can be computed by evaluating some simple kernel $K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \langle \varphi(\mathbf{x}), \varphi(\mathbf{y}) \rangle$, such as the Gaussian kernel

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \exp\left(-\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 / c\right).$$

Given the training data the linear separating training problem is to minimize the following risk functional:

$$R(\mathbf{w}, b) = \int_{\mathbf{R}^m \times \{-1, 1\}} l(\mathbf{x}, y) dF(\mathbf{x}, y).$$

Here the loss function $l(\mathbf{x}, y)$ usually takes a non-zero value when the sign of the separating function (the class label prediction) does not coincide with the class label y . The minimization of the risk functional is carried out over the parametric class of functions $f(\mathbf{x}, \mathbf{w}, b)$. In other words, the function $f(\mathbf{x}, \mathbf{w}_{\text{opt}}, b_{\text{opt}})$ provides the minimum of $R(\mathbf{w}, b)$.

In SVM, it is taken the hinge loss function $l(\mathbf{x}, y) = \max\{0, 1 - y(\langle \mathbf{w}, \varphi(\mathbf{x}) \rangle + b)\}$ as a loss function. Moreover, the integral in the expression for the risk functional is replaced by the sum

$$R(\mathbf{w}, b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l(\mathbf{x}_i, y_i).$$

Under the above conditions, taking into account regularization and after some modification, the optimization problem for computing parameters \mathbf{w}, b becomes

$$\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \rightarrow \min_{\mathbf{w}, \xi, b}$$

subject to

$$y_i (\langle \mathbf{w}, \varphi(\mathbf{x}_i) \rangle + b) \geq 1 - \xi_i, \quad \xi_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n.$$

This is a quadratic programming problem. Here C is a user-specified positive parameter, which controls the trade-off between classification violation and margin maximization. In practice, the optimal parameter C can be selected using cross-validation, where the training data is randomly splitted into two parts: a training part and a validation part. The training part is used to compute \mathbf{w}, b with different C , and then estimate its performance on the validation part. The value of C with the smallest validation error is then chosen as the optimal regularization parameter. The introduction of the regularization term $\|\mathbf{w}\|^2$ makes the solution more stable.

By using the well-known optimization methods for solving the quadratic programming problem, we get the dual form (Lagrangian) as

$$L(\phi) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi_i \phi_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + \sum_{i=1}^n \phi_i \rightarrow \max_{\phi}$$

subject to

$$0 \leq \phi_i \leq C, \quad i = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n \phi_i y_i = 0.$$

Here $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)$ are Lagrange multipliers, i.e., optimization variables. The function $f(\mathbf{x}, \mathbf{w}, b)$ can be rewritten in terms of Lagrange multipliers as

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{w}, b) = \sum_{i=1}^n \phi_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b.$$

The dual form allows us to obtain the non-linear separating function in a simple way. There are many procedures and software tools for solving the above optimization problem.

A very important peculiarity of the SVM is that the solution to the optimization problem is defined only by a part of data points which is called by a set of *support vectors* (SV). The condition for the i -th data point to be a support vector is $\phi_i > 0$.

The proposed algorithm

An interesting idea underlying a feature selection method proposed by Mundra and Rajapakse [17] is to use only support vectors in t -statistics computation to improve the performance of the t -statistics. We modify their method and extend it on the ensemble-based framework.

First, we introduce the weights of features $v = (v_1, \dots, v_m)$, $v_1 + \dots + v_m = 1$, which are computed by using one of the measures determining the filter methods, for example, t -statistics, Fisher criterion score,

Information Gain, chi-squared test, etc. In fact, the weights v are normalized values of the corresponding filter measure. It should be noted that the weights of feature are computed on the basis of a part of training examples, namely, on the basis of support vectors obtained by using the SVM. This coincides with the method proposed by Mundra and Rajapakse [17].

Second, we use the SVM for computing parameters \mathbf{w}, b . At that, the weights v are assigned to every feature for all training examples, i.e., every vector $\mathbf{x}_j, j = 1, \dots, n$, is replaced by the vector $\langle v, \mathbf{x}_j \rangle = (v_1 x_1^{(j)}, \dots, v_m x_m^{(j)})$. The set of support vectors SV is determined after this procedure for computing the weights v by means of filter methods.

Third, we compute the error rate $\varepsilon_t = \sum_{i: c_t(x_i) \neq y_i} 1/n$ which is defined as a number of misclassified examples from the training set divided on n . The error rate characterizes how correctly the weights are assigned to features.

The above three steps are repeated T times. Finally, the weights of features can be computed as the weighted sum $v_{\text{final}} = \sum_{t=1}^T \varepsilon_t v_t$.

The formal algorithm for computing the weights of features is given below.

- 1) Given S is the set of all examples (the training set).
- 2) Assign the initial uniform feature weights $v \leftarrow (1/m, \dots, 1/m)$.
- 3) $t \leftarrow 1$
- 4) **Repeat**
- 5) Compute the vectors $\mathbf{x}_j \leftarrow \langle v, \mathbf{x}_j \rangle, j = 1, \dots, n$.
- 6) Train classifier c_t by using SVM with weights v_t for features and select support vectors $SV \subseteq S$.
- 7) Compute weights $v_t = (v_1, \dots, v_m)$ of features by using a filter method such that the weights v_t are computed on the basis of support vectors SV .
- 8) Compute error rate $\varepsilon_t \leftarrow \sum_{i: c_t(x_i) \neq y_i} 1/n$.
- 9) $t++$
- 10) **Until** $t > T$.
- 11) $v_{\text{final}} \leftarrow \sum_{t=1}^T \varepsilon_t v_t$.

Numerical analysis of the proposed algorithm

We illustrate the algorithm proposed in this paper via several real examples, all computations have been performed using the statistical software R [19]. We investigate the performance of the proposed algorithm and compare it with the standard SVM by considering the error rate ε_1 when the feature weight vector is $v = (1/m, \dots, 1/m)$, and the error rate $\varepsilon_{\text{final}}$ when the feature weight vector is v_{final} . The t -statistics is used as a filter method.

The proposed algorithm has been evaluated and investigated by the following publicly available data sets: Haberman's Survival Data Set, Pima Indian Data Set, Mammographic masses, Parkinsons, Lung cancer, Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set. All data sets are from the UCI Machine Learning Repository [8]. Table 1 provides the number of examples in the training sets and the number of features for the considered data sets, while more detailed information can be found from, respectively, the data resources.

Table 1:

Numbers of examples and numbers of features for data sets

Data Set	n	m
Haberman's Survival	306	3
Pima Indian Diabetes	768	8

Mammographic masses	961	4
Parkinsons	195	23
Lung cancer	32	57
Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic)	699	9

Table 2 shows the comparative performance of the proposed algorithm. One can see from Table 2 that $\varepsilon_{\text{final}} \leq \varepsilon_1$ for all data sets. This implies that the proposed algorithm provides outperforming results in comparison with the standard SVM.

Table 2:

**Values of the error rate for the initial feature weights
and for final combined feature weights**

Data Set	ε_1	$\varepsilon_{\text{final}}$
Haberman's Survival	0.281	0.255
Pima Indian Diabetes	0.314	0.249
Mammographic masses	0.213	0.201
Parkinsons	0.359	0.195
Lung cancer	0.246	0.246
Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic)	0.124	0.091

Conclusion

A feature selection algorithm has been proposed in the paper. The algorithm combines some peculiarities of the ensemble-based methodology, of the SVM, of the feature selection filter methods. This combination allows us to obtain a method with the better classification quality.

We have studied only one algorithm which combines feature weights after several iterations in the simplest way. However, it is interesting to study how the feature weights can be updated in accordance with the error rate value at each iteration similarly to the well-known adaptive boosting method like AdaBoost. This is a direction for future research.

Another interesting direction for future research is how to incorporate additional information about the training data taking into account the structure of training examples. For instance, the proposed algorithm might be modified and improved when we would know that all features are binary. There are several ways for improving the proposed algorithm in this case and every way might lead to outperforming classifiers.

References:

1. W. Altidor, T.M. Khoshgoftaar, J. Van Hulse, and A. Napolitano. Ensemble feature ranking methods for data intensive computing applications. *Handbook of Data Intensive Computing*, pages 349–376. Springer, New York, 2011.
2. S. Bierman and S. Steel. Variable selection for support vector machines. *Communications in Statistics- Simulation and Computation*, 38(8):1640–1658, 2009.
3. J. Biesiada and W. Duch. Feature selection for high-dimensional data- a Pearson redundancy based filter. *Computer Recognition Systems 2. Advances in Soft Computing*, volume 45, pages 242–249. Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
4. V. Cherkassky and F.M. Mulier. *Learning from Data: Concepts, Theory, and Methods*. Wiley-IEEE Press, UK, 2007.
5. T.G. Dietterich. Machine-learning research: Four current directions. *Artificial Intelligent Magazine*, 18:97–136, 1997.
6. M.P. Fay and M.A. Proschan. Wilcoxon-Mann-Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. *Statistics Surveys*, 4:1–39, 2010.
7. A.J. Ferreira and M.A.T. Figueiredo. Boosting algorithms: A review of methods, theory, and applications. *Ensemble Machine Learning: Methods and Applications*, pages 35–85. Springer, New York, 2012.
8. A. Frank and A. Asuncion. UCI machine learning repository, 2010.
9. I.A. Gheyas and L.S. Smith. Feature subset selection in large dimensionality domains. *Pattern Recognition*, 43(1):5–13, 2010.
10. I. Guyon, J. Weston, S. Barnhill, and V. Vapnik. Gene selection for cancer classification using support vector machines. *Machine Learning*, 46:389–422, 2002.
11. I.T. Jolliffe. *Principal component analysis*. Springer, New York Berlin Heidelberg, 2005.
12. K. Kira and L.A. Rendell. The feature selection problem: Traditional methods and a new

algorithm. *Proceedings of Ninth National Conference on Artificial Intelligence*, pages 129–134, 1992.

13. R. Kohavi and G.H. John. Wrappers for feature subset selection. *Artificial Intelligence*, 97(1-2):273–324, 1997.

14. L.I. Kuncheva. *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*. Wiley-Interscience, New Jersey, 2004.

15. In-Hee Lee, G.H. Lushington, and M. Visvanathan. A filter-based feature selection approach for identifying potential biomarkers for lung cancer. *Journal of Clinical Bioinformatics*, 1(11):1–8, 2011.

16. Xiaobo Li, Sihua Peng, Jian Chen, Bingjian Lu, Honghe Zhang, and Maode Lai. SVM-T-RFE: A novel gene selection algorithm for identifying metastasis-related genes in colorectal cancer using gene expression profiles. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 419(2):148–153, 2012.

17. P.A. Mundra and J.C. Rajapakse. Gene and sample selection for cancer classification with support vectors based t-statistic. *Neurocomputing*, 73:2353–2362, 2010.

18. H. Peng, F. Long, and C. Ding. Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(8):1226–1238, 2005.

19. R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2005.

20. L. Rokach. Ensemble-based classifiers. *Artificial Intelligence Review*, 33(1-2):1–39, 2010.

21. Y. Saeys, I. Inza, and P. Larranaga. A review of feature selection techniques in bioinformatics. *Bioinformatics*, 23(19):2507–2517, 2007.

22. P. Smialowski, D. Frishman, and S. Kramer. Pitfalls of supervised feature selection. *Bioinformatics*, 26(3):440–443, 2010.

23. V. Vapnik. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York, 1998.

24. T. Yang, V. Kecman, L. Cao, and C. Zhang. Combining support vector machines and the t-statistic for gene selection in DNA microarray data analysis. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, volume 6119, pages 55–62. Springer, Berlin / Heidelberg, 2010.

УДК 681.5

Композиционный алгоритм отбора признаков для решения задач классификации на основе комбинации метода опорных векторов и методов фильтрации

¹ Лев Уткин

² Юлия Жук

³ Анатолий Чех

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Россия
Санкт-Петербург, 194021, Институтский переулок, 5
E-mail: lev.utkin@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Россия
Санкт-Петербург, 194021, Институтский переулок, 5
E-mail: zhuk_yua@mail.ru

³ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Россия
Санкт-Петербург, 194021, Институтский переулок, 5
E-mail: anatoly.chekh@gmail.com

Аннотация. Предлагается новый алгоритм отбора признаков для решения задач классификации. Алгоритм использует модели композиции и итерационно комбинирует классификаторы для назначения весов признаков, характеризующих их значимость в задаче классификации. Алгоритм основан на совместном использовании методов фильтрации и известного метода опорных векторов. Кроме того, применяемый метод фильтрации использует только опорные вектора вместо всей обучающей выборки для вычисления весов признаков. Числовые эксперименты с использованием известных данных показали, что предлагаемый алгоритм повышает точность классификации.

Ключевые слова: композиционный алгоритм; метод опорных векторов; метод фильтрации.