

---

# EUROPEAN of Technology and Design

---

Has been issued since 2013.  
ISSN 2308-6505. E-ISSN 2310-3450  
2014. Vol.(3). № 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  
**Dr. Zhuk Yulia** – 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](mailto:ejtd2013@mail.ru)

Founder and Editor: Academic Publishing  
House *Researcher*

Passed for printing 16.03.14.  
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 № 3.

**European Journal of Technology and Design**

2014

№

**1**



Издается с 2012 г. ISSN 2308-6505. E-ISSN 2310-3450  
2014. № 1 (3). 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

**Жук Юлия** – Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия  
**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](mailto:ejtd2013@mail.ru)

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

Подписано в печать 16.03.14.  
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 № 3.

## C O N T E N T S

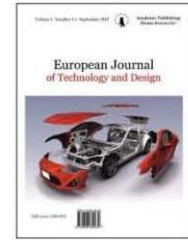
Nurul Nadia Omar Bakri, Md Azree Othuman Mydin General Building Defects: Causes, Symptoms and Remedial Work .....	4
Igor Yu. Botian, Lev V. Utkin A Brief Review of Main SVM-based Ranking Models .....	18
V.I. Grafutin, O.V. Ilyukhina, E.P. Prokop'ev, V.A. Ilyukhin, Yu.V. Funtikov Study of the Properties of Transition Metals and Alligations on the Basis of Major data of the Method of Positron Annihilation Spectroscopy .....	23
Victor Ya. Tsvetkov, Natalya Azarenkova The Information System Complexity .....	44
Lev V. Utkin, Yulia A. Zhuk, Ivan A. Selikhovkin An Imprecise Model of Combining Expert Judgments About Quantiles .....	49

ISSN: 2310-0133

Founder: Academic Publishing House *Researcher*

DOI: 10.13187/issn.2310-0133

Has been issued since 2013.



## European Journal of Technology and Design

### General Building Defects: Causes, Symptoms and Remedial Work

<sup>1</sup>Nurul Nadia Omar Bakri  
<sup>2</sup>Md Azree Othuman Mydin

<sup>1</sup>Universiti Sains Malaysia, Malaysia  
School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800, Penang  
MSc (Building Technology), Master Student  
E-mail: n.nadia225@gmail.com  
<sup>2</sup>Universiti Sains Malaysia, Malaysia  
School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800, Penang  
PhD (Civil Engineering), Senior Lecturer  
E-mail: azree@usm.my

**Abstract.** Building defect is one of the major components of building problems that significantly needed attention. When a building fails to function as it should, we must immediately seek for the determination. Is the problem taking place as the result of the worker's failure to assemble it properly? Is it involving the nature of it? Is the proper maintenance of the building not been performed as it should have been? The answers often depend upon a number of factors: the age of the affected building components, the exact nature of the problem, the presence or absence of human error, or some combination of all those three. This paper will review and discuss some of the major building defects happen throughout the world. It contains some of the main concepts and the definition of the terminological terms used. In addition, the causes, symptoms and remedial work of defect also been discussed in this paper.

**Keywords:** building defects, dampness, erosion, building, peeling paint, failure.

#### 1. Introduction

Building defect occurs to either the new building or the old ones. Defect within new buildings is maybe of non-compliance with Building Code and published acceptable tolerances and standards. Meanwhile the older buildings, or building out of warranty period, may not comply with these standards but must be judged against the standard at the time of construction or refurbishment. (David Hall)

Defects and deterioration are common problems in any built structures. However, various defects are more common in an old structure (Ransom, 1981). As in BS 3811 (Code of Practice, British Standard 1984) defects are defined as the deterioration of building features and services to unsatisfactory quality levels of requirement of the users.

According to California Civil Code 896, common types of building defects include: structural defects resulting in cracks or collapse; defective or faulty electrical wiring or lighting, defective or faulty plumbing, inadequate drainage systems, faulty ventilation, cooling or heating systems, insufficient insulation or sound proofing, and also inadequate fire protection suppression systems. Plus, dry rot, wood rot, mold, fungus, or termite or vermin infestation may also be the result of a building defect.

A building defect may also include damage caused by land movement or earth settlement. Proving a building defect commonly requires the hiring and testimony of a highly trained and experienced expert. An expert, such as an engineer or an architect, is the one who will be able to

determine the construction problem involved due to the result of improper design, material, or workmanship.

**2. Category of Building Defects**

The defect can be divided into two categories, which are:

**a) Structural defect**

Structural defect means any defect in a structural element of a building that is attributable to defective design, defective or faulty workmanship or defective material and sometimes any combination of these. Building structure includes earth retaining walls, columns, beams and flat slabs. (Northern Territory Consolidated Regulation)

According to the Engineering Encyclopedia, structural defect can be categorized as cracks in foundations (Substructure), cracks in floor or slabs (superstructure), and cracks in walls (superstructure). These defects can be caused by improper soil analysis, inappropriate site selection, and the use of defective materials. Most of the structural problem can be avoided by implying the exact and detail of the design and planning.

Structural defects in a building can occur over time due to deterioration, wear and tear, overloading, and poor maintenance. They must be repaired to maintain the building’s structure and to prevent any further failures. Regular inspection is the key to protecting the ‘health’ of a building’s structure. Structural defect that always occurs are steel corrosion, cracks, and deflection.

**b) Non-structural defect**

According to Northern Territory Consolidated Regulation, a non-structural defect in a residential building is described as a defect in a non-structural element of the building as a result of defective residential building work.

According to the Engineering Encyclopedia, non-structural defect includes defect in brick work, dampness in old structures, and defects in plaster works.

**3. Common Building Defects**

In general, there have several building defects which usually occur to building parts such as roofs, walls, floors, ceiling, toilets, doors and windows. (Tan Wei Cheun, 2008). Building difficulty and defect that are regularly found will be discussed in the following section which consists of wall crack, peeling paint, dampness, timber decay, fungi and small plant attack, sagging or deformation, erosion of mortar joint, defective plaster rendering, insect or termite attack, roof defect, and also unstable foundation, and services.

**3.1 Crack on walls**

It is the nature of many construction materials to crack as they age and as they expand and contract, particularly with exposure to moisture as they get wet and dry out alternately. There are cracks in common areas, such as exterior walls, interior walls at corners of doors and windows, and ceilings (usually in the middle). Crack defect have classified of visible damage to walls. There is having different state in category of damage, and degree of damage. Refer (Table 1)

**Table 1:** Classification of Visible Damage to Walls

Category of Damage	Degree of Damage	Description of Typical Damage	Approximate Crack Width (mm)
0	Negligible	Hairline crack of less than about 0.1 mm widths are classed as negligible. No actions required.	Up to 0.1
1	Very Slight	Fine cracks which can be easily treated during normal decoration. Damage generally restricted to internal wall finishes, crack rarely visible in external brickwork.	Up to 1

2	Slight	Crack easily filled. Recurrent crack can be masked by suitable linings. Cracks on not necessarily visible externally, some external reappointing may be required to ensure weather tightness. Doors and windows may slight and require easing and adjusting.	Up to 5
3	Moderate	Crack which required some opening up and can be patched by a mason. Repointing of external brickwork and possibly small amount of brickwork to be replaced. Doors and windows sticking. Service pipes may fracture. Weather tightness often impaired.	5 to 15 ( or several of 3mm)
4	Severe	Extensive damage which required breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows. Windows and doors frame distorted, floor sloping noticeably. Wall leaning or bulging noticeable, some loss of bearing in beams. Service pipes disrupted.	15 to 25 But also depend on number of crack
5	Very Severe	Structural damage which requires a major repair job involving partial or complete rebuilding. Beams lose bearing, wall lean badly and require shoring. Windows broken with distortion. Danger of instability.	Usually greater than 25 but depends on number of crack

**Source:** *Defect in Building, 2003*

According to the construction, the occurrence of wall crack is because they are overloaded or because the structure has settled or heaved. Vertical and angled crack are usually caused by settlement or heaving. Nevertheless, for horizontal crack are more likely to be caused by lateral pressure. There are varieties types of vertical crack such as:

**a) Vertical crack away from corners**



**Figure 1:** Foundation wall cracks

The crack is running along between the foundation and the top of the building. Cracks are usually the widest at the top of the building diminishing to a hairline crack at or near the foundation level (Figure 1). They may run through the foundation or they may only start above first floor opening. It is obviously detected in each of the opposite elevations of the building, will be a

single crack, and may be connected by a crack in a concrete floor or a flat roof. Besides that, the roof finishes of the pitched roof may be stretched or pulled apart. Diagonal cracks may also be associated with the defect.

**b) At the centre of panel**

Cracks occur near to centre of a panel of cavity brickwork (Figure 2). The crack is the widest at the bottom and may narrow to a hairline crack at the top (especially where the brickwork does not reach the top of the panel). The phenomenon usually occurs where panels of brickwork are set between columns, especially if they are of in-situ reinforced concrete.



**Figure 2:** Cracks at the centre of panel

**c) Between bay window corners**

Cracking at sides of bay windows (Figure 3). In either is the masonry or timber stud construction. It may become quite wide ranging in 5 – 15mm.



**Figure 3:** Crack between bay window corners

In the early life of cracking of the building may be inevitable. Cracks result from drying out or taking up of moisture or from the initial drying out of material that cannot be avoided. Cracks also is often exaggerated, it means a natural reaction of the owner or occupiers of the building. Besides that, cracks may be an indication of instability of the structure, even though it is taken seriously, it will have little or no effect on stability or other aspect of building performance apart from appearance.

Thermal expansion also is the causes in these cases where it actually is not the true main cause. Whichever origin of the crack will be, a convenient observation point will be provided. It is easy to observe changes in size where a crack opens and closes, whereas changes in the overall dimension of a wall can be measured only by using special equipment.

Besides that, slight movement also can cause cracking to large building. However, the occurrence has nothing to do to small building. The result is shown where the large concrete roof

slabs disrupts the perimeter parapet as it expands and contract in response to temperature variations. A temporary load or lack of support also may also be result to cracks. There is no evidence detected when the causes of cracking are being investigated. Cracks also have subjected influence. Maybe it is not described above, but it can probably happen if they give less maintenance or awareness.

### 3.2 Peeling paint



**Figure 4:** Peeling Paint

Peeling usually occurs on building facades, mainly on plastered walls, columns and other areas which are exposed to excessive rain and great dampness (Figure 4). Some buildings that are located near the sea may face a much higher risk once the signs of peeling paint are visible on the exterior walls. (Md. Kasim N.D, 2009)

Peeling paint is always the result of poor surface preparation. The majority of peeling paint problems occurs on surfaces exposed to the rain, sun, and the variation degree of temperature. Walls that have involved can be an unsightly mess in a home or building. It may result in embarrassment and frustration to the homeowner. If paint peels from an interior wall, the reason for the peeling paint is mostly often due to an improper preparation of the surface before painting. Apart from that, the moisture surrounding the wall also seeps in through from the wall to the paint surface. Thus, in order to repair and restore, repainting the wall that had peeling paint on it can be made as to make it attractive again. According to Midway Industrial Supply, peeling paint is simply other types of flaking where the amount of paint film remove is greater. Flaking is the lifting of small-to-large sections of the paint and is due to poor adhesion and to the brittleness of the paint.

It happens when new plastered or skimmed walls or ceiling are not given enough time to completely dry before painting. The temptation is to start painting as soon as the plasterer has left the building but plaster takes longer to completely dry. The heating on full blast to try to speed up the drying process also result to peeling paint. This is because the sudden rise in temperature can cause different problems.

Another reasons that peeling paint occurs is that when the initial coat of paint on the new plaster is bog standard silk applied undiluted directly to the plaster. For the bathroom ceiling cases, it has been freshly painted on the new plaster which has never had a chance to dry. This is because the bathroom is in constant use and then the shower is being used before the paint is completely dry.



### 3.3 Rising Dampness



**Figure 5:** Rising dampness problem

Dampness is generally defined as unwanted and excessive water or moisture. The existing of dampness in building is one of the most damaging failures that really must be taken care of. It can cause damage in brickwork by saturating them, decaying and breaking up of mortar joints, rotting in the timber structures, defecting by the corrosion of iron and steel materials and also destroying the equipment in the building. Dampness in walls has been taken in consideration in recent years. If even the level of dampness is low, the value of the building can be highly affected.

According to Belgrade Charter (1975), dampness can be a serious matter, particularly to the building located near water sources. Somehow, the water can enter the building bit by bit through different routes resulting in dampness. Furthermore, prevailing wet wind and rain will due to water penetrations that occur through walls.

Dampness also occur when water penetrate through capillaries or cracks between mortar joints, and bricks or blocks before building up trap moisture behind hard renders. Moreover, contribution of dampness is due to the existence of gravity. The other factor such as leaking gutters or down pipes, defective drains, burst plumbing, and condensation due to inadequate ventilation also can be the factors yielding to dampness occurrence. Dampness in building originated from a number of sources such as:

**a) Rain**

Precipitation can be wind driven that it penetrates joints that remain watertight in normal weather condition. The gutter overflow also can collect and be the aspects of dampness against walls.

**b) Condensation**

Humid air condensation on cooler surface or within, or between, building materials also can result to dampness. Air can become humid in several ways, including from the occupants' water vapours.

**c) Rising damp and flooding**

It may be contract with groundwater or floodwater. It also the groundwater may be absorbed by the walls and transported up the wall by capillary action.

**d) Services leaks**

It may not just from pipes and tanks, but also the overflowing of condensation forming together with ventilation systems.

**e) Construction process**

The construction process too can play its role in this scenario. It is where the process of mixing water to form mixtures that dry out for the construction purpose before the building is functioned, but sometimes by retaining moisture (sealed in by impermeable finishes) that shows and causes problems in the completed building.

**f) Use of the building**

This may includes the cleaning of the building, spills, and apparatus leaking.

**g) Moisture in the air**

It is in contrast with condensation. Hygroscopic salts can extract moisture from the air in condition that would not allow that moisture to undergo the process of condensation.

Dampness comes and goes according with the change of condition. Dampness also may leave stains or traces of mould and lichens and also in certain cases, mosses.

### 3.4 Timber decay



**Figure 6:** Brown rot Decay



**Figure 7:** Timber decay of Flat roof

Timber defect are classified into two major groups, non-biological and biological deteriorations. Non-biological deterioration consists of physical decay, excessive moisture content, dimensional instability and chemical deterioration. These defects are mainly caused by the timber in service being subjected to environmental exposure. The most common and destructive timber biological deterioration is those due to dry rot, wet rot as well as insect attraction. (N.H. Ishak)

Typically timber decay may occur at roof timber, floor timber and joinery timber such as door frame or window frame (Figure 6 and Figure 7). This defect results whether woodworm infestation is active or there is evidence of decay such as wet rot and dry rot. Dry rot also can be destructive and spread considerable distance within an effected building or home. It is essential that the cause and full extent of the attack is established. Besides that, timber decay in building or home will only occur if the timber becomes sufficiently wet.

According to Exposure Surveying LTD, timber part of a building will display differing levels of moisture content. Apart from that, it is indicated that wood rooting fungi will not affect the timber with moisture content below 22% and wood boring beetles will not be successful in timber with moisture content below 12%. This reading will change depending on the number of years.

According to Taylor (2000), timber is durable material and would last indefinitely as it does not deteriorate spontaneously. Magnificently, atmospheric condition such as rain, frost and acids that would normally affect other materials, however only has little effect on timber. It will deteriorate if attracted by certain of external forces.

Timber is also subjected to biological deterioration caused by living organisms such as insect infestation, fungal decay and marine borers. On the other hand, it is highly reliant on combination of a suitable temperature, moisture, oxygen, and cellulose in timber. (Richardson, 2001). Generally, the most common causes of timber decay are as follows:

#### a) Design

Usually proven in many older buildings, structural timbers are embedded into external walls and encased into solid floor, which are being the common causes of timber decay.

#### b) Alterations

This is regularly seen when sand and cement rendering has been applied to the exterior of the building, trapping moisture and elevating the moisture content of timber window lintels and embedded joints, leading to their decaying.

#### c) Maintenance

Blocked gutters, missing roof tiles and leaking pipes will all channel the water to ingress into the fabric of the building, which will then affect timber to decay if the problems are not noticed and restored soon enough.

#### d) Wood boring insect

It is a fact to know that old building or home will somehow, have evidences of some form of beetle activity, which will mostly be historic and will have died out years ago.

Timber that is used in the building during construction may have high sapwood (high in nutrients) content and have been susceptible to beetle infestation. However, as the sapwood has been depleted and the moisture levels within the timber remain stable, the beetle infestation will

die out. The beetle will only infest the heartwood section of the converted timber if it has been modified by fungal decay.

e) **Fungal decay**

Fungal decay occurs when higher level of moisture that consequently leads to the development of beetle infestation. It can be separated into two groups, white and brown rots. White rots have a bleached, fibrous appearance and substantial loss in weight is evident in the timber. It happened when there is high moisture content on timbers that are already decayed by brown rots. Brown rots are synonymous with the darkening of the timber, cubical cracks and are mainly found in softwood.

### **3.5 Insect or termite attacks**

Termites are small, pale to brownish black in color, insect that capable of feeding on mostly anything including timber. The timber is easily deteriorated if exposed to water penetration, high moisture content and loading beyond its capacity as this greedy and colony-living insect is easily attracted to it. Insect or termite attacks pose a threat to damp and digestible timber found in wall plates, the feet of rafter, bearing ends of beams and trusses. Affected timber can be treated by pressure-spraying with insecticide or fumigant insecticidal process. (A Ghafar Ahamd)

Subterranean termites or underground termites are the most destructive insect pests of wood. The activity of them is often not readily noticed because it is hidden behind wallboards, sliding or wood trim. Basically, foraging of termites by dead trees and brush provides a natural food source. When natural vegetation is cleared and houses are built, termites often switch to feeding on wooden structures. Next, they will continue to enter the building through wood that is direct contact with the soil and by building shelter tubes over or through the cracks found in the foundation. Infestation of termites can do damage to any cellulose-based material in direct contact with the soil. (Roger E. Gold)

Most of timbers that are commonly affected by termites are plywood, meranti, and selangan batu and also belian (ironwood). Any building that touches the soil and from tree branches will be attacked by termites. Besides that, dead wood, tree stumps and nearness to forest areas also increase the likelihood of the attack. To avoid this, the forest must be cleared for building, and the dead wood should be removed and are not left to rot under the residence. On top of that, the beams also should be supported on old stumps. (Lipa A, 2001)

Termites will survive as long as the situation or environments meet their chance of survival. They can spread easily in a blink of an eye into larger area and build their nest there, in the building or property. The requirements in their chance of surviving are;

a) **Moisture**

Termites will survive in moist environment. This is because they do not have hard body cover and may easily lose moisture from their body. Thus, consistently humid environment is well suited for them. The sources of moist are from leakage of water pipe, roof system and other source of water habitat such as pool, lake, or pond.

b) **Source of food**

Any surrounding area that has dead wood is probably foraged by the termites. Any building structure material that is made from wood or timber will be easily targeted by them if it is wet and moist.

c) **Dark, and Low Light Intensity**

If the building has a very low tolerance to light, it will to provide a well habitat for immature grow of termites.

d) **Minimal flow of air**

Minimal flow of air or low ventilation in building due to humidity in certain area which can lead to higher chance of survival of community of termites.

### 3.6 Fungi and Small Plant Attack



**Figure 8:** Fungi on external wall



**Figure 9:** Fungi on internal wall

Mold and fungi are found everywhere either both indoors and outdoors all the year round (Figure 8 and Figure 9). The terms fungi and mold are often used interchangeably, but mold is actually a type of fungi. Concerning about indoor exposure to mold has increased along with public awareness that exposure to mold can cause a variety of adverse health effects. There are many thousands of species of mold and most, if not all of the mold found indoors comes from outdoor sources. It seems likely to grow and become bigger threat only when there is water damage, high humidity, or dampness.

Mold is addressed in specific standards for the general industry, shipyard employment, and the construction industry. Molds live in the soil, on plants, and on dead or decaying matters. Outdoors, molds play as a key role in the breakdown of leaves, wood, and other plant debris. Molds belong to the kingdom of Fungi, and unlike plants, they are lack in chlorophyll and must survive by digesting plant materials, and consequently inverting them and other organic materials as food. Without molds, our environment would be overwhelmed with large amounts of dead plant matter.

Molds produce tiny spores to reproduce, just as same as those plants that produce seeds. These mold spores can be found in both indoor and outdoor air, and settled on both of the surfaces. When mold spores land on a damp spot, they may begin growing and digesting whatever they are growing on in order to survive. Since molds gradually destroy the things they grow on, you can prevent damage to building materials and furnishings and save money by eliminating their growth.

Molds produce and release millions of spores small enough to be in the air, water, or insect borne. They can also produce toxic agents known as mycotoxins. Spores and mycotoxins can have negative effects on human health.

The moisture of wall occurs due to many causes. There are water leakages, drain block, roof leakage and so on. In addition, improper material also was used for the building. Other causes of moisture due to DPC that is not installed correctly for the particular building. Instead of the moisture, the high level of humidity around the building also being affected due to abundant growth of trees and insufficient direct sunlight. Moreover, spores of mold from trees can be spread to the building by the assist of air, water and insect borne. Molds are found everywhere inside and outside, and can grow on almost any substances when moisture presents. Molds reproduce by spores, which can be carried by air current. When these spores land on a moist surface that is suitable for life, they begin to grow. There are three common causes of mold

**a) Water leakage**

Water leakage will happen by the plumbing that is not installed properly. Some time water leakage also comes from the toilet. Besides that, the gutter of roof also can cause the mold that will attach itself to the wall.

**b) Moisture**

Moisture of the wall can cause the faster growth of the mold. The moisture is affected due to the improper material that was used for this environment where this building receives less of sunlight.

c) **Humidity**

Higher humidity can cause the growth of mold faster. Plus, the residence was surrounded by abundant of big trees and reduces of direct sunlight through the building. Thus the degree of humidity around the building is high.

**3.7 Defective plaster rendering**

Plaster or render is like mortar coating over the block work. The coating on the inside walls called plaster, then the coating outside the walls called render. Plaster and render is totaling different. The render is generally richer and mostly in cement than the plaster due to weather resistant.

The both of plaster and renders have different function. The plaster insides the walls to make the walls smooth, easy to clean, avoid from insect, and for better appearance. Apart from that, the plasters act as a protection against fire. The other functions are breathable for walls, abrasion resistant, and suitable for decorating or covering with coating, wallpaper and tiles. For the renders, is provided to protect them from the influences of weather.

Mostly the defective plaster rendering occurs on the external walls, column and ceiling. Defective rendering are normally caused by biological attacks arising from penetrating rain, evaporation, condensation, air pollution, dehydration and thermal stress. The mould or harmful growth, insect, animals, and traffic vibration also will contribution causes of defective plaster rendering. Prior to being decomposed and broken apart, rendering may crack due to either shrinkage or movement in the substrate. (A Ghafar Ahmad). Types of defective plaster rendering

**a) Cracking in Plastering**

This is because of breaking away the section of the plaster. Penetration of rain to the external surface of structural, have allowing admittance of rain to the back of the intact plaster coat. So, any weakness in the bond between plaster and background or between renders coats will make the further defect.

**b) Holes in Plaster wall**

Holes usually occur because of user or human made such as hanging family picture, shelves or other decorative item to the wall. the is easily to be filled in with a tad of sparkling compound.

**c) Plaster falling off from ceiling**

Often the vibration of people going up and down by the stair for many years is cause to plaster falling off from ceiling. The vibration will travel through the plaster and cause hairlines cracks between the wook lath, and plaster.

**d) Shrinkage Cracking**

When strong mixes of render are used on weak or bad prepared background have due to shrinkage cracking. if the crack only in the topcoat, it caused the excessive cement in the finish coat or excessive thickness or if the renders is too wet.

*Causes of defective of plaster rendering as follows:*

**1. Loss of bond between coats**

It means inadequate key or mineral bond, rapid loss of moisture to undercoat, swelling of clay materials in unwashed sand, a stronger outer coat, inappropriate paint and finish used.

**2. Surface cracking**

High strength plaster on a weak background, clay contaminated sand and structural movement will due to surface cracking. Normally, happen when drying shrinkage on surface.

**3. Friable powdery surfaces**

It means rapid drying, migration of salts (these usually follow a pattern of moisture movement through the building)

**4. Water damage**

Source of water comes from overflowing tub, leakage in the toilet or shower, seep out of plumbing or roof, storm damage, cracks around a chimney, and the list goes on. All of these will eventually cause to the rust of nails, and some other dirt or debris.

**5. Movement of structure**

The settling of the house, expansion or shrinking of the wood inside the ceiling or walls is due to movement. Besides that, the external factors such as vibration from the outside construction, traffic or even sound wave also contribute to movement of the structure.

### **6. Non suitable of renders and plasters**

The cement renders has low rate of vapor exchange. For the long time period, the wall contains high level of damp causes the external render to crack and delaminate.

### **7. Chemical attacks**

If the sulphate is applied to strong render to the walls, it will probably cause to shrinking. Plus, rain can also penetrate the cracks. A part from that, a soluble salt will present in some brick if the wall behind the renders become saturated. At the same time, it will react with the cement in the mortar joints to produce a chemical compound.

### **8. Efflorescence**

Efflorescence is like white, a fine, powdery deposit of water soluble that's depends of types and total of salt in the walls masonry as the water evaporates. It takes a long time to produce. It happens wherever there is the presence of wet surface area.

### **9. Lime Bloom**

This chemical reaction is the result by undergoing through the process of hydration. Lime bloom contains the white film of calcium carbonate that will affect the renders. The sign is easily noticed as there is a change in color which is fairly pale color.

### **10. Popping or Pitting**

When the renders is finished with cement lime or sand render and calcium oxide, this problem will occurs.

## **3.8 Roof Defect**



**Figure 10:** Sagging of roof

Roof as usually exposed to the element, particularly to the extremes of temperature degree and change, solar radiation, and wind action. Roofs have special risk due to the design of the building itself such as services passing through the roof covering, and internal gutters. The consequence small defective of roof will may be greater effect of similar defect in a wall or other element.

Roof defect are divided into structural faults and defect in the waterproofing material. The majority of roof defect that occurs is distortion of either the roof or of the wall at roof level (Figure 10). Normally, structural defect can be identified from the visual inspection. For the defect of waterproofing material, it will provide the building to be durable under wide range of exposure condition. The pitch roof sagging result is from the slating or tiling that has dished appearance, and the ridge may also have sagged. This defect is more commonly found in older pitched and tiled or slated roof.

While there are many different types of roofing defects, most are known to be causes by:

#### **a) Improper installation**

The installation of roof will need a number of skilled workers. If the roof is not installed properly, it will yield to roof defect such as roof leakage and sagging. The causes of roof defect are because the worker maybe not have a license, or certificate apart from having a low level of experience.

**b) Poor workmanships**

Quality of workmanship is needed such as to maintain the roof or construction of roof. The life expectancy will be reduced due to the poor workmanships which is can both bring to loss for both the dealer and the buyer.

**c) Defective materials**

Materials themselves also may be the factors to the roof defect. The material too, may be not suitable to weather condition. Sometimes, it is not installed correctly also due to sagging and deformation.

**3.9 Erosion of mortar joint**

Mortar is a mixture of sand and cements in form of brick and block walls. The compositions of mortar are sand, water, and cement or lime. When it dried, it became rigid aggregate that is defined as building paste. While it was still wet, the mortar is spread along the edges of brick or stone.

Mortar joint is function to the masonry block or brick wall. This is because of there is strong and durable materials. Mortar joint is considering deterioration when have the sign such as:

i. They have eroded more than 1/4" from the face of the unit or beyond the depth of the original joint.

ii. Cracks are visible within the mortar

iii. The bond between brick and mortar is broken or the mortar is soft or crumbling

iv. Any portion of mortar joint is missing

Mortar joints are not intended to be a permanent part of a masonry wall, but rather, an expendable component that does have to be replaced at intervals. Removing deterioration of mortar joint is having through the repointing process and replacing it with new mortar.

*The causes of erosion of mortar joint as follows:*

- Spalling of the mortar and brick will occur due to the expansive nature of frozen water. This happens when excessive moisture enters the wall.

- Any building that are built without adequate expansion joints will be the cause for this problem.

- The cracking occurs due to movement, or from thermal expansion. Besides, uneven settlement in building's foundation also can produce to cracking.

- Probably the mortar is unstable to be as resistant as it should be to severe weathering such as the use of high cement content mortars can result in loss of bond between brick and mortar.

**3.10 Unstable Foundation**

Foundation is necessary to support a building and the all of its loads that are within or on it. The foundation should be made from material that will not fail and lost its stability in the presence of ground or surface water. Usually, the foundation is constructed with a depth of one semi-meter from the ground level. When the building or property is designed, there should be little or no cracking in the foundation and of course zero water leaks. Besides that, it is necessary to determine the total load to be supported. The foundation will be carrying out both the dead and live load and will transfer the load to the soil. Moreover, the function of the foundation is to avoid building from sinking due erosion or movement and also to stabilize the building.

If there is presence of difficulty in the foundation, it will defect all of the building structure. Some of the affects of foundation problem are building collapsing, crack on the floor and the wall, the wall leading and many others.

Another unstable factor is the movement of the soil because of presents of the water flow. Besides that, the faulty design of foundation also will cause it to overload. Apart from that, the using of material for the foundation is not being followed as the standard and requirement being agreed. The causes of unstable foundation as follows:

**a) Movement of the soil**

There is one major cause in the movement of soil that is the presences of water flow. Especially for the hill slope area, the probability of landslide occurrence is higher particularly while heavy downpour.

**b) Faulty Design**

Design is important thing before the building is constructed. Design will ensure the foundation is suitable for supporting the building. If the design fails to fulfill the requirement standard, it will cause the building to collapse.

**c) Overloaded**

The maximum load of building will be stated by the architect. The building will collapse if the load is not suitable with the foundation. The foundation must be stable enough and suitable to support the building and its total load. (Dead and Living Load)

**d) Material**

Material also will affect the stability of the foundation. The material used will affect the strength of the concrete. It is also being a must to ensure that the foundation will last long and have longer life expectancy. At the same times, the foundation should be made from materials that will do well even in the presence of ground or surface water.

**e) Natural Disaster**

Another factor is natural disaster that is unexpected. It also happened because of human negligence.

**4. Conclusions**

It should be pointed out that, entire buildings are subjected to the various forms of defects, failures, deterioration and variation. The literature has explored a number of building defects and its contribution factors which can be associated to the major theme of this paper. It is significant to appraise each defect and failure in every part of building and find out the primary causes of each individual defect and failure. Then, remedy them correctly. The contribution factors to these defects and failures must be investigated intensely. Once founding out the possible causes of the defects and failures, it is imperative to distinguish how to keep away from it in the future and reduce the effect to the minimum.

**5. References**

1. A Ghafar Ahmad (2004) The Dilapidation Report, Journal of "Majalah Arkitek", vol. 16, pp. 19–21.
2. A Sufian and Rozanah Abdul Rahman (2008) Quality Housing: Regulation and Administrative Framework in Malaysia, Int. Journal of Economic and Management, pp. 141–156.
3. Burden, E. (2004) Illustrated Dictionary of Architectural Preservation: Restoration, Renovation, Rehabilitation and Reuse. New York: McGraw Hill.
4. Blake Turner & Co Solicitor, (1969) Building Defect: The Legal Position.
5. Belgrade Charter, (1975) Conservation in Belgrade, European Commission UNESCO, International Conference Spain.
6. Code of British Standards (BS 3811: 1964), Maintenance.
7. California Civil Code 896, Construction Defect Law.
8. David Hall (1988) Building Defect Inspection and Report.
9. F Abu Bakar (2008) Satisfaction Level on Quality of Material and Workmanship of low cost housing in Klang Valley.
10. Ghani S. and Lee L. M. (1997), Low Cost Housing In Malaysia, Utusan Publications & Distributors Sdn. Bhd. Kuala Lumpur.
11. Lipa A (2001) Termite species that attack buildings and timber at Similajau National Park, Malaysia, *Hornbill* 5:nn-nn
12. Lee. M. (1987) Building Maintenance Management, Third Edition, Collin, London.
13. Micheal S. Poles (2013) Construction Defect.
14. Md Kasim N.D. (2009) Building Defect: Case Study at Taman Seri Indah, Permatang Pauh.
15. Northern Territory Consolidated Regulation, (2013) Building (RBI and Fidelity Fund Schemes) Regulation.
16. Nor Haniza Ishak, 2 Zuraini Md Ali, 3 Yacob Omar, Helena Aman Hashim, Case Studies on Timber Defects of Selected Traditional Houses in Malacca.
17. Porteous, (1992) Improving Maintenance and Reducing Building Defect through ISO 9000, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 7, pp. 6–24.



18. Ransom, W.H. (1981). *Building Failures; Diagnosis and Avoidance*, E &F.N Spon, New York.
19. Richardson, B.A. (2001) *Defect and Deterioration in Building*.
20. Rojer E. Gold, (2005) *Subterranean termites, House and Landscape Pest*.
21. Ramli, (2006) *Prinsip and Praktis Pengurusan Penyelenggaraan Bangunan*, Pustaka Ilmi, Batu Cave.
22. Tan Wei Cheun, (2008) *Building defects on School Building*.
23. Taylor, GoO, (2000) *Material in Construction- An Introduction*, third edition, Pearson Education Ltd. England.

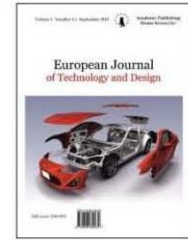
ISSN: 2310-0133

Founder: Academic Publishing House *Researcher*

DOI: 10.13187/issn.2310-0133

Has been issued since 2013.

<b>European Journal of Technology and Design</b>
--



## A Brief Review of Main SVM-based Ranking Models

<sup>1</sup>Igor Yu. Botian

<sup>2</sup>Lev V. Utkin

<sup>1-2</sup> Saint Petersburg State Forest Technical University, Russian Federation  
Department of Control, Automation, and System Analysis

<sup>1</sup> E-mail: igor.botian@gmail.com

<sup>2</sup> E-mail: lev.utkin@mail.ru

**Abstract.** The paper deals with a critical review of SVM-based ranking models which are used to solve a certain set of machine learning problems. A short description, advantages, and disadvantages are provided for each model, as well as general comparison of them. A problem connected with getting a training data for these models is also raised. Applications of the models are given, as well as future research directions.

**Keywords:** Machine learning, ranking, support vector machine, training data, comparison judgments.

### 1. Introduction

Nowadays amount of information which a person has to deal with every day increases steadily. In this connection, a matter of value of the information being look-up by the person or incoming for him is raised inevitably. In other words, a problem of information relevance is emerged. Under conditions of broad proliferation of computer systems, one of the main means of solving such the problem is so-called search engines.

Depending on their nature, they provide different information to user. For instance, web search engines provide relevant results of user queries. At that, depending on a type of the query, user can get a list of web-links, the result of an entered mathematical expression, forecast information, and so on, as results of his query. There are engines providing an answer for a user question asked in natural language (Apple Siri, Google Now, Microsoft Cortana). Services like Shazaam searches for name of a song fragment recorded by the user. Finally, there are many online advertising services. The content of the advertising banner exposure to user is based on his search history, visited web-sites, his geolocation, etc.

Each search engine is based on the principle of data ranking. Thanks to this fact, depending on the query the same data can correspond to different relevance degrees. Information about relevance one or another data is taken from so-called training data. Values of all elements belonging to the training data are given by experts.

One of the most used approaches to learning to rank is an approach based on *support vector machine* (SVM) apparatus [1]. Based on its features, ranking problem reduces to data classification problem. It can be said that it may be treated as a general tool used for such the set of problems.

Classification problems are specific enough thus depending on application domain they may differ a lot. For example, a standard form of training data used in classification in the context of search engines cannot be obtained at all [2]. In these systems, a priori information which can be used in many other cases is represented in a form of some relative assessments. As a consequence of this fact, there is a need of development of appropriate approaches oriented on such the data processing.

## 2. SVM-based ranking models

By definition, the learning to rank problem is referred to a type of *supervised machine learning*. Such the learning consists of ranking model automatic selection on a given training data set. One of the ranking models is a model based on support vector machine method [1]. From mathematical point of view, the method consists in mapping of vectors representing input data into space with greater dimensional and further searching of a separating hyperplane with maximum gap in this space. The main advantage of this method is efficient realization non-linear separating functions in the context of the classification problem.

SVM-based models, as well as any ranking models, can be divided into three categories depending on the approach they based on [2]: pointwise, pairwise, or listwise. The main difference consists in what form input and output data have, as well as loss function.

**1. Pointwise approach.** It is expected that each input-output data pair confronts with a certain numerical assessment. In this case the learning to rank problem reduces to regression building: a numerical assessment is needed to predict for each single pair. In the bounds of this approach many existing machine learning regression-based algorithms can be applied directly.

**2. Pairwise approach.** While the approach is used, learning to rank problem reduces to building a binary classifier dealing with two input objects corresponding to the same query. It is needed to determine which of them is more relevant.

**3. Listwise approach.** The approach consists in building a model dealing with a set of all input objects corresponding to the same query. As a result it returns a list of these objects but ranked.

The main SVM-based models corresponding to these approaches are SVM-based pointwise model [3], RankSVM [4], and SVM<sup>map</sup> [5]. Review of each model is given below in further sections.

## 3. SVM-based pointwise model

The model is based on pointwise approach [3]. A principle of work consists in reduction of ranking problem to classification problem. In this case the classification is regarded to a variation of *supervised learning problem*, in which all output values are discrete. At that, an output value corresponds to a relevance degree of a given object. In this connection, the value relates to a certain object category. A rigorous mathematical definition of the algorithm and the corresponding optimization problem which implements this model are given in [3].

There is a disadvantage connected with SVM-based pointwise model. By its nature, ranking is more relative order prediction rather than a precise relevance degree of a given object. Thus while the model is applied, a relative order between objects can not normally take a part in the learning process by the reason of its absence.

## 4. RankSVM

The models are based on pairwise approach [4]. And the ranking problem in this case reduces to a binary classification problem. In comparison to SVM-based pointwise model, an output value is a relative order between objects, no an absolute value which characterizes a relevance degree of them. Thus, RankSVM does not have the disadvantage which is belonged to SVM-based pointwise model.

In its turn, RankSVM has a number of disadvantages. At first, by its nature, a result of binary classification is a list of objects which contains no information about difference in relevance degree between each two next objects. At second, RankSVM is more sensitive to imprecise data from the training set. It affects negatively on quality of obtained results. At last, dependence of a number of pairs on a number of objects is mathematically quadratic that negatively impacts on processing performance in case of a huge data.

Initially, the method was developed to improve search engines efficiency. In simple words, it is easier to describe this model in terms of web-search. In whole, RankSVM is comprised of three steps on learning stage:

1. It calculates distances between two any vectors given on step 1.
2. It maps input elements between queries and web-pages visited by the user into a certain feature space.
3. It states an optimization problem similar to SVM classification and solves such the

problem by means of a regular SVM solver.

A rigorous mathematical definition of the algorithm and the corresponding optimization problem which implements RankSVM are given in [4].

### 5. SVM<sup>map</sup>

A principle of work of SVM<sup>map</sup> is based on listwise approach [5]. As a whole, the model solves classification problem in more natural way rather than SVM-based pointwise model and RankSVM. It can be explained that these two models do not take into account the fact that some objects (or pair of objects) do not correspond to the same input query.

In other words, SVM<sup>map</sup> uses a whole set of objects corresponding to a query as one input object and a list of these input objects (or their relevance degrees) in ranked form. A rigorous mathematical definition of the algorithm and the corresponding optimization problem which implements SVM<sup>map</sup> are given in [5].

In accordance to previously conducted researches [6], efficiency of listwise ranking algorithms is better in whole rather than pointwise and pairwise ones. On other hand, a more efficient learning algorithm is needed in order to make the listwise approach more practical. It also regards to SVM<sup>map</sup> model.

### 6. SVM-based ranking models comparison

SVM-based pointwise model reduces ranking to regression, classification, and ordinal regression. In its turn, RankSVM reduces ranking to pairwise classification, whereas SVM<sup>map</sup> reduces ranking to a brand-new problem and defines specific algorithms for this.

Advantage of the first two models consists in possibility of direct application of many existing various tools. The main disadvantage of them is that individual ranking features are not considered in definition of algorithms used by them. An issue related with SVM<sup>map</sup> consists in difficulty of algorithms used by the model.

### 7. Problems connected with training data set

On the assumption of application of the models given above and taking into account of their advantages and disadvantage, there is a choice of an appropriate model needed in order to solve a certain practical problem. At that, to build an efficient model another important problem should be taken into account. It consists in preparation of a high qualitative training set. The process, in its turn, connects with a set of problems:

- At first, the fact should be taken into account that a training set is needed to have a great number of objects but at the same time have a cost of its getting as less as possible. A striking example which exposures this issue is a straightforward inquiry of a great number of respondents: an amount of data obtained is limited and the process itself is costly.

- At second, data obtained by experts is not always enough and even correct because there may be people subjectivity taken a place during inquiry process. Development and further application of the data selection strategy can be regarded as a solution for this issue. First examples of such the strategies are Depth-k pooling [7], MTC [8], and LETOR [9].

To reduce cost of a training data acquisition it is logical to approach to automation of this process. In this connection, there is a need to develop and apply a strategy which favors more well thought-out selection of training data elements. In extreme case, it may help to get rid of overfitting issue. In its turn, when it is possible, analysis of actions made by the user can be applied to promote further adaptation of used algorithms.

The issues given above are not fully solved in the bounds of existing models. And not only SVM-based models but others also. At that, it should be noted that these problems are just main whereas the process of training data acquisition is conjugated with a number of additional problems [2].

### 8. Future research directions

Nowadays there many researches are conducted in the area of learning to rank problems. In this connection, new and new problems required further investigation are emerged. At that, it can be noted that they affect various aspects of the ranking problem.

As it was said before, ranking algorithms based on listwise approach are researched in less degree rather than algorithms based on pointwise and pairwise approaches. At that, it is noted a need to develop more advanced ranking models rather than existing ones [10].

A problem related to building a training data set takes a place. Generally, the dataset is comprised of nonrandom objects selected manually. Each of them affects on results of the learning in some degree, whereas real data may have a rather big percentage of objects which correspond to a small relevance degree. Solution of this problem is connected with well-thought selection of objects belonging to the training data set.

There is another problem related to a training data set [2]. By its nature a training data set built basing on experts' assessments does not confront by its scale with amount of data needed for rigorous learning. At that, possibility to adapt existing algorithms to new incoming data is not taken into consideration. Such the issue can be solved by means of so-called self-learning of ranking algorithms, when processed data takes a part in the training set in a certain degree.

As of ranking algorithms, there are several problems connected with them. At this time a few attention is paid to scalability on development of the ranking algorithms [11]. The possibility to parallel the algorithm may considerably decrease its execution time in case of a huge amount of data. It is especially important in real-time systems, where a trade-off between results accuracy and algorithms time consumption is emerged inevitably [12]. In its turn, a problem connected with flexible selection of ranking features may be also referred to this category [13]. The training data set directly influences on results of data processing. At this moment it is built on the assumption of subjective experts' criterion. But on the other hand it might change at runtime to meet optimization needs. At that, the algorithm itself should be resistant to changes in the feature set and not to depend on it [13]. To some extent, it is also connected with self-learning of the ranking model.

At last, a ranking problem is emerged on conditions that the given information is imprecise or incomplete. In this case a priori relative assessments are group, or in other words interval. It should be noted that at this moment such the problem is not researched enough. Authors of this paper are working on this direction.

## 9. Conclusions

Aim of this work was to give a short critical review of existing ranking models based on the support vector machine apparatus. The following models were considered: SVM-based pointwise model, RankSVM, SVM<sup>map</sup>. They are based on fundamentally different ways of input data processing. Main advantages and disadvantages were provided for each model. Comparison of these SVM-based models was given.

Along with SVM-based models review, existing problems connected with building a training data set were enumerated. Implementation of each model is based on this data set. Future research directions were given. From the authors point of view, one of the most challenging open issue deals with modification of existing ranking algorithms is their adaptation to imprecise and limited relative assessments.

## 10. References

1. Herbrich, R., Obermayer, K., Graepel, T.: Large margin rank boundaries for ordinal regression. In: *Advances in Large Margin Classifiers*, pp. 115–132 (2000).
2. T.-Y. Liu: *Learning to Rank for Information Retrieval*, Springer (2011).
3. Nallapati, R.: Discriminative models for information retrieval. In: *Proceedings of the 27th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2004)*, pp. 64–71 (2004).
4. Joachims, T.: Optimizing search engines using clickthrough data. In: *Proceedings of the 8th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2002)*, pp. 133–142 (2002).
5. Yue, Y., Finley, T., Radlinski, F., Joachims, T.: A support vector method for optimizing average precision. In: *Proceedings of the 30th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2007)*, pp. 271–278 (2007).
6. Xia, F., Liu, T.Y., Wang, J., Zhang, W., Li, H.: Listwise approach to learning to rank—theorem and algorithm. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning (ICML 2008)*, pp. 1192–1199 (2008).

7. Aslam, J.A., Kanoulas, E., Pavlu, V., Savev, S., Yilmaz, E.: Document selection methodologies for efficient and effective learning-to-rank. In: Proceedings of the 32nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2009), pp. 468–475 (2009).
8. Carterette, B., Allan, J., Sitaraman, R.: Minimal test collections for retrieval evaluation. In: Proceedings of the 29th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2006), pp. 268–275 (2006).
9. Liu, T.Y., Xu, J., Qin, T., Xiong, W.Y., Li, H.: LETOR: benchmark dataset for research on learning to rank for information retrieval. In: SIGIR 2007 Workshop on Learning to Rank for Information Retrieval (LR4IR 2007) pp. 3-10 (2007).
10. Qin, T., Liu, T.Y., Zhang, X.D., Wang, D., Li, H.: Learning to rank relational objects and its application to web search. In: Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web (WWW 2008), pp. 407–416 (2008).
11. Chang, E., Zhu, K., Wang, H., Bai, H., Li, J., Qiu, Z., Cui, H.: Parallelizing support vector machines on distributed computers. In: Platt, J., Koller, D., Singer, Y., Roweis, S. (eds.) Advances in Neural Information Processing Systems 20 (NIPS 2007), pp. 257–264. MIT Press, Cambridge (2008).
12. Wang, L., Lin, J., Metzler, D.: Learning to efficiently rank. In: Proceeding of the 33rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2010), pp. 138–145 (2010).
13. Chang, Y., Liu, T.Y.: Future directions in learning to rank. JMLR: Workshop and Conference Proceedings 14, pp. 91–100 (2011).

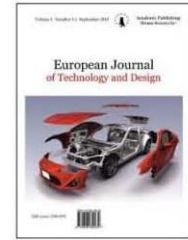
ISSN: 2310-0133

Founder: Academic Publishing House *Researcher*

DOI: 10.13187/issn.2310-0133

Has been issued since 2013.

**European Journal of Technology and Design**



## **Study of the Properties of Transition Metals and Alligations on the Basis of Major data of the Method of Positron Annihilation Spectroscopy**

<sup>1</sup>V.I. Grafutin

<sup>1</sup>O.V. Ilyukhina

<sup>1</sup>E.P. Prokop'ev

<sup>1</sup>V.A. Ilyukhin

<sup>1</sup>Yu.V. Funtikov

<sup>1</sup> NRC "Kurchatov Institute" Federal State Institution "State Scientific Center of the Russian Federation - Institute of Theoretical and Experimental Physics." FGBI "SSC RF - ITEP." (NRC "Kurchatov Institute" FGBI "ITEP"), Russian Federation  
25, B. Cheremushkinskaya st., Moscow, 117218  
E-mail: epprokopiev@mail.ru

**Abstract.** The article presents the data of the study of vessel steel, used in acting pressurized-water reactors–440. The studied steel patterns had vacancy defects, also caused by neutron irradiation. The sizes of the defects were detected. The article proves that the method of positron annihilation spectroscopy is one of the most efficient methods in detecting the size of nanoobjects (vacancies, vacancies cluster), independent volume of reed marks, cavities, hollows, their concentrations and chemical compositions at the site of positron annihilation in defect materials.

**Keywords:** positron annihilation; transition metals; proton and neutron irradiation; nanoobjects radius; cavities, hollows, vacancies.

### **1. Введение.**

Работа посвящена исследованию переходных металлов, используемых в сталях действующих реакторов ВВЭР-440 [1, 2]. В процессе эксплуатации реакторов этого типа происходит охрупчивание конструкционных материалов. Считается, что основной причиной охрупчивания корпусных реакторных сталей является образование нанокластеров, содержащих преимущественно медь и фосфор [3, 4]. 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 радиационно-индуцированных состояний. В рамках международной программы PRIMAVERA проведены комплексные исследования материала корпусов реакторов ВВЭР-440 с использованием различных физических методик [5-9].

Данная работа посвящена исследованию переходных металлов, входящих в образцы этих сталей одним из методов позитронной аннигиляционной спектроскопии. Методы позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) являются одними из эффективных неразрушающих методов исследования нанобъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции позитронов.

В последние годы комбинация этих методов широко и успешно используется для исследования радиационных дефектов в материалах атомной техники [10-16]. Целью настоящей работы являлось исследование электронных и дефектных свойств переходных металлов, входящих в состав реакторных сталей, путем измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (метод УРАФ). Исследованы образцы переходных металлов, используемых в сварных соединениях сталей с различным содержанием фосфора, облученные нейтронами до флюенсов  $6 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>, облученные и отожженные [17-19]. Для исследуемых металлов экспериментально определены такие важные характеристики металлов, как энергия Ферми, удельное число свободных электронов, приходящихся на один атом металла, их концентрация в зоне проводимости, размеры и концентрация радиационно-индуцированных дефектов. Исследовано влияние нейтронного облучения и последующего отжига на свойства конструкционных материалов, используемых в реакторах ВВЭР (облучение образцов свидетелей проводилось в каналах Ровенской АЭС). Химический состав и состояние исследованных образцов сталей представлен в таблицах 1 и 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	<b>0.027</b>	0.013	1.42	0.13	0.49	<b>0.16</b>	0.19
MP	0.04	0.39	1.15	<b>0.031</b>	0.013	1.42	0.13	0.50	<b>0.16</b>	0.18
HP	0.05	0.36	1.09	<b>0.038</b>	0.014	1.54	0.13	0.51	<b>0.16</b>	0.19

LP - Сварной шов с «низким» содержанием фосфора

MP - Сварной шов со «средним» содержанием фосфора

HP - Сварной шов с «высоким» содержанием фосфора

Таблица 2.

Состояние исследованных образцов стали реакторов ВВЭР-440: 10 x 10 x 1 мм

Маркировка образцов	P (%)	Состояние образцов	Флюенс $\times 10^{19}$ н/см <sup>2</sup> (E>0.5 МэВ)	Кол-во
HP	0.038	необлученные	0	2
MP	0.031	необлученные	0	2
LP	0.027	необлученные	0	2
HP	0.038	облученные	1.22	2
MP	0.031	облученные	1.24	2
LP	0.027	облученные	1.22	2
MP	0.031	облученные	6.39	2
HP	0.038	облученные	5.95	2
LP	0.027	облученные	5.95	2
HP	0.038	облученные+ отожженные	5.71	2
MP	0.031	облученные + отожженные	5.94	2
LP	0.027	облученные + отожженные	5.71	2
Суммарное количество		Все позиции		24

**2. Описание метода УРАФ**

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) является современным методом изучения структуры вещества [10-20]. Ее суть состоит в имплантации в исследуемый образец позитронов, образующихся в результате  $\beta^+$  - распада радиоактивного источника (как правило, ядер изотопов Na-22, Cu-64, Co-58, Ti-44) и последующей регистрации параметров аннигиляционного гамма-излучения. В позитронной спектроскопии позитрон выполняет



функции зонда, аннигиляционные характеристики которого определяются свойствами среды, окружающей его в месте аннигиляции.

В веществе процесс аннигиляции позитронов может протекать как в свободных соударениях с электронами среды, так и через образование связанных состояний позитронов с электронами, атомами, молекулами и различными дефектами, при этом каждый канал аннигиляции вносит свой специфический вклад в экспериментальный аннигиляционный спектр. Естественно, для корректной интерпретации экспериментальных спектров ПАС необходимы надежные теоретические модели образования позитронных состояний, их взаимодействия с дефектами и продуктами радиолиза среды.

В настоящее время активно используются три основные разновидности ПАС: 1) регистрация временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ). Она состоит в измерении времени жизни каждого имплантированного в образец  $e^+$  (то есть интервала времени между регистрацией стартового гамма-кванта, испускаемого радиоактивным ядром - источником позитрона в момент бета+ - распада, и одного из аннигиляционных фотонов с энергией 511 кэВ); 2) измерение углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ). В этом случае регистрируется отклонение от 180 градусов угла разлета фотонов при 2γ-аннигиляции; 3) измерение доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ). Здесь измеряется отличие в энергии аннигиляционных фотонов (при 2γ-аннигиляции) от 511 кэВ.

Метод ВРАФ дает сведения об электронной плотности в месте аннигиляции позитрона, а методы УРАФ и ДУАЛ дают информацию о распределении импульсов электронов среды. Таким образом, методики ВРАФ и УРАФ дополняют друг друга и позволяют экспериментально измерять параметры всех каналов аннигиляции позитронов в среде и тем самым получать развернутую информацию об электронных и дефектных свойствах среды. В проводящих средах дефекты (например, вакансии), как правило, обладают избыточным отрицательным зарядом и поэтому притягивают позитроны. Исследование методом ВРАФ облученных нейтронами образцов сталей реакторов ВВЭР-440 показало, что доля позитронов, захваченных радиационно-индуцированными дефектами, зависит от флюенса нейтронов и при больших флюенсах ( $\approx 10 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>) практически все позитроны захватываются дефектами и аннигилируют в них [18-19].

Сопоставление измеряемых времен жизни позитронов в исследуемых материалах с известными временами жизни в дефектах различного типа позволяет идентифицировать тип дефекта, а по измерению доли позитронов, аннигилирующих в этом дефекте, получать информацию о концентрации дефектов. Параметры угловых аннигиляционных спектров содержат информацию об энергии аннигилирующей позитрон-электронной пары. Поскольку в процессе аннигиляции участвуют практически термализованные позитроны, то измеряемая энергия аннигилирующей позитрон-электронной пары определяется в основном энергией электронов атомов среды, окружающих дефект. Сопоставление измеряемой энергии с табличными значениями потенциалов ионизации дает информацию о химическом составе среды в месте аннигиляции позитронов, а энергия позитронов характеризует размер дефектов. Применение позитронной методики в атомной отрасли позволяет исследовать радиационно-индуцированные дефекты размером до одного кубического нанометра. Порог чувствительности ПАС в отношении подобных дефектов составляет примерно  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>.

### 3. Методика УРАФ

Установка по измерению углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) расположена в экспериментальном зале реактора ИРТ МИФИ. Источником позитронов в установке служит радиоактивный изотоп  $Cu^{64}$ , получаемый облучением нейтронами изотопа меди  $Cu^{63}$  в ядерном реакторе:  $Cu^{63} + n = Cu^{64}$ . Близость установки к ядерному реактору позволяет проводить работы с использованием мощных (несколько Кюри) источников позитронов, что существенно расширяет возможности установки, а тем самым и класс исследуемых сред. Используемые в измерениях источники позитронов представляли собой пластинки размером  $2 \times 2 \times 0,2$  см, вырезанные из фольги электролитической меди. Пластинки облучались сутки в реакторе ИРТ МИФИ нейтронами до флюенса  $1,7 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup>.

После выгрузки из реактора позитронные источники активностью несколько Кюри помещались в облучательную часть установки УРАФ. Угловое разрешение установки составляло 0,4 мрад. Число совпадений в максимуме кривой достигало  $(10 \div 16) \cdot 10^3$ .

Метод углового распределения аннигиляционных фотонов УРАФ [13-15] основан на регистрации совпадений от двух гамма-квантов с энергией  $\sim 511$  кэВ, возникающих в результате аннигиляции электрон-позитронных пар и разлетающихся в противоположные стороны в системе центра масс пары. При аннигиляции электрон-позитронной пары выполняются законы сохранения импульса и энергии. Если центр масс пары неподвижен ( $v = 0$ ), то оба  $\gamma$ -кванта разлетаются в противоположных направлениях (угол  $\theta = 0$ ) с одинаковой энергией  $k_1c = k_2c = m_0c^2 = 0,511$  МэВ. Если  $v \neq 0$ , то углы между направлениями разлета  $\gamma$ -квантов будут отличаться от  $180^\circ$ , а их энергия уже не будет равна  $0,511$  МэВ. Таким образом, измерение угла  $\theta$  (отклонение угла разлета  $\gamma$ -квантов от  $180^\circ$ ) позволяет определить импульс  $e^+e^-$  пары. Позитроны к моменту аннигиляции термализуются, поэтому угол разлёта  $\gamma$ -квантов определяется импульсом электрона.

В рамках модели свободного электронного газа электроны проводимости в металле имеют импульсное распределение:

$$n_e(p) = \left[ \exp\left(\frac{(p^2 / 2m) - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_F$  - энергия Ферми;  $k_B$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура.

Для низких температур это распределение близко к прямоугольному, поэтому в кривых УРАФ металлов наблюдается параболическая  $f_p(\theta)$  компонента:

$$f_p(\theta) = \begin{cases} (3I_p / 4\theta_p^3) \cdot (\theta_p^2 - \theta^2), & |\theta| \leq \theta_p; \\ 0, & |\theta| > \theta_p. \end{cases} \quad (2)$$

Аннигиляция позитронов в металлах и сплавах происходит как на электронах зоны проводимости, так и на электронах ионного остова. Оставшаяся после вычитания параболы зависимость, как правило, описывается одной  $f_g(\theta)$  или суммой нескольких гауссовых кривых вида:

$$f_g(\theta) = (I_g / \sqrt{2\pi} \cdot \theta_g) \exp(-\theta^2 / 2\theta_g^2), \quad (3)$$

где:  $I_g$  - интенсивность гауссовой компоненты;  $\theta_g$  - дисперсия гауссовой кривой;  $\theta_p$  - угол пересечения параболой оси абсцисс  $\theta$  («угол отсечки»).

На рис. 1 приведен характерный вид измеренных спектров УРАФ с разложением на параболическую и гауссову компоненты. После коррекции спектров угловой корреляции их разложение на параболические и гауссовы составляющие с учётом функции разрешения установки проводилось на ЭВМ с использованием программы ACARFIT.

Определяя из эксперимента параметр  $\theta_p$ , можно оценить импульс Ферми  $p_F$  и энергию Ферми  $\varepsilon_F$  исследуемого металла:

$$p_F = \theta_p \cdot m \cdot c; \quad \varepsilon_F = \theta_p^2 \cdot (mc^2 / 2) \quad (4)$$

В приближении модели свободного электронного газа параметр  $\theta_p$  определяет удельное число свободных электронов  $Z_c$  (число электронов проводимости), приходящихся на один атом металла, и их концентрацию  $n_p(\theta)$

$$Z_c = (8\pi / 3) \cdot (mc^2 / h)^3 \cdot (A / \rho N_A) \cdot \theta_p^3; \quad (5)$$

$$n_p(\theta) = Z_c \cdot n_a = (8\pi / 3) \cdot (mc^2 / h)^3 \cdot \theta_p^3, \quad (6)$$

а параметр  $\theta_g$  - энергию остовных электронов (т.е. электронов, для которых угловое распределение аннигиляционных фотонов в спектрах УРАФ описывается гауссовой функцией)  $\varepsilon_g = (3/2) \cdot (mc^2 / 2) \cdot \theta_g^2$ . Здесь  $N_A$  - число Авогадро;  $h$  - постоянная Планка;  $A$  - атомный вес металла;  $\rho$  - его плотность.

Принято сопоставлять экспериментально получаемые значения  $Z_c$ ,  $\varepsilon_F$ ,  $n_p$  с аналогичными параметрами идеального металла. Идеальным металлом считают такой металл, в котором все валентные электроны переходят в зону проводимости. В этом случае удельное число

электронов проводимости  $Z_c$  определяется номером группы периодической системы элементов Менделеева, а энергия Ферми  $\varepsilon_F$  и концентрация электронов проводимости  $n_p$ , в рамках модели свободного электронного газа, являются его константами

$$\varepsilon_F = (h^2/8m) \cdot (3/\pi \cdot n_A \cdot Z_c)^{2/3}; \quad (7)$$

$$n_p = Z_c \cdot n_A = (N_{A\rho}/A) \cdot Z_c, \quad (8)$$

где  $n_A$  - концентрация атомов в единице объема металла.

#### 4. Обработка экспериментальных результатов

На рис. 1 приведен характерный вид спектров УРАФ с разложением на параболическую и гауссовы составляющие. Использовались два типа обработки экспериментальных спектров: разложение на один гаусс и параболу и разложение на два гаусса и параболу.

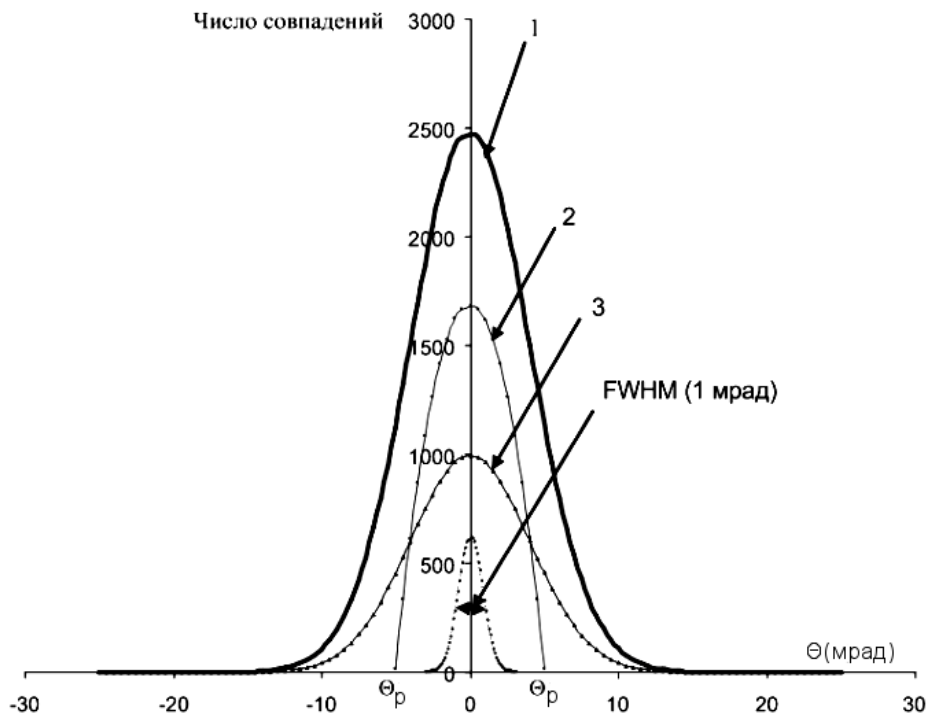


Рис. 1. Характерное угловое распределение аннигиляционных фотонов в образцах стали: (1) – кривая УРАФ, построенная по экспериментальным точкам; (2) – параболическая компонента спектра; (3) – гауссова компонента спектра. *FWHM* (full width half-maximum) – полная ширина гауссовой кривой на половине максимума.

Наилучший  $\chi^2$  наблюдался при разложении экспериментальных спектров УРАФ на три компоненты – два гаусса и параболу. Каждая составляющая спектра УРАФ несет информацию о своем канале аннигиляции позитронов. Определены параметры каждого канала аннигиляции позитронов для каждого образца стали. Результаты представлены в виде таблиц (3-5) и в графической форме (рис. 2-3).

Таблица 3.

## Параметры спектров УРАФ для образцов стали LP

Характеристика образцов	$\Gamma_{g1}$ , мрад	$I_{g1}$ , %	$E_{g1}$ , эВ	$\Gamma_{g2}$ , мрад.	$I_{g2}$ , %	$E_{g2}$ , эВ	$\theta_p$ отсечка (мрад.)	$I_p$ , %	$E_f$ , эВ	$N_p(\theta)$ $10^{22}\text{cm}^{-3}$
необлученные	13,20 $\pm 0,07$	82,94 $\pm 3,00$	12,00 $\pm 0,01$				5,74	17,06 $\pm 1,10$	8,41 $\pm 0,88$	11,2
необлученные	10,00 $\pm 0,38$	53,15 $\pm 14,00$	6,91 $\pm 0,05$	16,40 $\pm 0,60$	40,61 $\pm 15,00$	18,60 $\pm 0,08$	5,97	6,24 $\pm 2,70$	9,08 $\pm 5,10$	12,6
облучение (12,2x10 <sup>18</sup> )	13,60 $\pm 0,07$	79,01 $\pm 3,20$	12,80 $\pm 0,01$				5,65	20,99 $\pm 1,00$	8,132 $\pm 0,43$	10,6
облучение (12,2x10 <sup>18</sup> )	9,39 $\pm 0,39$	42,80 $\pm 11,00$	6,09 $\pm 0,05$	16,20 $\pm 0,47$	48,74 $\pm 14,00$	18,10 $\pm 0,07$	5,63	8,46 $\pm 2,90$	8,07 $\pm 3,30$	10,5
облучение (59,5x10 <sup>18</sup> )	13,30 $\pm 0,07$	78,97 $\pm 2,80$	12,20 $\pm 0,01$				5,60	21,03 $\pm 0,87$	8,00 $\pm 0,37$	10,4
облучение (59,5x10 <sup>18</sup> )	8,94 $\pm 0,37$	34,69 $\pm 9,10$	5,52 $\pm 0,05$	15,00 $\pm 0,33$	55,63 $\pm 14,00$	15,50 $\pm 0,05$	5,61	9,68 $\pm 2,70$	8,02 $\pm 2,40$	10,4
облучение (57,1x10 <sup>18</sup> ) + отжиг	13,20 $\pm 0,06$	79,73 $\pm 2,40$	12,10 $\pm 0,01$				5,37	20,27 $\pm 0,74$	7,36 $\pm 0,31$	9,2
облучение (57,1x10 <sup>18</sup> ) + отжиг	11,60 $\pm 0,40$	63,65 $\pm 17,00$	9,23 $\pm 0,06$	18,80 $\pm 1,70$	20,80 $\pm 14,00$	24,40 $\pm 0,23$	5,31	15,54 $\pm 3,60$	7,18 $\pm 0,82$	8,8

Здесь  $\Gamma_{gi}$  – полная ширина (FWHM) гауссовой компоненты на полувысоте,  $\theta_p$  – угол пересечения параболической компонентой оси  $\theta$ ,  $E_f$ ,  $N_p(\theta)$  – соответственно, энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости,  $E_{gi}$  – энергия аннигилирующих электрон-позитронных пар,  $I_{g1}$ ,  $I_{g2}$ ,  $I_p$  – интенсивности гауссовых и параболической составляющих спектра УРАФ, численно равные отношению площади под соответствующей компонентой спектра к суммарной площади спектра (рис. 1).

Таблица 4.

## Параметры спектров УРАФ для образцов стали MP

Характеристика образцов	$\Gamma_{g1}$ , мрад	$I_{g1}$ , %	$E_{g1}$ , эВ	$\Gamma_{g2}$ , мрад.	$I_{g2}$ , %	$E_{g2}$ , эВ	$\theta_p$ отсечка (мрад.)	$I_p$ , %	$E_f$ , эВ	$N_p(\theta)$ $10^{22}\text{cm}^{-3}$
необлученные	13,40 $\pm 0,09$	79,07 $\pm 3,60$	12,40 $\pm 0,01$				6,03	20,93 $\pm 1,20$	9,26 $\pm 0,59$	13
необлученные	9,97 $\pm 0,42$	48,06 $\pm 15,00$	6,86 $\pm 0,06$	16,10 $\pm 0,59$	42,53 $\pm 16,00$	17,90 $\pm 0,08$	6,09	9,40 $\pm 3,40$	9,45 $\pm 3,70$	13,3
облучение (12,4x10 <sup>18</sup> )	13,30 $\pm 0,09$	79,37 $\pm 3,50$	12,20 $\pm 0,01$				5,64	20,63 $\pm 1,10$	8,12 $\pm 0,49$	10,6
облучение (12,4x10 <sup>18</sup> )	9,14 $\pm 0,29$	46,23 $\pm 11,00$	5,76 $\pm 0,04$	15,90 $\pm 0,45$	47,55 $\pm 13,00$	17,50 $\pm 0,06$	5,81	6,21 $\pm 2,50$	8,62 $\pm 4,70$	11,6
облучение (63,9x10 <sup>18</sup> )	13,90 $\pm 0,08$	77,70 $\pm 2,90$	13,30 $\pm 0,01$				5,66	22,30 $\pm 0,93$	8,17 $\pm 0,37$	10,7
облучение (63,9x10 <sup>18</sup> )	9,16 $\pm 0,40$	35,85 $\pm 9,20$	5,79 $\pm 0,06$	15,90 $\pm 0,38$	53,77 $\pm 13,00$	17,40 $\pm 0,05$	5,68	10,39 $\pm 3,00$	8,23 $\pm 2,70$	10,8
облучение (59,4x10 <sup>18</sup> ) + отжиг	12,90 $\pm 0,08$	83,76 $\pm 3,30$	11,50 $\pm 0,01$				5,35	16,24 $\pm 0,92$	7,29 $\pm 0,52$	9,0
облучение (59,4x10 <sup>18</sup> ) + отжиг	9,79 $\pm 0,38$	57,04 $\pm 14,00$	6,61 $\pm 0,05$	16,70 $\pm 0,67$	38,09 $\pm 14,00$	19,30 $\pm 0,09$	5,14	4,87 $\pm 2,30$	6,73 $\pm 4,40$	8,0

Здесь  $\Gamma_{gi}$  – полная ширина (FWHM) гауссовой компоненты на полувысоте,  $\theta_p$  – угол пересечения параболической компонентой оси  $\theta$ ,  $E_f$ ,  $N_p(\theta)$  – соответственно, энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости,  $E_{gi}$  – энергия аннигилирующих электрон-позитронных пар,  $I_{g1}$ ,  $I_{g2}$ ,  $I_p$  – интенсивности гауссовых и параболической составляющих спектра УРАФ, численно равные отношению площади под соответствующей компонентой спектра к суммарной площади спектра (рис. 1).

Таблица 5.

**Параметры спектров УРАФ для образцов стали НР**

Характеристика образцов	$\Gamma_{g1}$ , мрад	$I_{g1}$ , %	$E_{g1}$ , эВ	$\Gamma_{g2}$ , мрад.	$I_{g2}$ , %	$E_{g2}$ , эВ	$\theta_p$ , мрад	$I_p$ , %	$E_f$ , эВ	$N_p(\theta)$ , $10^{22}\text{cm}^{-3}$
Необлученные	13.20± ±0.09	81.69± ±3.00	12.30± ±0.01				6.00	18.31± ±1.20	9.18± ±0.71	12.8
Необлученные	9.21± ±0.40	39.33± ±14.00	5.86± ±0.06	15.00± ±0.44	56.05± ±11.00	15.60± ±0.06	6.29	4.62± ±2.70	10.10± ±8.00	14.8
Облучение (12.2 x 10 <sup>18</sup> )	13.90± ±0.07	75.09± ±2.40	13.30± ±0.01				6.00	24.91± ±0.83	9.18± ±0.32	12.8
Облучение (12.2 x 10 <sup>18</sup> )	10.00± ±0.33	42.42± ±9.20	6.92± ±0.05	16.50± ±0.42	43.69± ±11.00	18.70± ±0.06	5.98	13.90± ±2.90	9.13± ±1.60	12.7
Облучение (59.5 x 10 <sup>18</sup> )	13.40± ±0.07	79.34± ±2.60	12.50± ±0.01				5.71	20.66± ±0.82	8.31± ±0.38	11.0
Облучение (59.5 x 10 <sup>18</sup> )	8.62± ±0.57	27.37± ±12.00	5.12± ±0.08	14.00± ±0.35	64.20± ±20.00	13.50± ±0.05	5.71	8.43± ±3.50	8.31± ±4.00	11.0
Облучение (57.1 x 10 <sup>18</sup> ) + отжиг	13.80± ±0.09	77.60± ±3.10	13.10± ±0.01				5.65	22.40± ±0.99	8.13± ±0.390	10.7
Облучение (57.1 x 10 <sup>18</sup> ) + + отжиг	9.24± ±0.35	43.22± ±10.00	5.89± ±0.05	16.20± ±0.41	49.24± ±13.00	18.00± ±0.06	5.55	7.54± ±2.70	7.85± ±3.70	10.1

Здесь  $\Gamma_{gi}$  – полная ширина (FWHM) гауссовой компоненты на полувысоте,  $\theta_p$  – угол пересечения параболической компонентой оси  $\theta$ ,  $E_f$ ,  $N_p(\theta)$  – соответственно, энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости,  $E_{gi}$  – энергия аннигилирующих электрон-позитронных пар,  $I_{g1}$ ,  $I_{g2}$ ,  $I_p$  – интенсивности гауссовых и параболической составляющих спектра УРАФ, численно равные отношению площади под соответствующей компонентой спектра к суммарной площади спектра (рис. 1).

В таблицах 3-5 представлены вероятности аннигиляции позитронов по каждому каналу, энергии Ферми, концентрации свободных электронов в зоне проводимости и энергии аннигилирующих позитрон-электронных пар. Для выяснения роли отжига на облученные образцы строились разностные кривые нормированных на единицу угловых распределений аннигиляционных фотонов в облученных и отожженных и исходных образцах. Для этих целей создана специальная математическая программа обработки экспериментальных спектров.

Кроме реакторных сталей были измерены спектры УРАФ в образцах чистого железа, хрома, ванадия и никеля и других переходных металлов – основных элементов исследуемых сталей (табл. 6).

Таблица 6.

## Электронные свойства чистых металлов

Металл	Электронная оболочка	Ориентация спинов электронов d-оболочки	Температура плавления (°C)	$N_p \times 10^{22}$ расчет	$N_p \times 10^{22}$ exp.	$E_f, \text{эВ}$ exp.	$N_A \times 10^{22}$	Z exp.	Z расчет	$I_p$ (%)
In	$4d^{10}5s^25p^1$		156	11,50	11,4	8,5	3,80	3	3	56
Sn	$4d^{10}5s^25p^2$		232	14,80	13,8	9,6	3,70	3,7	4	64
Bi	$5d^{10}6s^26p^3$		271	14,10	12,9	9,2	2,80	4,6	5	55
Pb	$5d^{10}6s^26p^2$		328	13,20	10,5	8,0	3,30	3,2	4	41
Zn	$3d^{10}4s^2$		420	13,10	11,9	8,7	6,57	1,8	2	45
Mg	$2s^22p^63s^2$		649	8,60	9,4	7,5	4,30	2,18	2	72
Al	$3s^23p^1$		660	18,10	18,8	11,6	6,0	3,13	3	69
Sc	$3d^14s^2$	↑	1541	8,0					2	
Ti	$3d^24s^2$	↑ ↑	1660	11,4	15,3	10,3	5,7	2,68	2	16,2
V	$3d^34s^2$	↑ ↑ ↑	1887	14,45	8,0	6,7	7,2	1,1	2	2
Cr	$3d^54s^1$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	1857	8,3	11,3	8,5	8,3	1,36	1	9,2
Mn	$3d^54s^2$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	1246	15,8					2	
Fe	$3d^64s^2$	↑ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑	1540	17,0	9,0	7,3	8,50	1,05	2	12,4
Co	$3d^74s^2$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑	1495	18,2					2	
Ni	$3d^84s^2$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑	1453	18,26	8,2	6,8	9,13	1,0	2	17,8
Cu	$3d^{10}4s^1$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓	1084	8,50	10,3	8,0	8,50	1,2	1	38
Y	$4d^15s^2$	↑	1522	6,06					2	
Zr	$4d^25s^2$	↑ ↑	1852	8,58					2	
Nb	$4d^45s^1$	↑ ↑ ↑ ↑	2468	5,56					1	
Mo	$4d^55s^1$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	2617	6,41	2,2	2,9	6,4	0,34	1	0,9
Tc	$4d^65s^1$ ( $4d^55s^2$ )	↑ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑	2172	7,07					1	
Rn	$4d^75s^1$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑	2061	7,39					1	
Rh	$4d^85s^1$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑	1966	7,26					1	
Pd	$4d^{10}$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓	1554							
Yb	$4f^{14}6s^2$		824	2,42					2	
Lu	$4f^{14}5d^16s^2$	↑	1663	3,39					2	
Hf	$4f^{14}5d^26s^2$	↑ ↑	2230	4,49					2	
Ta	$4f^{14}5d^36s^2$	↑ ↑ ↑	2741	5,54					2	
W	$4f^{14}5d^46s^2$	↑ ↑ ↑ ↑	3422	6,32					2	
Re	$4f^{14}5d^56s^2$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	3180	6,80					2	
Os	$4f^{14}5d^66s^2$	↑ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑	3054	7,15					2	
Ir	$4f^{14}5d^76s^2$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑	2174	7,10					2	
Pt	$4f^{14}5d^96s^1$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑	1772	6,62					1	
Au	$4f^{14}5d^{10}6s^1$	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓	1064	5,91					1	

Hg	4f <sup>4</sup> 5d <sup>10</sup> 6S <sup>2</sup>	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	-39	4,07					2	
----	--	-------------------	-----	------	--	--	--	--	---	--

Здесь  $N_p = 4,6 \cdot 10^{21} \cdot (E_f)^{3/2}$ ;  $E_f = 0,256 \cdot \theta_p^2$

$N_p$  - концентрация электронов в зоне проводимости;  $E_f$  - энергия Ферми;  $N_A$  - концентрация атомов металла,  $Z$  - число валентных электронов, приходящихся на один атом;  $I_p$  - доля параболической составляющей в спектре углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ);  $\theta_p$  - угол пересечения параболической составляющей спектра УРАФ с осью абсцисс.

При обработке экспериментальных спектров УРАФ гауссовы составляющие спектра аппроксимировались функцией

$$\varphi(\theta) = A \cdot \exp(-\theta^2/2\theta_g^2), \tag{9}$$

где  $\theta_g$  - дисперсия.

В таблицах 3-6 приведены значения  $\Gamma_g$  - ширины гауссовой кривой на полувысоте и  $\theta_p$  - угла пересечения параболой оси  $\theta$ .

$$\Gamma_g = 1,665109 \cdot \theta_g, \tag{10}$$

а также энергия

$$E_g = \frac{3}{2} \cdot \frac{mc^2}{2} \cdot \theta_g^2 = 0,0693246 (\Gamma_g)^2, \tag{11}$$

где  $[\Gamma_g] =$  мрад,  $[E_g] =$  эВ.

и энергия Ферми

$$E_f = \theta_p^2 \cdot (mc^2/2), \tag{12}$$

где  $[\theta_p] =$  мрад,  $[E_f] =$  эВ.

В свою очередь концентрация электронов в зоне проводимости связана с параметрами спектра УРАФ и с энергией Ферми выражениями

$$n_p(\theta) = (8\pi/3) \cdot (mc^2/h)^3 \cdot \theta_p^3 = 5,942 \cdot 10^{20} \theta_p^3, \tag{13}$$

$$n_p(\theta) = 4,6 \cdot 10^{21} \cdot (E_f)^{3/2}, \tag{14}$$

где энергия Ферми - в эВ, а  $n_p(\theta)$  - в см<sup>-3</sup>.

### 5. Обсуждение экспериментальных результатов.

Для исследуемых сплавов экспериментально определены такие важные характеристики металлов, как энергия Ферми, удельное число свободных электронов, приходящихся на один атом металла, и их концентрация в зоне проводимости, размер и концентрация радиационных дефектов.

Проведены измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) 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 каналах реактора Ровенской АЭС. Флюенс нейтронов варьировался от  $1 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> до  $6 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>. Химический состав и состояние исследованных образцов сталей представлен в таблицах 1-2.

Для выяснения влияния отжига на облученные образцы строились разностные кривые нормированных на единицу угловых распределений аннигиляционных фотонов в облученных и отожженных и исходных образцах.

Сопоставление разностных спектров УРАФ необлученных образцов с различным содержанием фосфора в пределах ошибок показало их идентичность (рис. 2).

Таким образом, фосфор не является позитрончувствительным элементом. В спектрах УРАФ образцов стали НР с высоким содержанием фосфора, облученных до больших флюенсов  $59 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup>, в области малых углов, а следовательно и малых энергий ( $< 1$ эВ)

аннигилирующих позитрон-электронных пар, наблюдается повышенная интенсивность (рис. 3).

Это может быть связано с аннигиляцией позитронов (квазипозитрония) в радиационных дефектах, индуцированных нейтронным облучением, либо порах на границе раздела трех кристаллитов. Существует большое количество экспериментальных данных, косвенно подтверждающих возможность образования позитрония. Так, в работе [21] в образцах Fe, Al, Ni, Pd, Cu наблюдалась компонента с малой интенсивностью и со временем жизни порядка наносекунды, в нашей работе [22] по исследованию пористого кремния с поверхностью, декорированной палладием, также наблюдался термализованный позитроний. При этом экспериментально определенный размер пор составлял 10-20 Å. Вообще, по нашему мнению, интенсивность данной компоненты должна зависеть от размера кристаллитов. Если размер кристаллитов много больше длины диффузии термализованных позитронов, т.е.  $\approx 100$  нм, то большая часть позитронов будет аннигилировать внутри кристаллитов и на границе раздела зерен и, следовательно, уменьшается вероятность захвата позитронов дефектами в тройном стыке кристаллитов. Из параметров ширины узкого пика (рис. 3) можно оценить размеры радиационных дефектов. Ширина на полувысоте этого пика равна примерно 3-4 мрад. Такому уширению соответствует полость радиусом  $\approx 4-5$  Å. Интенсивность этого пика увеличивается с увеличением флюенса и значительно уменьшается в отожженных образцах сталей. В образцах с низким содержанием фосфора, LP, также наблюдается узкая составляющая с аналогичной шириной. Отжиг на интенсивность этой составляющей практически не оказывает влияния.

В образцах стали со средним содержанием фосфора MP узкая составляющая слабо выражена и при низких флюенсах  $12,4 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup> практически незаметна.

В таблицах 3-5 представлены экспериментальные результаты при двух вариантах обработки экспериментальных спектров УРАФ: разложение на гаусс и параболу, разложение на два гаусса и параболу.

В этих таблицах приведены вероятности аннигиляции позитронов по каждому каналу, энергии Ферми, концентрации свободных электронов в зоне проводимости и энергии аннигилирующих позитрон-электронных пар.

Здесь  $\Gamma_{gi}$  – полная ширина (FWHM) гауссовой компоненты на полувысоте,  $\theta_p$  – угол пересечения параболической компонентой оси  $\theta$ ,  $E_f$  (эВ),  $N_p(\theta)$  – соответственно, энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости,  $E_{gi}$  – энергия аннигилирующих электрон-позитронных пар,  $I_{g1}, I_{g2}, I_p$  – интенсивности гауссовых и параболической составляющих спектра УРАФ, численно равные отношению площади под соответствующей компонентой спектра к суммарной площади спектра (рис. 1).

Во всех образцах стали облучение и отжиг сопровождаются перестройкой электронной подсистемы – уменьшается энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости (табл. 3-5), что свидетельствует о возникновении дополнительных химических связей.

Для интерпретации полученных результатов измерены с большой статистикой спектры УРАФ в образцах железа высокой чистоты и ряде чистых металлов (Cu, Cr, Mo, Ni), входящих в состав реакторных сталей. В таблице 7 в качестве примера представлены параметры спектров УРАФ для чистого железа и хрома.

Таблица 7.

**Параметры спектров УРАФ для образцов чистого железа и хрома**

	$\Gamma_{g1}$ , мрад	$I_{g1}$ , %	$E_{g1}$ , эВ	$\Gamma_{g2}$ , %	$I_{g2}$ , %	$E_{g2}$ , эВ	$\theta_p$ отсечка (мрад.)	$I_p$ , %	$E_f$ , эВ	$N_p(\theta) 10^{22}$ см <sup>-3</sup>
Fe	12,50 ± 0,06	87,62 ± 2,90	10,80 ± 0.01				5,34	12.38 ± 0,72	7.26 ± 0,58	9



Fe	10,10 ± 0,31	64,99 ± 14,00	7,05 ± 0,04	16,70 ± 0,72	32,29 ± 12,00	19,20 ± 0,10	5,01	2,71 ± 1,60	6,40 ± 5,60	7,45
Cr	11,90 ± 0,08	90,82 ± 4,30	9,75 ± 0,01				5,76	9,18 ± 1,00	8,45 ± 1,44	11,3
Cr	9,84 ± 0,45	54,60 ± 30,00	6,6 8 ± 0,06	14,60 ± 0,91	41,76 ± 30,00	14,60 ± 0,13	6,41	3,63 ± 2,60	10,48 ± 8,40	15,6

Таблица 8.

**Химический состав образцов стали LP и потенциалы ионизации элементов, входящих в состав стали**

Название образца	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
Содержание, %	~ 97	0,04	0,04	1,12	0,027	0,013	1,42	0,13	0,49	0,16	0,19
U <sub>1</sub> , эВ	7,9	11,3	8,15	7,43	10,56	10,35	6,76	7,63	7,13	7,72	6,74
U <sub>2</sub> , эВ	16,2	24,4	16,34	15,64	19,65	23,4	16,49	18,15	15,72	20,29	14,65

$E_{g1}$  – необлученные образцы сталей ~ 5.86-6.91 эВ (табл. 3-5)

$E_{g2}$  – необлученные образцы сталей ~ 15.6-18.6 эВ (табл. 3-5)

Методом позитронной аннигиляционной спектроскопии проведены экспериментальные исследования электронных свойств переходных металлов, применяемых в атомной промышленности. Для переходных металлов наблюдается четкая корреляция температуры плавления с числом неспаренных d-электронов (помечены желтым). Чем больше этих (неспаренных) электронов тем выше температура плавления. Корреляции с общим числом d-электронов нет. Так у меди (3d - электроны), палладия (4d - электроны), золота (5d - электроны) оболочки с d-электронами заполнены полностью, а температуры самые низкие в своих рядах. Обращают на себя внимание технеций, вольфрам и рений. У технеция в различных справочниках приводится разный конфигурации внешней электронной оболочки  $4d^65s^1$  ( $4d^55s^2$ ). На наш взгляд в этом случае более правильной будет конфигурация с шестью d-электронами. Если такого рода рассуждения правильны, то у вольфрама оболочка должна быть  $4f^{14}5d^56s^1$ , а у рения  $4f^{14}5d^66s^1$ . Нам кажется, что неспаренные d-электроны характеризуют склонность металлов к образованию ковалентных связей, которые более сильные чем металлические связи. Этот процесс образования таких связей. Обработка экспериментальных результатов и сопоставление их с литературными данными позволила выявить вакансионные дефекты, в том числе и вызванные нейтронным облучением, и определить их размеры.

Сопоставление результатов обработки спектров УРАФ для исследованных образцов стали со спектрами УРАФ для чистых металлов показывает, что позитроны преимущественно аннигилируют на электронах железа (хрома) – сопоставимы значения энергии  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$  для чистого железа (хрома) с аналогичными параметрами для сталей.

Экспериментальные величины концентрации электронов зоны проводимости сопоставлены с расчетными значениями. Показано, что выбранная для расчета модель свободного электронного газа, хорошо зарекомендовавшая себя в таких металлах как магний, алюминий, медь, цинк, индий, олово, свинец, висмут для металлов переходной группы с 3d электронной оболочкой малоприспособна. Из экспериментальных данных следует, что все исследованные металлы, кроме хрома (железо, никель, ванадий), отдадут в зону проводимости всего лишь по одному электрону, в то время как их внешняя электронная оболочка содержит по два s-электрона (их конфигурация  $3d^n4s^2$ ). Концентрации электронов

в зоне проводимости и энергии Ферми для этих металлов соответственно составляют  $7,4 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$  ( $E_F = 6,45 \text{ эВ}$ ) для железа,  $15,6 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$  ( $E_F = 10,48 \text{ эВ}$ ) для хрома,  $9,1 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$  ( $E_F = 7,29 \text{ эВ}$ ) для никеля и  $8,0 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$  ( $E_F = 6,7 \text{ эВ}$ ) для ванадия. Вероятно, в этих металлах часть валентных электронов идет на образование химических связей, чем и объясняется присущая им высокая температура плавления (а также высокие механические свойства). Для хрома ( $3d^5 4s^1$ ) экспериментально измеренная концентрация электронов в зоне проводимости значительно больше (в  $1,6 \div 2$  раза) расчетного значения, выполненного в предположении, что хром может отдавать в зону проводимости только один электрон. Этот вопрос требует дальнейших исследований и может быть связан с тем, что электронная конфигурация хрома, входящего в состав кристалла, отличается от электронной конфигурации изолированного атома хрома, например ( $3d^4 4s^2$ ).

Проведенные сопоставления измеренных и расчетных концентраций электронов в зоне проводимости дают основания полагать, что позитронная спектроскопия может быть с успехом применена и для исследования внутренних связей в металлах.

### 6. Определение размеров 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 [23-25]: позитрон находится в сферической яме радиусом  $R_0$  с бесконечно высоким потенциальным барьером. При этом скорость  $\lambda$  его аннигиляции в приграничном слое  $\Delta R$  зависит от радиуса свободного объема поры  $R$

$$\lambda = \lambda_0 \left[ 1 - \frac{R}{R_0} + (2\pi)^{-1} \sin \left( \frac{2\pi R}{R_0} \right) \right], \quad (15)$$

где  $[\lambda] = [\text{нс}^{-1}]$ ,  $R = R_0 - \Delta R$ , а  $\lambda_0$  - 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  $\Delta R = R_0 - R = 1,66 \text{ \AA}$ . Вообще говоря, значение величины  $\Delta R$  зависит от природы вещества. Поэтому уравнение (15) возможно применять лишь для оценок размеров радиусов пор. Размер пор можно также найти, используя только данные УРАФ.

В рамках рассматриваемой модели энергия частицы  $E$  в основном состоянии в потенциальной яме, моделирующей пору, дается выражением

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mR^2}, \quad (16)$$

где  $m$  - масса частицы.

В случае позитрона его энергия будет связана с размером поры соотношением

$$E = \frac{37,7}{R_0^2}, \quad (17)$$

где 37,7 - переводной множитель,  $R$  - в ангстремах.

Из параметров аннигиляционных спектров УРАФ можно определить энергию позитрона, аннигилирующего в поре, и тем самым оценить размер поры. Поскольку позитрон перед аннигиляцией успевает практически термализоваться, то измеряемая энергия аннигилирующей позитрон-электронной пары в основном будет определяться энергией электрона.

Рассмотрение кинетической схемы гибели термализованных позитронов в среде позволяет по параметрам аннигиляционных спектров определять средние величины концентрации дефектов.

Экспериментальный спектр углового распределения фотонов представляет собой суперпозицию отдельных кривых, характеризующих аннигиляцию позитронов в бездефектной области и в дефектах разных типов [13-15].

Для определения средней величины концентрации дефектов и их размеров по основным характеристикам аннигиляционных спектров в случае, когда в образце имеется два типа дефектов ( $N = 2$ ), можно написать следующие уравнения для скорости захвата термализованных позитронов в вакансию и в кластер [10, 13-15]:

$$k_{d1}N_{d1} = \frac{I_1}{1 - I_1 - I_2} \lambda_0, \quad k_{d2}N_{d2} = \frac{I_2}{1 - I_1 - I_2} \lambda_0,$$

$$I_1 = \frac{k_{d1}N_{d1}}{\lambda_0 + k_{d1}N_{d1} + k_{d2}N_{d2}}, \quad I_2 = \frac{k_{d2}N_{d2}}{\lambda_0 + k_{d1}N_{d1} + k_{d2}N_{d2}}, \quad (18)$$

где  $I_i$  - вероятность аннигиляции позитронов в областях, соответствующих дефектам  $i$ -го типа,  $\lambda_0$  - скорость аннигиляции позитронов в бездефектной области,  $k_d$  - константа захвата позитронов дефектами,  $N_d$  - концентрация дефектов.

Среднее значение константы захвата позитронов дефектами можно записать в виде

$$k_d = \sigma \cdot \nu = 4 \cdot \pi \cdot D_+ \cdot R_d \quad (19)$$

Здесь  $D_+$  - коэффициент диффузии позитронов,  $R_d$  - средний радиус дефектов (пор),  $\sigma$  - сечение захвата дефектами позитрона,  $\nu$  - скорость термализованного позитрона.

Если имеются образцы с разной концентрацией дефектов одного типа, то можно найти разностный спектр

$$\Delta I = I_1'' - I_1' = \lambda_0 k_d (N_{d1}'' - N_{d1}') / (\lambda_0 + k_d N_{d1}'' + k_d N_{d2}'') (\lambda_0 + k_d N_{d1}' + k_d N_{d2}') \quad (20)$$

В частном случае дефектов одного типа и изначально бездефектного образца  $N_d'' \gg N_d'$

$$\Delta I = k_d N_d'' / (\lambda_0 + k_d N_d'') \quad (21)$$

Здесь  $\Delta I$  - экспериментально измеряемая величина методом УРАФ,  $\lambda_0$  - скорость аннигиляции позитронов в объеме материала, измеряется методом ВРАФ. Используя приведенные выражения, можно оценивать радиусы свободных объемов в пористых системах, дефектных материалах по параметрам экспериментально измеренных спектров УРАФ и ВРАФ.

Рассмотрим, для примера, сталь с низким содержанием фосфора (LP). Результаты математической обработки экспериментальных спектров УРАФ показывают, что во всех образцах сталей LP имеются высокоинтенсивные гауссовы компоненты с интенсивностями  $I_{g1} \sim (34 - 63)\%$ ,  $I_{g2} \sim (20 - 55)\%$  и энергиями  $E_{g1} \sim (6 - 9)$  эВ и  $E_{g2} \sim (15 - 24)$  эВ и параболическая компонента с интенсивностью  $I_p \sim (4 - 15)\%$  и энергией Ферми  $E_f \sim (7 - 9)$  эВ. По нашему мнению, высокоинтенсивные гауссовы компоненты обусловлены аннигиляцией позитронов, захваченных вакансионными дефектами, а параболическая компонента обусловлена аннигиляцией позитронов на делокализованных электронах проводимости (Ферми-газе объектов). Обращает на себя внимание низкая интенсивность параболической компоненты (табл. 3-5). Интенсивность этой компоненты для всех исследованных образцов сталей не превышает 15% и уменьшается с ростом флюенса нейтронов. Этот эффект, по-видимому, связан с тем обстоятельством, что большая часть позитронов захватывается и аннигилирует в дефектах. Так в работах [18, 19], выполненных методом ВРАФ, показано, что при флюенсе нейтронов  $3,3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-2</sup> в аналогичных сталях практически все позитроны захватываются дефектами. Увеличение концентрации позитрончувствительных дефектов с ростом флюенса электронов в сплавах Fe-Ni, Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Si наблюдалось также по изменению S-параметра (доплеровского уширения аннигиляционной линии) в работе [26]. В работе [27] показано, что S-параметр характеризует концентрацию вакансионных кластеров малых размеров.

Экспериментально определенная концентрация электронов в зоне проводимости для всех исследованных образцов сплавов уменьшается с ростом флюенса нейтронов (см. табл. 3-5). Даже после отжига при 475 °С концентрация делокализованных электронов не возвращается к исходному состоянию. Подобные результаты для чистого железа наблюдались в работе [28], где концентрация электронов проводимости уменьшалась с дозой облучения. По нашему мнению, такое уменьшение концентрации электронов при облучении сплавов обусловлено увеличением межкристаллитных ковалентных связей на границе зерен и формированием упорядоченных структур из примесных атомов. Наблюдается корреляция между характером изменения концентрации делокализованных электронов (рис. 4) и изменениями температуры вязко-хрупкого разрушения материала образцов [6, 7].

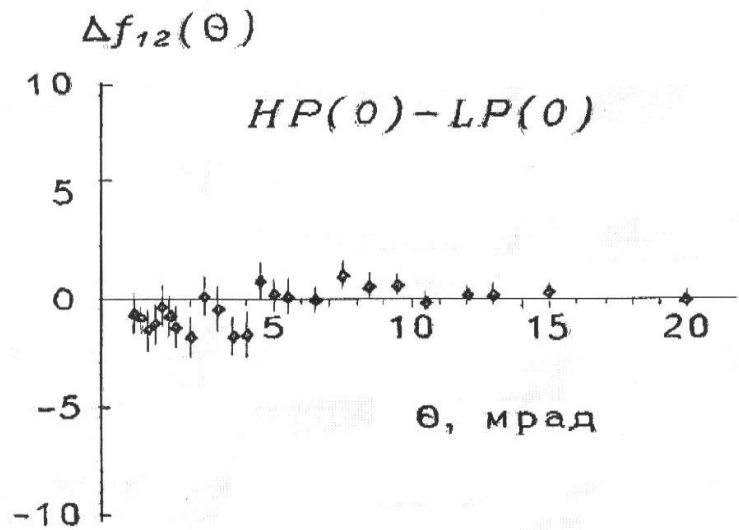


Рис. 2. Разностный спектр УРАФ необлученных образцов с высоким (НР) и низким (ЛР) содержанием фосфора

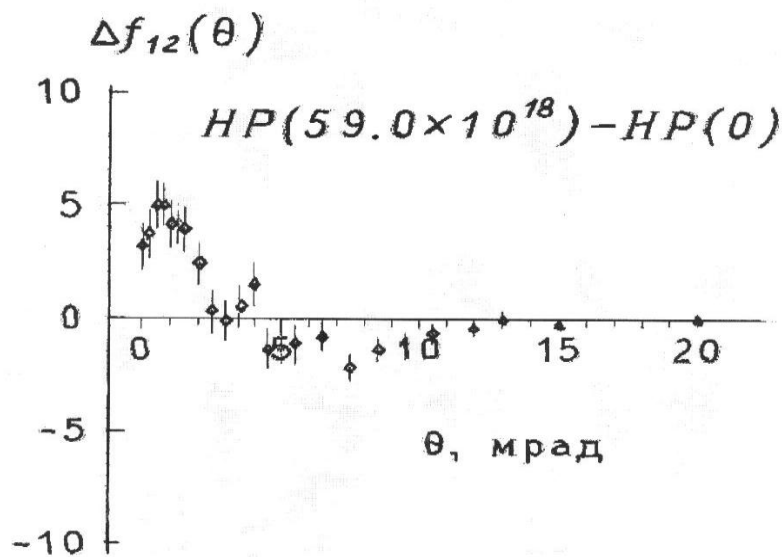


Рис. 3. Разностный спектр УРАФ облученных и необлученных образцов с высоким (НР) содержанием фосфора

$$\frac{N_p^0 - N_p}{N_p^0} \cdot 100\%$$

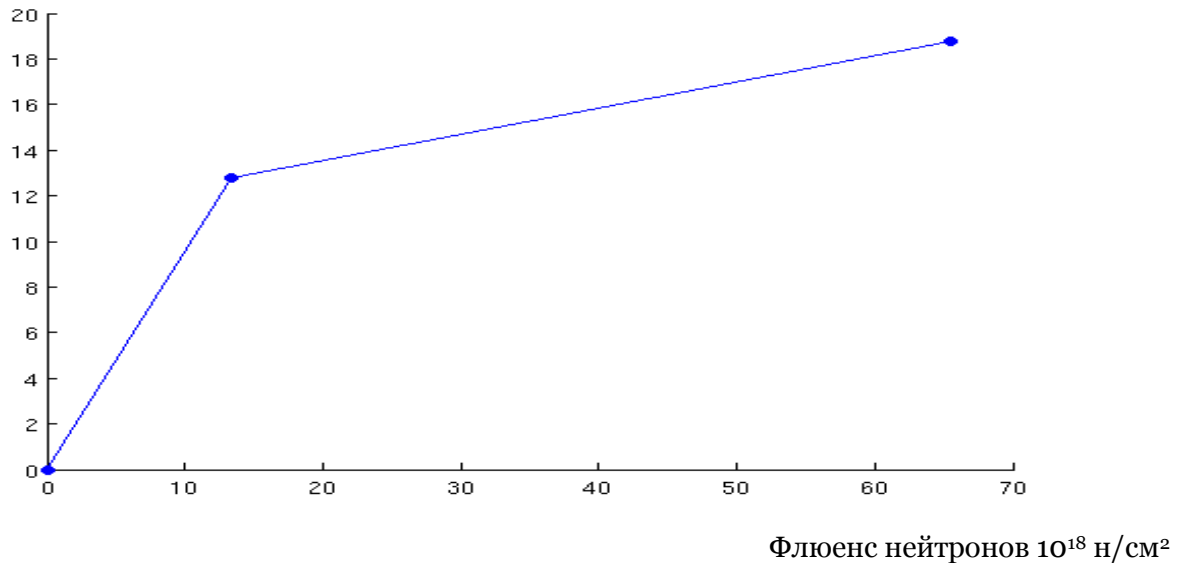


Рис. 4. Образцы стали (МР) со средним содержанием фосфора

Здесь  $N_p^0$  и  $N_p$  - соответственно концентрация электронов в необлученных и облученных образцах сталей.

Таким образом, появляется возможность исследования методами ПАС внутренних связей в металлах.

На рис. 4 представлено относительное изменение концентрации электронов в зоне проводимости в зависимости от флюенса нейтронов для стали МР со средним содержанием фосфора. Для сталей с низким (LP) и высоким (НР) содержанием фосфора характер зависимости аналогичный (см. табл. 3-5).

Как уже говорилось выше, по параметрам аннигиляционных спектров УРАФ можно определить энергию позитрона, аннигилирующего в поре, и тем самым оценить размер поры.

Из данных табл. 6 и 7 видно, что экспериментально измеренные значения  $E_{g1}, E_{g2}$  образцов стали, железа, хрома и никеля сопоставимы со значениями энергий связи  $E_1 = U_1$  и  $E_2 = U_2$  внешних валентных электронов атомов элементов, входящих в состав стали (табл. 8).

Назовем эти центры аннигиляции позитронов с параметрами  $I_{g1}, E_{g1}$  центрами первого рода. Отличие величины  $E_{g1}$  от значения  $E_1 = U_1$  атомов Fe и Cr, по-видимому, обусловлено уменьшением  $E_1 = U_1$  в кристалле (сплаве) по сравнению со значением  $E_1 = U_1$  электрона свободных атомов Fe и других атомов за счет образования химических связей с другими элементами сплава. В свою очередь, значения  $E_{g2}$  для образцов стали, Fe и Cr по своим значениям ближе всего к значениям энергий связи  $E_2 = U_2$  внешних электронов положительно заряженных ионов атомов Fe и других элементов, входящих в состав стали (табл. 8). Назовем эти центры аннигиляции позитронов с параметрами  $I_{g2}, E_{g2}$  центрами второго рода. Из данных табл. 3-5 следует, что эти центры аннигиляции первого и второго рода при облучении и отжиге претерпевают значительные трансформации.

Будем считать центрами аннигиляции первого рода поры в тройном стыке кристаллитов и дислокации (либо комплексы вакансий), декорированные атомами железа и примесей. Аннигиляция позитронов из этих состояний дает компоненту  $I_{g1}(E_{g1})$ . Центрами захвата второго рода могут служить вакансии на границе раздела кристаллитов и радиационно-индуцированные вакансии  $Fe$  и их комплексы. Из экспериментальных данных (табл. 3-5) следует, что при отжиге происходит преимущественно трансформация радиационно-индуцированной части центров захвата второго рода в центры захвата с более глубокими позитронными уровнями. В такой модели с ростом флюенса нейтронов увеличивается концентрация радиационно-индуцированных вакансионных дефектов и, как следствие, увеличивается захват позитронов этими дефектами и, соответственно, уменьшается доля позитронов, аннигилирующих со свободными электронами и в дефектах первого рода (см. табл. 3-5).

При этом аннигиляция позитронов протекает в основном на внешних (валентных) электронах атома железа и заряженного иона  $Fe^+$ , так как  $E_{g1} \rightarrow U_1, E_{g2} \rightarrow U_2$ .

Таким образом, по экспериментально определенным энергиям  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$  (см. табл. 3-5) можно также найти состав и радиусы нанообъектов (пор, вакансий, зерен и включений второй фазы – нанокластеров и возможно дислокаций, декорированных различными примесями и т.д.), используя только данные УРАФ [29-31]. Для этого приведем выражение, связывающее энергию аннигилирующей электрон-позитронной пары с полной шириной на полувысоте соответствующей гауссовой компоненты спектра УРАФ

$$E_{gi} = 6,9 \cdot 10^{-2} \cdot \Gamma_{gi}^2 \quad (22)$$

Здесь  $E$  - энергия в эВ, а  $\Gamma_g$  - полная ширина кривой УРАФ на полувысоте в мрад. Так для образцов сплава LP (табл. 3) рассчитанные по этой формуле значения средних энергий аннигилирующих электрон-позитронных пар оказались равными  $E_{g1} = 6,91, 6,09, 5,52, 9,23$  эВ и  $E_{g2} = 18,6, 18,1, 15,5, 24,4$  эВ. Табличные значения энергий электронов (табл. 8) внешних оболочек атомов железа и иона железа составляют величины 7,89 и 16,19 эВ, а для хрома эти же величины соответственно равны 6,76 и 16,49 эВ. Как видим, значения величин энергий  $E_{gi}$ ,  $E(Fe)$  и  $E(Fe^+)$  близки друг другу. Таким образом, можно полагать, что позитроны аннигилируют в основном на внешних валентных электронах атомов железа (хрома) «стенки» вакансий и комплексов вакансий. В этом случае, разность величин  $E - E(Fe)$  обусловлена вкладом энергии позитрона, находящегося в вакансиях, в энергию аннигилирующих электрон-позитронных пар. Для оценки размера вакансий можно использовать выражения вида

$$R_{sp} = \left( \frac{37,7}{E - E(Fe)} \right)^{1/2}, \quad R_{sp} = \left( \frac{37,7}{E - E(Fe^+)} \right)^{1/2} \quad (23)$$

Здесь величины имеют размерности  $R_{sp}$  в Å,  $E$  в эВ. Определим размеры центров захвата второго рода, используя параметры ионов железа  $E = E_{g2} - E(Fe^+)$ . Для  $E_{g2} = 18,6$  эВ и  $E(Fe^+) = 16,19$  эВ получим размер пор 4 Å. Значение  $E(Fe^+)$  для всех исследованных образцов сталей (LP, MP, NP) меняется от 15,5 до 24,4 эВ, а размер дефектов, соответственно, от 5 до 2 Å.

Из выражения (21) можно получить связь между скоростью захвата позитронов  $K_d N_d$  центрами второго рода и интенсивностью компоненты  $I_{g2}$

$$k_d N_d \cong \lambda_0 \Delta I \cong \Delta I / \tau_0. \quad (24)$$

Здесь  $\Delta I_g$  - разность между интенсивностями гауссовых компонент  $I_{gi}$  (Irradiated), облученных образцов стали, и  $I_{gi}$  (Not irradiated) исходных необлученных образцов стали в

спектрах УРАФ,  $K_d$  - константа захвата позитронов дефектами, а  $N_d$  - концентрация дефектов.

Оценим значение  $k_d N_d$  для значения  $\Delta I_{g2} = 0,08$  (см. табл. 3) и значения  $\tau_2 = (1,10 \pm 0,05) \cdot 10^{-10}$  с [18,19] для данной стали. С этим значением  $\Delta I_g$  получаем  $k_d N_d \cong 0,08 / 1,10 \cdot 10^{-10} = 7,3 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>.

Величина скорости захвата  $k_d N_d$  в свою очередь может быть определена на основе известного выражения  $k_d N_d = \sigma \cdot \nu \cdot N_d$ . Здесь  $\sigma$  - сечение захвата дефектами позитрона;  $\nu$  - 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  $\nu = (8k_0 T / \pi m_+^*)^{1/2} \approx 1,05 \cdot 10^7$  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  $\sigma \approx \pi \cdot R_d^2 = 3,14 \cdot 0,16 \cdot 10^{-14} \approx 5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup> (приняли, что  $R_d \approx 0,4$  нм). Используя определенные выше значения  $R_d \approx 0,4 \cdot 10^{-7}$  см,  $k_d$  и  $\nu$ , можно оценить среднее значение концентрации центров захвата позитронов в облученных образцах стали  $N_d = \lambda_0 \Delta I / \sigma \cdot \nu = 7,3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 10^{-15} \cdot 10^7 \approx 1,4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При использовании данных [1819]  $\Delta I_2 = 0,06$   $\tau_0 = 1,1 \cdot 10^{-10}$  с и радиусе вакансий  $R_d \approx 0,25$  нм (радиус вакансий из данных ВРАФ) получим значение  $k_d N_d \cong 0,06 / 1,10 \cdot 10^{-10} = 5,5 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup> и концентрацию дефектов  $N_d = k_d N_d / \sigma \cdot \nu = 5,5 \cdot 10^8 / 2 \cdot 10^{-15} \cdot 10^7 \approx 2,7 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

## 7. Заключение.

В табл. 6 приведены ряд данных по электронным свойствам чистых металлов. Для переходных металлов наблюдается четкая корреляция температуры плавления с числом неспаренных d-электронов (помечены желтым). Чем больше этих (неспаренных) электронов тем выше температура плавления. Корреляции с общим числом d-электронов нет. Так у меди (3d - электроны), палладия (4d - электроны), золота (5d - электроны) оболочки с d-электронами заполнены полностью, а температуры самые низкие в своих рядах. Обращают на себя внимание технеций, вольфрам и рений. У технеция в разных справочниках приводится разная конфигурация внешней электронной оболочки  $4d^6 5s^1$  ( $4d^5 5s^2$ ). На наш взгляд в этом случае более правильной будет конфигурация с шестью d-электронами. Если такого рода рассуждения правильны, то у вольфрама оболочка должна быть  $4f^{14} 5d^6 6s^1$ , а у рения  $4f^{14} 5d^6 6s^1$ . Нам кажется, что неспаренные d-электроны характеризуют склонность металлов к образованию ковалентных связей, которые более сильные чем металлические связи. Этот процесс образования таких связей имеет вероятнее всего активационный характер. Эти свойства и определяют увеличение температуры плавления с ростом числа неспаренных d-электронов. В литературе ссылок на подобное объяснение мы не нашли. Эти эффекты также могут объяснять наличие возможных модифицированных вязко-хрупких переходов типа Иоффе-Давиденкова и др. [3, 4] в конструкционных материалах (металлах и сплавах) в условиях облучения их нейтронами при повышенных температурах [3]. Температура хрупко-вязкого перехода Иоффе чувствительна к содержанию примесей (особенно примесей внедрения в о. ц. к. металлах) и структуре материала. (!) Особо важным является хрупкое разрушение в тех случаях, когда оно происходит при достаточно высоких температурах (комнатной и выше). Действительно, облучение металлов и сплавов нейтронами при температурах ниже  $0,3 T_m$ , где  $T_m$  - температура плавления, повышает их прочность в результате образования радиационных нарушений и дефектов, являющихся препятствием для движения

дислокаций, но при этом радиация существенно, а при больших дозах катастрофически ухудшает их деформационные и пластические свойства. Это обстоятельство (радиационная хрупкость) ограничивает эксплуатационный ресурс многих сплавов, используемых в ядерной энергетике: с ростом дозы облучения чувствительность сплавов к ударным нагрузкам возрастает.

В наших экспериментах с реакторными сталями было обнаружено, что концентрация электронов в зоне проводимости уменьшается с увеличением флюенса нейтронов. При больших флюенсах каждый атом испытывает несколько смещений и, вероятно, новая конфигурация сопровождается образованием новых ковалентных связей, что возможно и приводит к увеличению температуры вязко-хрупкого перехода. В классическом хрупко-вязком переходе Иоффе такого типа явление наблюдается при понижении температуры [32-34].

Проведены исследования корпусных сталей, используемых в действующих реакторах ВВЭР-440. В исследованных образцах сталей выявлены вакансионные дефекты, в том числе вызванные нейтронным облучением, и определены их размеры. 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. В связи с этим нами были проанализированы ряд данных по электронным свойствам чистых металлов [1-6]. Для переходных металлов наблюдается четкая корреляция температуры плавления с числом неспаренных  $d$ -электронов. Чем больше этих (неспаренных) электронов тем выше температура плавления. Корреляции с общим числом  $d$ -электронов нет. Так у меди ( $3d$  - электроны), палладия ( $4d$  - электроны), золота ( $5d$  - электроны) оболочки с  $d$ -электронами заполнены полностью, а температуры самые низкие в своих рядах. Обращают на себя внимание технеций, вольфрам и рений. У технеция в разных справочниках приводится разная конфигурация внешней электронной оболочки  $4d^6 5s^1$  ( $4d^5 5s^2$ ). На наш взгляд в этом случае более правильной будет конфигурация с шестью  $d$ -электронами. Если такого рода рассуждения правильны, то у вольфрама оболочка должна быть  $4f^{14} 5d^6 6s^1$ , а у рения  $4f^{14} 5d^6 6s^1$ . Мы поэтому предположили, что неспаренные  $d$ -электроны характеризуют склонность металлов к образованию ковалентных связей, которые более сильные чем металлические связи. Этот процесс образования таких связей имеет вероятнее всего активационный характер. Эти свойства и определяют увеличение температуры плавления с ростом числа неспаренных  $d$ -электронов. В литературе ссылок на подобное объяснение мы не нашли. Эти эффекты также могут объяснять наличие возможных модифицированных вязко-хрупких переходов типа Иоффе-Давиденкова и др. в конструкционных материалах (металлах и сплавах) в условиях облучения их нейтронами при повышенных температурах [3]. Температура хрупко-вязкого перехода Иоффе чувствительна к содержанию примесей (особенно примесей внедрения в о. ц. к. металлах) и структуре материала. (!) Особо важным является хрупкое разрушение в тех случаях, когда оно происходит при достаточно высоких температурах (комнатной и выше). Действительно, облучение металлов и сплавов нейтронами при температурах ниже  $0,3 T_m$ , где  $T_m$  - температура плавления, повышает их прочность в результате образования радиационных нарушений и дефектов, являющихся препятствием для движения дислокаций, но при этом радиация существенно, а при больших дозах катастрофически ухудшает их деформационные и пластические свойства. Это обстоятельство (радиационная хрупкость) ограничивает эксплуатационный ресурс многих сплавов, используемых в ядерной энергетике: с ростом дозы облучения чувствительность сплавов к ударным нагрузкам возрастает.

В наших экспериментах с реакторными сталями было обнаружено, что концентрация электронов в зоне проводимости уменьшается с увеличением флюенса нейтронов. При больших флюенсах каждый атом испытывает несколько смещений и, вероятно, новая конфигурация сопровождается образованием новых ковалентных связей, что возможно и



приводит к увеличению температуры вязко-хрупкого перехода. В классическом хрупко-вязком переходе Иоффе такого типа явление наблюдается при понижении температуры.

Мы ввели величину

$$\alpha_k = [n(\text{необл}) - n(\text{обл})] / n(\text{необл}), \quad (25)$$

характеризующую собой степень ковалентности химической связи. Здесь  $n(\text{обл})$  – концентрация электронов в зоне проводимости облученного металла, а  $n(\text{необл})$  – концентрация электронов в зоне проводимости необлученного металла. На основании экспериментальных данных работ [4-6] значение  $[n(\text{необл})] = 11,9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , а  $[n(\text{обл})] = 9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . Отсюда степень ковалентности химической связи для образцов стали LP составляет величину  $\alpha_k \sim 0,3$ . Примерно такие же значения  $\alpha_k$  наблюдаются и для образцов сталей MP и LP. Анализ данных  $\alpha_k$  х

Установлено, что позитронная спектроскопия может с успехом применяться для исследования внутренних связей в металлах и, в частности, для исследования границ раздела кристаллитов.

Полученные результаты могут быть использованы для понимания эксплуатационных свойств материалов, используемых для создания космических аппаратов и приборов для работы в условиях космического пространства.

### 8. Примечания:

1. V. Slugen, D. Segers, P. M. A. de Bakker, E. de Graveb, V. Magula, T. van Hoecke and B. van Waeyenberge, *Journal of Nuclear Materials* **274**, Issue 3, 273 (1999)
2. V. Slugen, G. Kogel, P. Sperr, W. Triftshauser, *Journal of Nuclear Materials* **302**, 89 (2002)
3. L. Debarberis, A. Kryukov, D. Erak, Yu. Kevorkyan and D. Zhurko, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **81**, Issue 8, 695 (2004)
4. Y. Nishiyama, K. Onizawa, M. Suzuki, J. W. Anderegg, Y. Nagai, T. Toyama, M. Hasegawa and J. Kameda, *Acta Materialia* **56**, Issue 16, 4510 (2008)
5. S. Rogozkin et al., in *Proceedings of PVP2009, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic*.
6. A. Chernobaeva, J. Shtrombah, A. Krjukov, D. Erak, P. Platonov, J. Nikolaev, E. Krasikov, L. Debarberis, Yu. Kohopaa, M. Valo, S. Vodenicharov and T. Kamenove, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **84**, Issue 3, 151 (2007)
7. O. Zabusov, E. Krasikov, M. Kozodaev, A. Suvorov, P. Pareige, B. Radiguet, *Physica of radiation damage and radiation material science* N3 (83), 66 (2003)
8. A. Zeman et al., *Journal of Nuclear Materials* **360**, Issue 3, 272 (2007)
9. V. Krsjak et al., *Applied Surface Science* **255**, Issue 1, 153 (2008)
10. M. Lambrecht, A. Almazouzi, *Journal of Nuclear Materials* **385**, Issue 2, 334 (2009)
11. A. P. Druzhkov, D. A. Perminov, in *Nuclear Materials Research Developments*. Ed. by J. E. Keister ISBN 1-60021-432-0, (Nova Science Publishers, Inc. 2007), Chapter 5
12. M. J. Puska and R. M. Nieminen, *Reviews of Modern Physics*, **66**, № 3, 841 (1994)
13. V. I. Grafutin and E. P. Prokopev, *Physics - Uspekhi* **45**, (1), 59 (2002)
14. V. I. Grafutin et al., *Phys. Solid State* **40**, 549 (1998)
15. V. I. Grafutin et al., *Phys. Solid State* **41**, 843 (1999)
16. M. J. Puska, R. M. Nieminen, *J. Phys. F: Metal Phys.* **13**, №2, 333 (1983)
17. V. Slugen, Preprint EUR 22468 EN (European Commission, Joint Research Centre, 2006)
18. J. Kocik, E. Keilova, J. Cizek, I. Prochazka, *Journal of Nuclear Materials* **303**, 52 (2002)
19. J. Cizek, F. Becvar, I. Prochazka, *Nuclear Instruments and Methods in Physics research A* **450**, 325 (2000)
20. А. И. Гусев, *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии* (Физматлит, Москва, 2009), с. 415
21. Н. Е. Schaefer, *Phys. Stat. Sol. (a)* **102**, № 1, 47 (1987)
22. О. М. Бритков, С. А. Гаврилов, В. И. Графутин, В. В. Калугин, О. В. Илюхина, Г. Г. Мясичева, Е. П. Прокопьев, С. П. Тимошенко, Ю. В. Фунтиков, *Химия высоких энергий* **41**, №1, 1 (2007)

23. S. J. Tao J. Chem. Phys. **56**, 5499 (1972)
24. M. Eldrup, D. Lightbody, J. N. Sherwood, Chem. Phys. **63**, 51 (1981)
25. Q. Deng, Y. Jean, Macromolecules **26**, 30 (1993)
26. A. P. Druzhkov, D. A. Perminov, A. E. Davletshin, Journal of Nuclear Materials, **384**, 56 (2009)
27. W. Brandt, Appl. Phys. **5**, 1 (1974)
28. M. Eldrup and B. N. Singh, Preprint R-1241(EN), ISBN 87-550-2824-1, (Risø report, 2001).
29. В. И. Графутин, О. В. Илюхина, Г. Г. Мясичева, Е. П. Прокопьев, С. П. Тимошенко, Ю. В. Фунтиков, Украинский физический журнал **54**, № 5, 443 (2009)
30. Y. A. Chaplygin, S. A. Gavrilov, V. I. Grafutin, E. Svetlov-Prokopiev and S. P. Timoshenkov, Proc. IMechE. Part N: J. Nanoengineering and Nanosystems **221**, 125 (2009)
31. Yu.A. Chaplygin, V.I. Grafutin, E.P. Svetlov-Prokopiev, S.P. Timoshenkov, Positronics and nanotechnologies: possibilities of studying nano-objects in technically important materials and nanomaterials. in book: advances in na [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?cpath=23\\_96&products\\_id=10207&oscsid=9c7f4bdf96ee0b265245e976a7c8d2fc](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?cpath=23_96&products_id=10207&oscsid=9c7f4bdf96ee0b265245e976a7c8d2fc), <http://www.svarka-lib.com/node/29/print/139.html> Notechnology. Volume 1, 2010. (Editors: E. J. Chen and N. Peng. Nova science publishers, New York, 2010). P. 191-208.
32. В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев Определение методом УРАФ электронных свойств переходных металлов // Современные материалы и технологии. 2012. №3. URL: [www.es.rae.ru/mmt/145-470](http://www.es.rae.ru/mmt/145-470) (дата обращения: 26.03.2012).
33. Малыгин Г.А. Анализ параметров хрупко-вязкого перехода при ударном нагружении облученных нейтронами металлов и сплавов с оцк – решеткой // ФТТ. 2006. Т.48. Вып.9. С. 1622-1628.
34. <http://soprotmat.ru/dinamika.htm>, [http://www.femto.com.ua/articles/part\\_2/4487.html](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4487.html) <http://www.svarka-lib.com/node/29/print/139.html>
35. В. И. Графутин, Е. П. Прокопьев, В. Кршак, Р. Бурцл, П. Хэнер, А. Земан, О. В. Илюхина, Д. Ерак, М. А. Могилевский, Г. Г. Мясичева, Ю. В. Фунтиков. Изучение конструкционных материалов активной зоны реакторов методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. Ядерная физика. 2011, Т.74. №2. С.195-206.
36. В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, Ю.В.Фунтиков. Позитронная аннигиляционная спектроскопия в ИТЭФ. Инженерная физика. Специальный выпуск. 2007. №1. С.33-39.
37. З.Р.Абдурасулев, П.У.Арифов, Н.Ю.Арутюнов, С.Н.Вассерман, А.Р.Группер, Н.Н.Емелин, Г.И.Журавлева, П.А.Кебель, Ю.П.Кочерга, М.В.Кремков, Ф.Ли, В.М.Мальян, А.А.Пайзиев, В.А.Пикут, Е.П.Прокопьев, С.А.Скопинов, С.А.Тишин, С.В.Шевелев, А.В.Шевченко. Методы позитронной диагностики и расшифровки спектров аннигиляции позитронов. Ташкент: Изд-во «ФАН», 1985. 312 с.
38. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В., Позитроника и нанотехнологии: Определение размеров нанобъектов в пористых системах, наноматериалах и некоторых дефектных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии (обзор). Заводская лаборатория. 2009. Т.75. №6. С.27-36. <http://zldm.ru/upload/iblock/53b/20097506027.pdf>
39. В.И. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Размеры и концентрации нанобъектов в облученных металлах и сплавах по данным метода позитронной аннигиляционной спектроскопии. Заводская лаборатория. 2012. Т.78. №5. С.27-34.
40. Графутин В.И., Илюхина О.В., Козлов Ю.Ф., Мешков И.Н., Мясичева Г.Г., Прокопьев Е.П., Савельев Г.И., Тимошенко С.П., Чаплыгин Ю.А., Фунтиков Ю.В., Хмелевский Н.О., Яковенко С.Л. Определение природы, концентраций и размеров нанобъектов в технически важных материалах и наноматериалах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Современные научные исследования и инновации. – Октябрь, 2012. [http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka\\_prokop\\_paper.pdf](http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka_prokop_paper.pdf) [http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka\\_prokop\\_paper.pdf](http://web.snauka.ru/wp-content/uploads/2012/10/snauka_prokop_paper.pdf)

## **Исследования свойств переходных металлов и сплавов на основе данных метода позитронной аннигиляционной спектроскопии**

<sup>1</sup> В.И. Графутин  
<sup>1</sup> О.В. Илюхина  
<sup>1</sup> Е.П. Прокопьев  
<sup>1</sup> В.А. Илюхин  
<sup>1</sup> Ю.В. Фунтиков

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики». ФГБУ «ГНЦ РФ – ИТЭФ». (НИЦ "Курчатовский Институт" ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ"), Российская Федерация  
117218 Москва, ул. Б.Черемушкинская, 25  
E-mail: epprokopiev@mail.ru

**Аннотация.** Проведены исследования корпусных сталей, используемых в действующих реакторах ВВЭР–440. В исследованных образцах сталей выявлены вакансионные дефекты, в том числе вызванные нейтронным облучением, и определены их размеры. Показано, что метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) является одним из эффективных методов определения размеров нанобъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции позитронов в дефектных материалах.

**Ключевые слова:** Аннигиляция позитронов переходные металлы стали облучение протонами и нейтронами радиусы нанобъектов пор полостей вакансий.

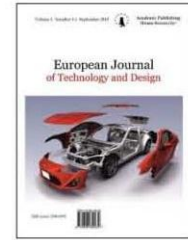
ISSN: 2310-0133

Founder: Academic Publishing House *Researcher*

DOI: 10.13187/issn.2310-0133

Has been issued since 2013.

**European Journal of Technology and Design**



## The Information System Complexity

<sup>1</sup>Victor Ya. Tsvetkov

<sup>2</sup>Natalya Azarenkova

<sup>1</sup> Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation MGTU MIREA, Russian Federation

E-mail: Cvj2@mail.ru

<sup>2</sup> Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation MGTU MIREA, Russian Federation

PhD student

E-mail: Azarka1@yandex.ru

**Abstract.** The article describes the different types of information systems' complexity. As a framework for the assessment a complex system is used. The article shows that the qualitative complexity is determined by the amount of system properties. It is shown that the formal complexity is given by the IP`s complexity description. The article describes the structural complexity. It gives the examples of simple structurally and complex structurally description. Also the authors describe the comparative complexity of ICs. The presentation of volume and time complexity definitions is given.

**Keywords:** information system, a complex system complexity, complicated information system, system analysis.

### 1. Введение.

Современная информационная система – открытая интегрированная автоматизированная система реального времени по автоматизации бизнес-процессов компании всех уровней, в том числе, и бизнес-процессов принятия управленческих решений. В состав ИС входят средства для документационного обеспечения управления, информационной поддержки предметных областей, программное обеспечение, средства организации коллективной работы сотрудников, регламенты взаимодействий, и другие технологические средства. Часто возникает проблема оценки сложности ИС. В реальном мире понятие «сложность» требует рассмотрения оппозиционной [1] величины «простота» [2]. Для решения проблемы целесообразно использовать понятие сложной системы.

### 2. Сложная система как основа оценки сложности.

Сложная система [3] - составной объект, части которого можно рассматривать как отдельные системы, объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями. Части сложной системы можно расчленить на более мелкие подсистемы и т. д., вплоть до выделения элементов [4]. Свойства сложной системы в целом определяются как свойствами составляющих ее элементов, так и характером взаимодействия между ними.

Термин «система» может стоять в начале понятия или в конце понятия. Если термин система стоит в начале понятия, то, как правило, этим описанием отражается объект описания как совокупность и системность этой совокупности. Такое описание можно назвать атрибутивным. Например, система понятий [5].

Если слово «система» стоит в конце понятия, то, как правило, этим подчеркивается наличие системы (а не совокупности) как таковой и специфика системы. Такое описание можно назвать субстанциональным. Например, информационная система.

### 3. Системные свойства и качественная сложность ИС.

В зависимости от аспекта рассмотрения можно дать различные описания и трактовки понятию система. Аспект рассмотрения определяет количество учитываемых факторов и дает различные варианты описания понятия система. Чем больше аспектов рассмотрения, тем больше параметров, описывающих систему.

Аспект рассмотрения целостности системы ( $S$ ) как обязательного ее свойства [6] приводит к ее определению «Система есть нечто целое». Использование определения через наличие (отсутствие) одного свойства приводит к дихотомическому описанию, в котором наличие свойства целостности (*integrity*) обозначают цифрой 1, отсутствие свойства цифрой 0. Наличие целостности характеризуется  $integrity=1$ . Отсутствие целостности  $integrity=0$ .

Такое дихотомическое или оппозиционное рассмотрение информационной системы через свойство целостности приводит к описанию сложной системы ( $S$ ) в следующем виде

$$S=A(integrity=1) (1)$$

Для ИС можно ввести оппозиционное понятие «не система» ( $NS$ ) [5]. Для «не системы» ( $NS$ ) дихотомический подход приводит к описанию вида.  $NS=A(integrity=0) (2)$

Выражение (1) является обязательным, но недостаточным условием наличия системы. Оно освещает только одно свойство системы, а таких свойств может быть несколько.

Дихотомический подход позволяет создать универсальную формулу условия существования системы через другие свойства системы. Например, наличие связей (*connection*) в КИС между элементами и подсистемами является обязательным условием существования системы.

$$S=A(connection=1) (3)$$

Для «не системы» дихотомический подход приводит к описанию вида.  $NS=A(connection=0) (4)$

Наличие структуры (*structure*) в ИС является обязательным условием существования системы

$$S=A(structure=1) (5)$$

Для «не системы» дихотомический подход приводит к описанию вида.  $NS=A(structure=0) (6)$

Типологический ряд пар (1 - 6) дает возможность определить системные свойства. Системные свойства ИС – это такие свойства, описание которых характеризуется выражениями типа (1), (3), (5), а противоположные свойства исключаются для данной системы.

Кроме системных свойств в системе могут существовать и несистемные свойства. Например, наличие стратификации (*stratification*) является необязательным свойством системы. Это означает возможность существование в системе взаимно исключаящих, не системных свойств

$$S=A(stratification(1,0)) (7)$$

Значения (1,0) определяют область истинности аргументов для выражения (7). Наличие стратификации ( $stratification=1$ ) определяет систему как стратифицированную. Отсутствие стратификации ( $stratification=0$ ) определяет систему как не стратифицированную.

### 4. Формальная сложность.

Любая система находится всегда между крайними точками оппозиционной шкалы [1, 7]: абсолютная целостность — абсолютная нецелостность. Функционирование системы можно охарактеризовать степенью проявления в ней одного или другого оппозиционного свойства и тенденцией к его нарастанию или уменьшению.

Для оценки этих явлений А. Холл ввел такие закономерности, как «прогрессирующая факторизация» (стремление системы к состоянию со все более независимыми элементами) и «прогрессирующая систематизация» (стремление системы к уменьшению самостоятельности элементов, т. е. к большей целостности). Существуют методы введения

сравнительных количественных оценок степени целостности, коэффициента использования элементов в целом с точки зрения определенной цели. Качественная сложность системы определяется количеством системных свойств или системных качеств. Она задается цепочкой уравнений (1), (3), (5) и далее.

Для ИС можно применить и «прогрессирующую систематизацию» и «прогрессирующую факторизацию» в зависимости от целей ее подсистем и системы в целом. Если перейти от количества системных признаков к формальному описанию системы, то получим формальную сложность. В частности, если рассматривать ИС как систему управления, то ее можно описать как

$$S = F(T, X, Y, A, \Omega, V, \alpha, \varphi), \quad (8)$$

$$Y(t_2) = \alpha(X(t_1), A(t_1), t_2), \quad (9)$$

$$A(t_2) = \varphi(X(t_1), A(t_1), t_2). \quad (10)$$

где  $T$  - время,  $X$  - входы,  $Y$  - выходы,  $A$  - состояния,  $\Omega$  - класс операторов на выходе,  $V$  - значения операторов на выходе,  $\alpha$  - функциональная связь по выходу  $\varphi$  - функциональная связь по состояниям.

Совокупность выражений (8-10) задает формальную сложность информационной системы как системы управления. Выражения (9-10), как правило, являются динамической характеристикой и часто для этой цели используют дифференциальные уравнения.

Если рассматривать ИС как основу организационной системы [8, 9], то используют другую запись.

$$S = F(PL, RO, RJ, EX, PR, DT, SV, RD, EF) \quad (11),$$

где  $PL$  - цели и планы,  $RO$  - внешние ресурсы,  $RJ$  - внутренние ресурсы,  $EX$  - исполнители,  $PR$  - процесс,  $DT$  - помехи,  $SV$  - контроль,  $RD$  - управление,  $EF$  - эффект. Формальная сложность задается сложностью описания ИС, которое представляет собой аналитическую форму.

### 5. Объемная и временная сложность ИС.

Объемная сложность ИС определяется объемом информационной коллекции, необходимой для описания, анализа и функционирования системы. Объемная сложность затрудняет обработку информации и анализ ИС

Временная сложность ИС определяется противоречием между требуемым временем действия для управления объектом или принятия решений и временной возможностью ИС по решению этих задач

### 6. Структурная сложность ИС.

Структурная сложность ИС определяется числом связей и часто отражает структурным графом [10]. Она часто задается «деревом разбора». На рисунке 1. Приведены структурно простой и структурно сложный объекты. Простая структура имеет вид [11]

$$S = F(P_1, P_2, P_3, \dots, P_E) \quad (12)$$

То есть она представляет собой функцию от многих аргументов. Для построения сложных структурных схем может быть применен дихотомический анализ [11]. Для оценки сложности по таким схемам применима «Колмогоровская сложность» [12].

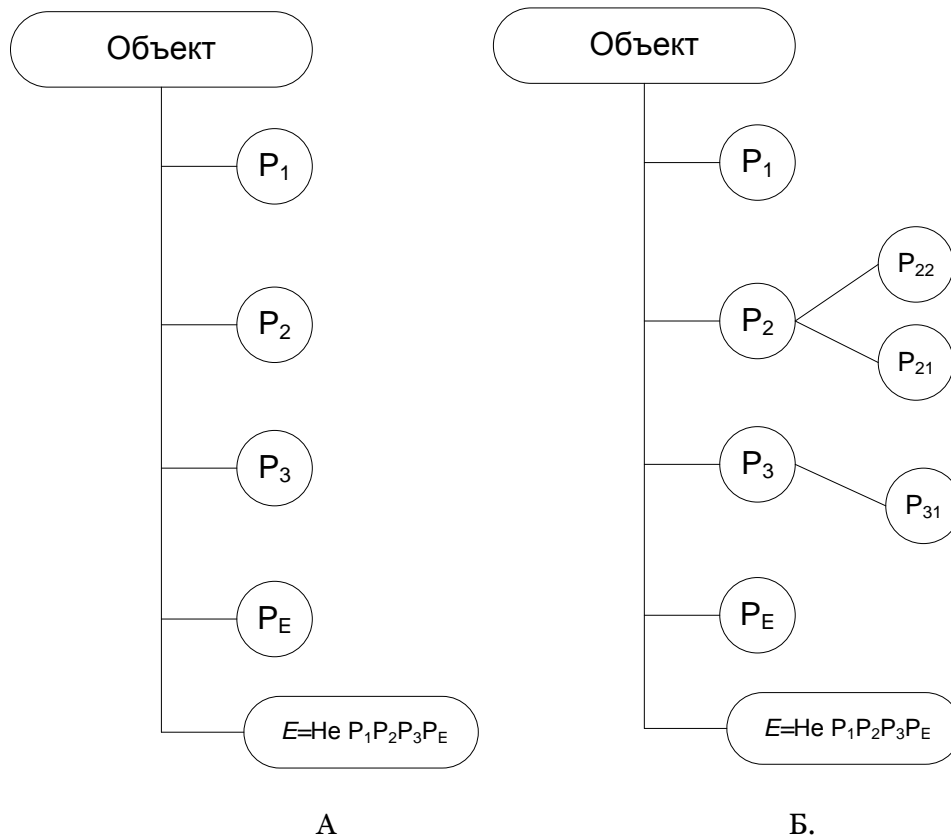


Рис. 1. Пример структурно простого объекта (А) и структурно сложного объекта (Б)

Формальное описание сложной структуры имеет вид (для примера на рис. 1 Б)

$$S=F(P_1, P_2[P_{21}, P_{22}], P_3[P_{31}], \dots P_E) \quad (13)$$

То есть она представляет собой функцию, у которой в качестве аргументов могут быть аргументы, функции и сложные функции.

### 7. Сравнительная сложность.

Кроме рассмотренных видов сложности существует понятие сравнительная сложность. Оценка такой сложности получается, когда группа экспертов сравнивает разные ИС между собой и ранжирует их по степени сложности. Одним из подходов решения этой задачи является теория предпочтений [13, 14]. Особенностью этой оценки сложности является то, что она задается только на определенной группе сравниваемых систем и вне этой группы силы не имеет.

### 8. Выводы.

Существуют различные виды сложность информационных систем. Поэтому сложность ИС нельзя определить одной характеристикой или одним числовым значением. Качественная сложность системы определяется количеством системных свойств. Формальная сложность системы определяется видом уравнений, описывающих ИС. Структурная сложность задается структурным графом и определяется методикой построения системы. Сравнительная сложность определяется экспертным оцениванием.

### 9. Примечания:

1. Tsvetkov V.Y. Opposition Variables as a Tool of Qualitative Analysis // World Applied Sciences Journal. 2014. № 30 (11). p. 1703-1706.
2. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 343 с.
3. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. М.: Мысль, 1978. 272 с.

4. S. A. Kuja, I. V. Solovjev, V. Y. Tsvetkov System Elements Heterogeneity // European Researcher, 2013, Vol.(60), № 10-1, p. 2366-2373.
5. Цветков В.Я. Системный анализ при обработке информации. - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany. 2014. 82 с. ISBN 978-3-659-20250-6.
6. Акофф Р. Искусство решения проблем / Пер. с англ. М.: Мио. 1982. 219 с.
7. Цветков В.Я. Использование оппозиционных переменных для анализа качества образовательных услуг // Современные наукоёмкие технологии. 2008. № 1. С. 62-64.
8. Тихонов А.Н., Иванников А.Д., Соловьёв И.В., Цветков В.Я., Кудж С.А. Концепция сетцентрического управления сложной организационно-технической системой. М.: МаксПресс, 2010. 136 с.
9. Соловьёв И.В. Сложная организационно-техническая система как инструмент исследования искусственных антропогенных систем // Дистанционное и виртуальное обучение. 2014. №1. С. 5-23.
10. Болбаков Р.Г., Маркелов В.М., Цветков В.Я. Топологическое моделирование на геоданных // Перспективы науки и образования. 2014. №2. С. 44-50.
11. Цветков В.Я. Дихотомический анализ сложности системы // Перспективы науки и образования. 2014. №2. С. 14-19.
12. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению количества информации // Проблемы передачи информации. 1965. Том 1, Вып. 1, С. 3-11.
13. Цветков В.Я. Основы теории предпочтений. М.: Макс Пресс 2004.
14. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М.: Наука, 1970.

### Сложность информационной системы

<sup>1</sup> Виктор Яковлевич Цветков

<sup>2</sup> Наталья Викторовна Азаренкова

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики МГТУ МИРЭА, Российская Федерация  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: Cvj2@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики МГТУ МИРЭА, Российская Федерация  
Аспирант

**Аннотация.** Статья описывает различные виды сложности информационных систем. В качестве основы оценки используется сложная система. Показано, что качественная сложность определяется количеством системных свойств. Показано, что формальная сложность задается сложностью описания ИС. Описана структурная сложность и приведены примеры структурно простого и структурно сложного описания. Описана сравнительная сложность ИС. Раскрывается понятие объемной и временной сложности.

**Ключевые слова:** информационная система, сложная система, сложность, сложная информационная система, системный анализ.

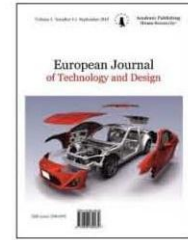


ISSN: 2310-0133

Founder: Academic Publishing House *Researcher*

DOI: 10.13187/issn.2310-0133

Has been issued since 2013.



## European Journal of Technology and Design

### An Imprecise Model of Combining Expert Judgments About Quantiles

<sup>1</sup>Lev V. Utkin

<sup>2</sup>Yulia A. Zhuk

<sup>3</sup>Ivan A. Selikhovkin

<sup>1-3</sup>Saint Petersburg State Forest Technical University, Russian Federation

**Abstract.** Most models of aggregating expert judgments assume that there is some precise probability distribution characterizing the system behavior and expert information allows us to compute parameters of this distribution. However, judgments elicited from experts are usually imprecise and unreliable due to the limited precision of human assessments, and any assumption concerning a certain distribution in combination with imprecision of judgments may lead to incorrect results. To take into account the imprecision and unreliability of judgments, a model of combining and processing the expert judgments about quantiles of an unknown probability distribution is proposed in this paper. Many results are obtained in the explicit form and are very simple from the computational point of view. Numerical examples illustrate the proposed models.

**Keywords:** Expert judgments, imprecise probabilities, quantile, uncertainty modelling, natural extension, linear optimization.

#### 1. Introduction

Judgments elicited from human experts may be a very important part of information about systems on which limited experimental observations are possible. Several methods for elicitation, assessment and pooling of this type of information have been proposed in [1, 3, 5, 16, 17]. In order to get useful information from the experts, a proper uncertainty modeling of pieces of data supplied by experts has to be used. As pointed out in [4, 11], the uncertainty models play a central role in the use of expert judgments, because no human being would claim that he is absolutely sure about his judgments or advice. Therefore, it is necessary to incorporate into any model the individual expert's uncertainty about his advice, the decision maker's uncertainty about the quality of the expert(s), and how these two kinds of uncertainty interact and impact on the credibility of the final results.

Judgments elicited from experts are usually imprecise and unreliable due to the limited precision of human assessments. When several experts supply judgments or assessments about a system, their responses are pooled so as to derive a single measure of the system behavior. Most methods of aggregating these assessments assume that there is some precise probability distribution characterizing the system behavior and available expert information allows us to compute parameters of this distribution. However, any assumption concerning a certain distribution in combination with imprecision of expert judgments may lead to incorrect results which often cannot be validated due to the lack of experimental observations. Therefore, it is necessary to aggregate the expert judgments without any assumptions about probability distributions and to use only the information which is available. In order to cope with uncertainty and vagueness of available information, it is proposed to apply the *imprecise probability theory* (also called the theory of lower previsions [14], the theory of interval statistical models [8], the theory of interval probabilities [15]), whose general framework is provided by upper and lower

previsions. Some examples of combining the partial and heterogeneous information in reliability analysis by means of the framework of imprecise probabilities can be found in [6, 12, 13].

However, the opinion of reliable experts should be more important than those of unreliable ones. Various methods of the pooling of assessments, taking into account the quality of experts, are available in the literature [3, 9, 10, 16]. These methods use the concept of precise probabilities for modelling the uncertainty. It should be noted that the models of aggregating expert judgments taking into account the quality of experts can be considered in a framework of hierarchical uncertainty models which are rather common in uncertainty theory.

To cope with the lack of precise expert knowledge a framework of the possibility theory has been applied to combining judgments [4, 11]. However, this approach requires assuming a certain type of a possibility distribution to formalize the expert information. Moreover, the obtained results are often too imprecise in order to use them in practice. Therefore, simplified models of combining the common expert judgments about quantiles of an unknown probability distribution are proposed in this paper. Many results are obtained in the explicit form and are very simple from the computational point of view.

It is worth noticing that the considered models of uncertainty differ from standard uncertainty models used in the imprecise probability theory (see section "Preliminary definitions"), where there exists an interval of previsions of a certain gamble. In the models of quantiles, the gamble can be viewed as a set of gambles for which the same previsions are defined. Various numerical examples illustrate the proposed models.

## 2. Preliminary definitions

Suppose there is a discrete random variable  $X$  defined on the sample space  $\Omega$  and information about this variable is represented as a set of  $m$  interval-valued expectations of functions  $f_1(X), \dots, f_m(X)$ . Denote these lower and upper expectations  $\underline{a}_i = \underline{\mathbf{E}}f_i$  and  $\bar{a}_i = \bar{\mathbf{E}}f_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ . In terms of the theory of imprecise probabilities the corresponding functions  $f_i(X)$  and interval-valued expectations  $\underline{\mathbf{E}}f_i$  and  $\bar{\mathbf{E}}f_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , are called *gambles* and *lower and upper previsions*, respectively. We can model various types of information by means of lower and upper previsions. For example, if  $f_i$  is the indicator function of an event  $A$ , then previsions  $\underline{\mathbf{E}}f_i$  and  $\bar{\mathbf{E}}f_i$  can be regarded as lower and upper probabilities of the event  $A$ . If  $f_i(X) = X$ , then  $\underline{\mathbf{E}}X$  and  $\bar{\mathbf{E}}X$  are bounds for the mean value of the corresponding random variable. The lower and upper previsions  $\underline{\mathbf{E}}f_i$  and  $\bar{\mathbf{E}}f_i$  can be regarded as bounds for an unknown precise prevision  $\mathbf{E}f_i$  which will be called a *linear prevision*.

For computing new previsions  $\underline{\mathbf{E}}g$  and  $\bar{\mathbf{E}}g$  of a gamble  $g(X)$  from the available information, *natural extension* can be used. Natural extension is a general mathematical procedure for calculating new previsions from initial judgments. It produces a coherent overall model from a certain collection of imprecise probability judgments and may be seen as the basic constructive step in interval-valued statistical reasoning. It is written as the following optimization problems:

$$\underline{\mathbf{E}}g = \min_p \sum_{x \in \Omega} g(x)p(x), \quad \bar{\mathbf{E}}g = \max_p \sum_{x \in \Omega} g(x)p(x), \quad (1)$$

subject to

$$p(x) \geq 0, \quad \sum_{x \in \Omega} p(x) = 1, \quad \underline{a}_i \leq \sum_{x \in \Omega} f_i(x)p(x) \leq \bar{a}_i, \quad i \leq m. \quad (2)$$

Here the minimum and maximum are taken over a set of all possible probability distributions  $\{p(x)\}$  satisfying conditions (2).

Optimization problems (1)-(2) can be explained as follows. The linear prevision  $\mathbf{E}g$  can be computed as

$$\mathbf{E}g = \sum_{x \in \Omega} g(x)p(x).$$

However, we do not know the distribution  $p$  because our initial information is restricted only by the lower and upper previsions  $\underline{\mathbf{E}}f_i$  and  $\overline{\mathbf{E}}f_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , and there is no information about distributions of  $X$ . At the same time, the available lower and upper previsions produce the set of possible distributions that are consistent with these previsions. This means that we can find only the largest and smallest possible values of  $\mathbf{E}g$  for all distributions from the set  $\{p(x)\}$ . It can be carried out by solving optimization problems (1)-(2).

It should be noted that problems (1)-(2) are linear and the dual optimization problems can be written as follows [8,13]:

$$\overline{\mathbf{E}}g = \min_{c_0, c_i, d_i} \left( c_0 + \sum_{i=1}^m (c_i \overline{a}_i - d_i \underline{a}_i) \right), \quad \underline{\mathbf{E}}g = -\overline{\mathbf{E}}(-g), \quad (3)$$

$$\text{subject to } c_i, d_i \in \mathbf{R}_+, c_0 \in \mathbf{R}, i = 1, \dots, m, \text{ and } \forall x \in \Omega, \quad (4)$$

$$c_0 + \sum_{i=1}^m (c_i - d_i) f_i(x) \geq g(x).$$

Here  $c_0, c_i, d_i$  are the optimization variables such that  $c_0$  corresponds to the constraint  $\sum_{x \in \Omega} p(x) = 1$ ,  $c_i$  corresponds to the constraint  $\sum_{x \in \Omega} f_i(x) p(x) \leq \overline{\mathbf{E}}f_i$ , and  $d_i$  corresponds to the constraint  $\underline{\mathbf{E}}f_i \leq \sum_{x \in \Omega} f_i(x) p(x)$ . The optimization variables  $c_i, d_i, i = 1, \dots, m$ , are defined on all positive real number  $\mathbf{R}_+$ , the variable  $c_0$  is defined on the set of all real numbers  $\mathbf{R}$ . It turns out that in many applications the dual optimization problems are simpler in comparison with problems (1)-(2) because this representation allows avoiding the situation when a number of the optimization variables is infinite. Of course, the dual optimization problems have generally an infinite number of constraints each of them is defined by a value of  $x$ . However, as it will be shown below, the number of constraints can be reduced to a finite number.

### 3. The problem statement

In the probabilistic approach, experts are typically asked about quantiles of a random variable  $X$  defined on a sample space  $\Omega$ . The smallest number  $x \in \Omega$ , such that  $\Pr\{X \leq x\} = k/100$ , is called the  $k\%$  quantile and denoted  $qk\%$ . In this approach the experts are often asked to supply the 5%, 50% and the 95% quantiles. In other words, an expert supplies  $x_1, x_2$  and  $x_3$  such that  $\Pr\{X \leq x_1\} = 0.05$ ,  $\Pr\{X \leq x_2\} = 0.5$  and  $\Pr\{X \leq x_3\} = 0.95$ , respectively. Based on these values, and on the choice of a parameterized family of distribution functions, a fitted distribution function is chosen that represents the available information in some best way to some extent.

Suppose that  $n$  experts provide their judgments about  $q_i, i = 1, \dots, n$ , quantiles of an unknown cumulative discrete probability distribution of the random variable  $X$ . In particular, the experts may provide judgments about one  $q$  quantile, i.e.,  $q_i = q, \forall i \leq n$ . This information can be represented as

$$\Pr\{X \leq x_i\} = q_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

where points  $x_i, i = 1, \dots, n$ , are elicited from experts.

In terms of the imprecise probability theory, the probability  $q_i$  can be viewed as identical lower and upper previsions of the gamble  $I_{[0, x_i]}(X)$ , i.e.,  $\underline{\mathbf{E}}I_{[0, x_i]}(X) = \overline{\mathbf{E}}I_{[0, x_i]}(X)$ . We assume that the sample space  $\Omega = \{x_0, x_1, \dots, x_N\}$  is discrete and finite for simplicity. As pointed out in [4], experts better supply intervals rather than point-values because their knowledge is not only of limited reliability, but also imprecise. In other words, experts provide some intervals of quantiles in the form  $\mathbf{X}_i = [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ . This information can be formally written as

$$\Pr\{X \leq [\underline{x}_i, \overline{x}_i]\} = q_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

It can be seen from Fig.1 that this interval produces a set of probability distributions such that a lower distribution contains the point  $q(\bar{x}_i)$  and the upper one contains the point  $q(\underline{x}_i)$ . Now the question arises. How to interpret the intervals of quantiles? It depends on experts, i.e., on their imagination of interval quantiles. Two models of the expert imagination can be marked out. The first model corresponds to the expert judgment: "I do not know exactly the true value of the quantile, but one of the values in the interval  $[\underline{x}_i, \bar{x}_i]$  is true". The second model corresponds to the expert judgment: "All points in the interval  $[\underline{x}_i, \bar{x}_i]$  are true values of the quantile". Of course, the first model is more common in practice of elicitation of judgments from experts. Therefore, we will deal with the imprecise judgments by considering them from the first model point of view.

Our aim is to find parameters of an unknown distribution of  $X$ , which can be represented as expectations  $\mathbf{E}g$  of some functions  $g(X)$ .

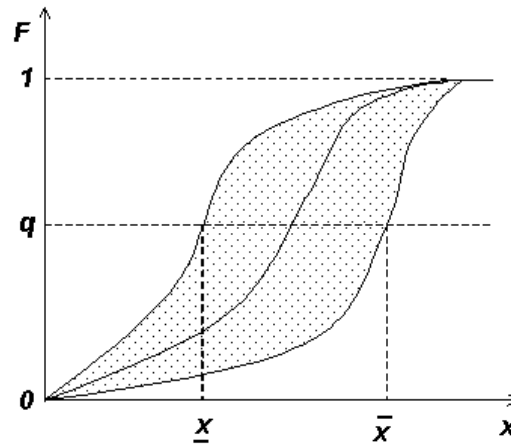


Fig. 1. An example of distributions corresponding to the interval-valued quantile

#### 4. First-order model

Suppose that we know precise values of  $q_i$  quantiles  $t_i, i = 1, \dots, n$ . Denote  $\mathbf{T} = (t_1, \dots, t_n)$  and let  $\underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\}$  and  $\bar{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\}$  be lower and upper previsions of the function  $g$  under condition of precise values  $t_i$  of quantiles. By using the natural extension for computing the lower prevision of the function  $g$ , we get the following linear programming problem:

$$\underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \max_{c_0, w_i} \left( c_0 + \sum_{i=1}^n w_i q_i \right), \tag{5}$$

subject to  $w_i \in \mathbf{R}, c_0 \in \mathbf{R}, i = 1, \dots, n$ , and  $\forall x \in \Omega$ ,

$$c_0 + \sum_{i=1}^n w_i I_{[0, t_i]}(x) \leq g(x). \tag{6}$$

Here  $w_i, i = 1, \dots, n$ , are optimization variables obtained by replacing variables  $c_i$  and  $d_i$  in (3)-(4) due to the equality  $\bar{a}_i = \underline{a}_i = q_i$ , i.e.,  $w_i = c_i - d_i$ . The upper prevision  $\bar{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\}$  is computed as

$$\bar{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \min_{c_0, w_i} \left( c_0 + \sum_{i=1}^n w_i q_i \right), \tag{7}$$

subject to  $w_i \in \mathbf{R}, c_0 \in \mathbf{R}, i = 1, \dots, n$ , and  $\forall x \in \Omega$ ,

$$c_0 + \sum_{i=1}^n w_i I_{[0, t_i]}(x) \geq g(x). \tag{8}$$

These optimization problems can be easily derived from (3)-(4).

**Proposition 1.** Suppose that  $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_n$ . Denote  $q_0 = 0$ ,  $q_{n+1} = 1$ ,  $t_0 = x_0$ , and  $t_{n+1} = x_N$ . Then solutions to problems (5)-(6) and (7)-(8) exist if  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ . Denote

$$\underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = g(x_0)q_1 + \sum_{i=1}^n g(t_i)(q_{i+1} - q_i), \quad (9)$$

$$\overline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = g(x_N)(1 - q_n) + \sum_{i=1}^n g(t_i)(q_i - q_{i-1}). \quad (10)$$

If the function  $g(x)$  is non-decreasing, then  $\underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \underline{\mathbf{E}}\widehat{g}\{\mathbf{T}\}$ ,  $\overline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \overline{\mathbf{E}}\widehat{g}\{\mathbf{T}\}$ . If the function  $g(x)$  is non-increasing, then  $\underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \overline{\mathbf{E}}\widehat{g}\{\mathbf{T}\}$ ,  $\overline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \underline{\mathbf{E}}\widehat{g}\{\mathbf{T}\}$ .

**Proof:** First, we consider the case of the non-decreasing function  $g$ . It is obvious that any solution exists if  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$  because the judgments  $\Pr\{X \leq t_1\} = q_1$  and  $\Pr\{X \leq t_2\} = q_2$  by  $q_1 \leq q_2$  and  $t_1 > t_2$  are conflicting and inconsistent. Let  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ . Let us divide the interval  $[0, x_N]$  into  $n+1$  adjacent subintervals  $[t_i, t_{i+1}]$ ,  $i = 0, \dots, n$ . Since the function  $g$  is non-decreasing, then constraints to problem (5)-(6) can be rewritten as

$$\begin{aligned} c_0 + w_1 + w_2 + \dots + w_n &\leq g(t_0), \\ c_0 + w_2 + \dots + w_n &\leq g(t_1), \\ c_0 + w_3 + \dots + w_n &\leq g(t_2), \\ &\dots \\ c_0 &\leq g(t_n). \end{aligned}$$

Let us prove that the optimal solution to problem (5)-(6) is  $c_0 = g(t_n)$ ,  $w_i = g(t_{i-1}) - g(t_i)$ ,  $i = 2, \dots, n$ ,  $w_1 = g(t_0) - g(t_1)$ . This solution satisfies all constraints. Let us consider the first and the last constraints. Denote  $\sum_{i=1}^n w_i = W$  and  $\sum_{i=1}^n w_i q_i = WQ$ . It is obvious that  $Q \leq 1$ . Let us rewrite (5)-(6) as follows:

$$\underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = \max_{c_0, W} (c_0 + WQ),$$

subject to  $W \in \mathbf{R}$ ,  $c_0 \in \mathbf{R}$ , and

$$c_0 + W \leq g(t_0), \quad c_0 \leq g(t_n).$$

If an optimal solution to optimization problem (5)-(6) exists, then it will be a part of optimal solutions to the above problem because some of the constraints to the initial problem were removed. This problem has the following solution:  $c_0 = g(t_n)$ ,  $W = g(t_0) - g(t_n)$ . It follows from the  $n$ -th constraint to problem (5)-(6) that  $w_n = g(t_{n-1}) - c_0 = g(t_{n-1}) - g(t_n)$ . It follows from the  $(n-1)$ -th constraint that  $w_{n-1} = g(t_{n-2}) - c_0 - w_n = g(t_{n-2}) - g(t_{n-1})$ . By continuing the determination of optimal values of  $w_i$ , we get the optimal solution. By assuming  $t_0 = x_0$ , there holds

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} &= g(t_n) - \sum_{i=1}^n (g(t_{i-1}) - g(t_i))q_i \\ &= g(x_0)q_1 + \sum_{i=1}^n g(t_i)(q_{i+1} - q_i). \end{aligned}$$

The upper bound is similarly determined. In this case, the constraints to problem (7)-(8) are

$$\begin{aligned}
 c_0 + w_1 + w_2 + \dots + w_n &\geq g(t_1), \\
 c_0 + w_2 + \dots + w_n &\geq g(t_2), \\
 c_0 + w_3 + \dots + w_n &\geq g(t_3), \\
 &\dots \\
 c_0 &\geq g(t_{n+1}),
 \end{aligned}$$

and the optimal solution is  $c_0 = g(t_{n+1}) = g(x_N)$ ,  $w_i = g(t_i) - g(t_{i+1})$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ ,  $w_n = g(t_n) - g(x_N)$ . A case of the non-increasing function  $g$  is similarly proved.

Since at least one of the points  $t_i$  belonging to the interval  $[\underline{x}_i, \bar{x}_i]$  is a true value of the corresponding quantile, then there hold

$$\underline{\mathbf{E}}g = \min_{t_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i], i=1, \dots, n} \underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\}, \quad \bar{\mathbf{E}}g = \max_{t_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i], i=1, \dots, n} \bar{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\}.$$

**Proposition 2.** Suppose that  $t_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$ ,  $i = 1, \dots, n$ . If there exist such  $i \in \{1, \dots, n\}$  and  $j \in \{1, \dots, n\}$  that  $\underline{x}_i > \bar{x}_j$  and  $q_i < q_j$ , then expert judgments are conflicting. Let

$$\underline{\mathbf{E}}\widehat{g} = g(x_0)q_1 + \sum_{i=1}^n g\left(\max_{k=1, \dots, i} \underline{x}_k\right)(q_{i+1} - q_i), \tag{11}$$

$$\bar{\mathbf{E}}\widehat{g} = g(x_N)(1 - q_n) + \sum_{i=1}^n g\left(\min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k\right)(q_i - q_{i-1}). \tag{12}$$

If the function  $g(x)$  is non-decreasing, then  $\underline{\mathbf{E}}g = \underline{\mathbf{E}}\widehat{g}$ ,  $\bar{\mathbf{E}}g = \bar{\mathbf{E}}\widehat{g}$ . If the function  $g(x)$  is non-increasing, then  $\underline{\mathbf{E}}g = \bar{\mathbf{E}}\widehat{g}$ ,  $\bar{\mathbf{E}}g = \underline{\mathbf{E}}\widehat{g}$ .

**Proof:** If there hold  $\underline{x}_i > \bar{x}_j$  and  $q_i < q_j$  for any  $i$  and  $j$ , then it is impossible to find points  $t_i$  and  $t_j$  satisfying the condition  $t_i \leq t_j$ . Consider the case of the non-decreasing function  $g$ . Then, according to Proposition 1, we can write

$$\underline{\mathbf{E}}g = \min_{t_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i], i=1, \dots, n} \underline{\mathbf{E}}g\{\mathbf{T}\} = g(x_0)q_1 + \min_{t_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i], i=1, \dots, n} \sum_{i=1}^n g(t_i)(q_{i+1} - q_i).$$

In order to achieve the minimum, it is necessary to take minimal values of  $t_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . These values are  $\underline{x}_i$ . However, there is the additional condition of consistency  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ . Let  $t_1 = \underline{x}_1$ . In order to satisfy the condition of consistency, we have to take  $t_2 = \max(t_1, \underline{x}_2) = \max(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$ . By continuing the determination of minimal values of  $t_i$ , we get  $t_i = \max_{k=1, \dots, i} \underline{x}_k$ . After substituting the optimal values of  $t_i$  into the objective function, we get  $\underline{\mathbf{E}}g$ . The upper prevision is similarly proved. Let  $t_n = \bar{x}_n$ . In order to satisfy the condition of consistency, we have to take  $t_{n-1} = \min(t_n, \bar{x}_{n-1}) = \min(\bar{x}_n, \bar{x}_{n-1})$ . By continuing the determination of maximal values of  $t_i$ , we get  $t_i = \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k$ . The case of the non-increasing function  $g$  is similarly proved.

**Corollary 1.** If  $q_1 = q_2 = \dots = q_n = q$ , then

$$\underline{\mathbf{E}}\widehat{g} = qg(x_0) + (1 - q)g\left(\max_{k=1, \dots, n} \underline{x}_k\right),$$

$$\bar{\mathbf{E}}\widehat{g} = (1 - q)g(x_N) + qg\left(\min_{k=1, \dots, n} \bar{x}_k\right).$$

If the function  $g(x)$  is non-decreasing, then  $\underline{\mathbf{E}}g = \underline{\mathbf{E}}\widehat{g}$ ,  $\overline{\mathbf{E}}g = \overline{\mathbf{E}}\widehat{g}$ . If the function  $g(x)$  is non-increasing, then  $\underline{\mathbf{E}}g = \overline{\mathbf{E}}\widehat{g}$ ,  $\overline{\mathbf{E}}g = \underline{\mathbf{E}}\widehat{g}$ .

**Proof:** The proof follows directly from Proposition 2.

Let us consider some important special cases of the function  $g$ .

Suppose that  $g(X) = I_{(\tau, x_N]}(X)$  (the corresponding lower and upper previsions are values of a survival function of  $X$  at point  $\tau$ , i.e.,  $\Pr\{X > \tau\}$ ). The function  $g(X) = I_{(\tau, x_N]}(X)$  is non-decreasing and takes two values 0 and 1. Then there hold

$$\underline{\mathbf{E}}I_{[\tau, x_N]}(X) = \sum_{i=1}^n (q_{i+1} - q_i) I_{(\tau, x_N]} \left( \max_{k=1, \dots, i} x_k \right),$$

$$\overline{\mathbf{E}}I_{[\tau, x_N]}(X) = (1 - q_n) + \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i-1}) I_{(\tau, x_N]} \left( \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k \right).$$

If  $q_1 = \dots = q_n = q$ , then

$$\underline{\mathbf{E}}I_{[\tau, x_N]}(X) = (1 - q) I_{(\tau, x_N]} \left( \max_{k=1, \dots, i} x_k \right),$$

$$\overline{\mathbf{E}}I_{[\tau, x_N]}(X) = (1 - q) + q I_{(\tau, x_N]} \left( \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k \right).$$

Suppose that  $g(X) = I_{[0, \tau]}(X)$  (the corresponding lower and upper previsions are values of a cumulative distribution function of  $X$  at the point  $\tau$ , i.e.,  $\Pr\{X \leq \tau\}$ ). The function  $g(X) = I_{[0, \tau]}(X)$  is non-increasing and takes two values 0 and 1. Then there hold

$$\underline{\mathbf{E}}I_{[0, \tau]}(X) = (1 - q_n) + \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i-1}) I_{[0, \tau]} \left( \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k \right),$$

$$\overline{\mathbf{E}}I_{[0, \tau]}(X) = q_1 + \sum_{i=1}^n (q_{i+1} - q_i) I_{[0, \tau]} \left( \max_{k=1, \dots, i} x_k \right).$$

If  $q_1 = \dots = q_n = q$ , then

$$\underline{\mathbf{E}}I_{[0, \tau]}(X) = (1 - q) + q I_{[0, \tau]} \left( \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k \right), \quad \overline{\mathbf{E}}I_{[0, \tau]}(X) = q + (1 - q) I_{[0, \tau]} \left( \max_{k=1, \dots, i} x_k \right).$$

Since the function  $g(X) = X^m$  is non-decreasing, then the upper and lower  $m$ -th moments of  $X$  are determined as

$$\underline{\mathbf{E}}X^m = x_0^m q_1 + \sum_{i=1}^n \left( \max_{k=1, \dots, i} x_k \right)^m (q_{i+1} - q_i),$$

$$\overline{\mathbf{E}}X^m = x_N^m (1 - q_n) + \sum_{i=1}^n \left( \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k \right)^m (q_i - q_{i-1}).$$

If  $q_1 = \dots = q_n = q$ , then there hold

$$\underline{\mathbf{E}}X^m = x_0^m q + \left( \max_{k=1, \dots, n} x_k \right)^m (1 - q), \quad \overline{\mathbf{E}}X^m = x_N^m (1 - q) + \left( \min_{k=i, \dots, n} \bar{x}_k \right)^m q.$$

**Corollary 2.** For any point  $\tau \in \Omega$ , there hold  $\underline{\mathbf{E}}I_{[\tau, x_N]}(X) + \overline{\mathbf{E}}I_{[0, \tau]}(X) = 1$  and  $\overline{\mathbf{E}}I_{[\tau, x_N]}(X) + \underline{\mathbf{E}}I_{[0, \tau]}(X) = 1$ .

**Proof:** Let us consider the first equality. Note that if the inequality  $\min_{k=i,\dots,n} \bar{x}_k > \tau$  is valid, then the inequality  $\min_{k=i,\dots,n} \bar{x}_k \leq \tau$  is violated and vice versa. Let  $J$  be a subset of indices  $i = 1, \dots, n$ , for which the inequality  $\min_{k=i,\dots,n} \bar{x}_k > \tau$  is valid. Then

$$\begin{aligned} \underline{E}I_{[\tau, x_N]}(X) + \bar{E}I_{[0, \tau]}(X) &= \sum_{i \in J} (q_{i+1} - q_i) + q_1 + \sum_{i \notin J} (q_{i+1} - q_i) \\ &= q_1 + \sum_{i=1}^n (q_{i+1} - q_i) = q_{n+1} = 1, \end{aligned}$$

as was to be proved. The second equality is similarly proved.

It follows from Corollary 2 that the property of coherence of imprecise probabilities is fulfilled for the proposed model.

**Proposition 3.** Suppose that  $q_i = Q_1$  for any  $i = 1, \dots, n_1$ ,  $q_i = Q_2$  for any  $i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2, \dots$ ,  $q_i = Q_m$ , for any  $i = n_1 + \dots + n_{m-1} + 1, \dots, n$ , i.e., there are  $m$  groups of quantiles containing  $n_i$  identical values of  $q_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Then

$$\begin{aligned} \underline{E}\widehat{g} &= g(x_0)Q_1 + \sum_{i=1}^m g\left(\max_{k=1,\dots,i} \underline{z}_k\right)(Q_{i+1} - Q_i), \\ \bar{E}\widehat{g} &= g(x_N)(1 - Q_m) + \sum_{i=1}^m g\left(\min_{k=i,\dots,m} \bar{z}_k\right)(Q_i - Q_{i-1}), \end{aligned}$$

where  $\underline{z}_k = \max_{l=n_1+\dots+n_{k-1}+1,\dots,n_1+\dots+n_k} \underline{x}_l$ ,  $\bar{z}_k = \min_{l=n_1+\dots+n_{k-1}+1,\dots,n_1+\dots+n_k} \bar{x}_l$

**Proof:** Let us consider the case of  $m = 2$  for simplicity. Then there holds

$$\begin{aligned} \underline{E}\widehat{g} &= g(x_0)q_1 + \sum_{i=1}^{n_1} g\left(\max_{k=1,\dots,i} \underline{x}_k\right)(q_{i+1} - q_i) + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} g\left(\max_{k=1,\dots,i} \underline{x}_k\right)(q_{i+1} - q_i) \\ &= g(x_0)q_1 + g\left(\max_{k=1,\dots,n_1} \underline{x}_k\right)(Q_2 - Q_1) + g\left(\max_{k=1,\dots,n_1+n_2} \underline{x}_k\right)(1 - Q_2). \end{aligned}$$

Note that

$$\max_{k=1,\dots,n_1} \underline{x}_k = \underline{z}_1, \quad \max_{k=1,\dots,n_1+n_2} \underline{x}_k = \max(\underline{z}_1, \underline{z}_2).$$

Hence

$$\underline{E}\widehat{g} = g(x_0)q_1 + \sum_{i=1}^2 g\left(\max_{k=1,\dots,i} \underline{z}_k\right)(Q_{i+1} - Q_i),$$

as was to be proved. The upper bound  $\bar{E}\widehat{g}$  is similarly proved.

Proposition 3 describes a property of decomposition of judgments. A number of experts often provide judgments about the same quantile. In this case, these judgments can be easily aggregated by computing a maximal value of lower bounds  $\underline{x}_l$  and a minimal value of upper bounds  $\bar{x}_l$ . In fact, the obtained interval  $[\underline{z}_k, \bar{z}_k]$  is none other than the intersection of intervals corresponding to the identical probabilities  $q_i$ .

Let us consider general properties of the proposed model.

**Proposition 4.** If judgments about quantiles are non-conflicting, then the following properties of coherent previsions hold:

(i)  $\underline{E}g \leq \bar{E}g$ ,



- (ii)  $\underline{E}g = -\overline{E}(-g)$ ,
- (iii)  $\underline{E}(a+bg) = a+b\underline{E}g$ ,  $\overline{E}(a+bg) = a+b\overline{E}g$ ,  $\forall b \in \mathbf{R}^+$ ,  $\forall a \in \mathbf{R}$ ,
- (iiii) if  $\forall x \in \Omega$ ,  $g(x) \leq f(x)$ , then  $\underline{E}g \leq \underline{E}f$  and  $\overline{E}g \leq \overline{E}f$ .

**Proof:** It is known that the natural extension produces coherent previsions, i.e., it follows from optimization problems (5)-(8) that properties (i), (ii), (iii), (iiii) are valid for  $\underline{E}g\{\mathbf{T}\}$  and  $\overline{E}g\{\mathbf{T}\}$ . Then it follows from the inequality  $\underline{E}g\{\mathbf{T}\} \leq \overline{E}g\{\mathbf{T}\}$  that

$$\begin{aligned} \underline{E}g &= \min_{t_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i=1, \dots, n} \underline{E}g\{\mathbf{T}\} \leq \max_{t_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i=1, \dots, n} \underline{E}g\{\mathbf{T}\} \\ &\leq \max_{t_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i=1, \dots, n} \overline{E}g\{\mathbf{T}\} = \overline{E}g. \end{aligned}$$

It follows from the equality  $\underline{E}g\{\mathbf{T}\} = -\overline{E}(-g\{\mathbf{T}\})$  that

$$\begin{aligned} \underline{E}g &= \min_{t_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i=1, \dots, n} \underline{E}g\{\mathbf{T}\} = \min_{t_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i=1, \dots, n} (-\overline{E}(-g\{\mathbf{T}\})) \\ &= - \max_{t_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i], i=1, \dots, n} \overline{E}(-g\{\mathbf{T}\}) = -\overline{E}(-g), \end{aligned}$$

The third and fourth properties are similarly proved.

**Example 1.** Suppose three experts provide their judgments about 5%, 50%, and 95% quantiles of a probability distribution of a random variable  $X$  defined on the sample space  $\Omega = \{0, 1, \dots, 100\}$ . Their judgments are given in Table 1. Let us find lower and upper expectations ( $\underline{E}X$ ,  $\overline{E}X$ ) and probability distributions ( $\underline{E}I_{[0, \tau]}(X)$ ,  $\overline{E}I_{[0, \tau]}(X)$ ,  $\tau \in \Omega$ ) of the random variable  $X$ . By using Proposition 2, we get  $\underline{E}X = 34.2$ ,  $\overline{E}X = 77.25$ . The lower  $\underline{F}(x)$  and upper  $\overline{F}(x)$  probability distributions are depicted in Fig.2.

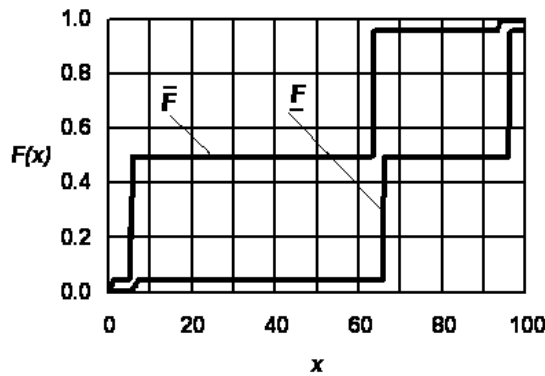


Fig. 2. Lower and upper probability distributions elicited from three experts

Table 1. Expert judgments about 5%, 50%, and 95% quantiles (L-lower, U-upper)

Expert	Quantiles					
	5%		50%		95%	
1		0	4	0	5	5
2			2	0	6	6
3			8	5	0	5

It is interesting to note that imprecision of results in Example 1 depends mainly on a number of types of quantiles, for which experts provide their judgments. At the same time, a number of experts does not influence significantly on the precision. This fact is illustrated by the following examples.

**Example 2.** Let us add additional judgments about 35% quantile (see Table 2) to the available ones given in Example 1. Then the lower and upper expectations of  $X$  are  $\underline{E}X = 37.8$ ,  $\bar{E}X = 67.95$ . The lower  $\underline{F}(x)$  and upper  $\bar{F}(x)$  probability distributions are depicted in Fig. 3.

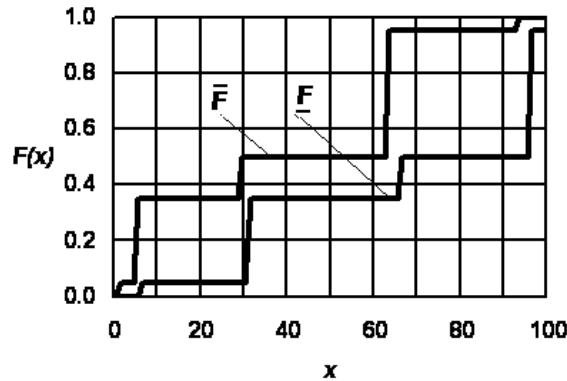


Fig. 3. Lower and upper probability distributions by additional judgments

It can be seen from Example 2 that the imprecision of obtained results is significantly reduced in comparison with results of Example 1.

**Example 3.** Let us add additional judgments elicited from the fourth expert about 5%, 50%, and 95% quantiles (see Table 3) to the available judgments given in Example 1. Then the lower and upper expectations of  $X$  are  $\underline{E}X = 34.75$ ,  $\bar{E}X = 75.9$ . The lower  $\underline{F}(x)$  and upper  $\bar{F}(x)$  probability distributions are almost the same as ones depicted in Fig.2.

Table 2. Additional expert judgments about 35% quantile (L-lower, U-upper)

Expert	Quantiles	
	35%	
	L	U
1	26	40
2	20	34
3	28	35

Table 3. Additional expert judgements about 5%, 50%, and 95% quantiles (L-lower, U-upper)

Expert	Quantiles					
	5%		50%		95%	
	L	U	L	U	L	U
4	5	6	60	63	92	94

Example 3 shows that the fourth expert does not reduce the available imprecision essentially, but, in any case, it was reduced. The following proposition states this fact.

**Proposition 5.** The lower bound  $\underline{E}g$  does not decrease and the upper bound  $\overline{E}g$  does not increase by adding arbitrary non-conflicting judgments.

**Proof:** Let us consider expressions (11)-(12). Suppose that the function  $g$  is non-decreasing. The increasing of the lower bound is obvious. Therefore, we prove the decreasing of the upper bound. Suppose that we get an additional  $(n+1)$ -th judgment  $\Pr\{X \leq [\underline{x}_{n+1}, \overline{x}_{n+1}]\} = q_{n+1}$ . Without loss of generality, we assume that  $q_{n+1} \geq q_n$ . Let  $\overline{E}^{(n)}g$  and  $\overline{E}^{(n+1)}g$  be upper previsions obtained by the given  $n$  and  $n+1$  judgments, respectively. Then

$$\begin{aligned} \overline{E}^{(n)}g - \overline{E}^{(n+1)}g &= g(x_N)(1 - q_n) + \sum_{i=1}^n g\left(\min_{k=i, \dots, n} \overline{x}_k\right)(q_i - q_{i-1}) \\ &\quad - g(x_N)(1 - q_{n+1}) - \sum_{i=1}^{n+1} g\left(\min_{k=i, \dots, n+1} \overline{x}_k\right)(q_i - q_{i-1}) \\ &= \left(g(x_N) - g(\overline{x}_{n+1})\right)(q_{n+1} - q_n) \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \left(g\left(\min_{k=i, \dots, n} \overline{x}_k\right) - g\left(\min_{k=i, \dots, n+1} \overline{x}_k\right)\right) \times (q_i - q_{i-1}) \geq 0, \end{aligned}$$

because the inequalities  $\min_{k=i, \dots, n} \overline{x}_k \geq \min_{k=i, \dots, n+1} \overline{x}_k$ ,  $q_i \geq q_{i-1}$ , and  $x_N \geq \overline{x}_{n+1}$  are valid. This implies that  $\overline{E}^{(n)}g \geq \overline{E}^{(n+1)}g$ , as was to be proved. The proof for the non-decreasing function  $g$  is similar.

## 5. Conclusion

The first-order model of aggregating expert judgments about imprecise quantiles has been proposed in the paper. The main virtue of the model is that it does not use information about a probability distribution of the considered random variable. Of course, this feature leads to imprecise results which are represented in the form of intervals of previsions. At the same time, the risk of possible errors in this case is reduced. The proposed model reflects the fact that expert judgments are imprecise and unreliable in nature.

It is worth noticing that most obtained expressions for the first-order model are given in the explicit form and they do not depend on the sample space of the considered random variable. Moreover, they are identical for continuous and discrete random variables.

## 6. References

1. Ayyub, B. Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks / CRC Press, 2001
2. Berger, J. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis / Springer-Verlag, New York, 1985.
3. Cook, R. Experts in Uncertainty. Opinion and Subjective Probability in Science / Oxford University Press, New York, 1991.
4. Dubois, D., Kalfsbeek, H. Elicitation, assessment and pooling of expert judgement using possibility theory // Proc. of the 8th Inter. Congress of Cybernetics and Systems / New Jersey Institute of Technology Press, Newark, NJ. Pp. 360–367, 1990.
5. Genest, C., Zidek, J. Combining probability distributions: A critique and an annotated bibliography // Statistical Science 1. Pp. 114–148, 1986.
6. Gurov, S.V., Utkin, L.V. Reliability of Systems under Incomplete Information // Lubavich Publ.: Saint Petersburg, Russian, 1999.
7. Kozine, I., Utkin, L.V. Processing unreliable judgements with an imprecise hierarchical model // Risk Decision and Policy, V. 7(3). Pp. 325–339, 2002.
8. Kuznetsov, V. P. Interval Statistical Models // Radio and Communication: Moscow, Russian, 1991.
9. Morris, P. Combining expert judgements, a Bayesian approach // Management Science, V.23. Pp. 679–692, 1977.
10. Mosleh, A., Apostolakis, G. Models for the use of expert opinions // Low Probability /

High Consequence Risk Analysis, Plenum Press, New York, 1984.

11. Sandri, S., Dubois, D., Kalfsbeek, H. Elicitation, assessment and pooling of expert // Technical Report IRIT/93-24-R, IRIT, Univ. P. Sabatier, Toulouse, France, 1993.
12. Utkin, L.V., Gurov, S. Imprecise reliability of general structures // Knowledge and Information Systems, V.1(4). Pp. 459–480, 1999.
13. Utkin, L.V., Gurov, S. New reliability models based on imprecise probabilities // Advanced Signal Processing Technology, World Scientific, chapter 6. Pp. 110–139, 2001.
14. Walley, P. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities / Chapman and Hall, London, 1991.
15. Weichselberger, K. The theory of interval-probability as a unifying concept for uncertainty // International Journal of Approximate Reasoning, V. 24. Pp. 149–170, 2000.
16. Winkler, R. The consensus of subjective probability distributions // Management Science, V.15. Pp. 61–75, 1968.
17. Winkler, R. Combining forecasts: A philosophical basis and some current issues // International Journal of Forecasting, V. 5. Pp. 605–609, 1989.