



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:  
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3—2012 (март)

Учредитель журнала  
Общество с ограниченной  
ответственностью  
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

#### Редакционный совет

- А.В. Царегородцев** — д.т.н., профессор Всероссийской государственной налоговой академии Минфина РФ  
**Ю.Б. Миндлин** — к.э.н., доцент Всероссийской государственной налоговой академии Минфина РФ  
**М.М. Безрукова** — д.б.н., профессор, директор Института возрастной физиологии РАО  
**Н.Н. Грачев** — профессор Московского государственного института электроники и математики (технический университет), доктор высшей степени в области технических наук (Doctor Habilitatus)  
**А.И. Гусева** — д.т.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"  
**А.Я. Качанов** — д.воен.н., профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)  
**Е.Ю. Клименко** — д.ф.-м.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"  
**С.М. Надежкин** — д.б.н., профессор Всероссийского НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии  
**Б.А. Прудковский** — д.т.н., профессор, эксперт по высшему образованию группы компаний "ИНТЕРСЕРТИФИКА"  
**С.Э. Саркисов** — д.м.н., профессор Научного центра акушерства, гинекологии и перинатологии  
**В.В. Сергиевский** — д.х.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"  
**А.П. Симоненков** — д.м.н., профессор Института хирургии им. Вишневского РАМН

Издатель: Общество с ограниченной ответственностью  
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:  
109443, Москва,  
Волгоградский пр-т, 116–1–10  
Тел/факс: 8(495) 755–1913  
E-mail: redaktor@nauteh-journal.ru  
http://www.nauteh-journal.ru  
http://www.vipstd.ru/nauteh

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору  
в сфере массовых коммуникаций, связи  
и охраны культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС 77–44912 от 04.05.2011 г.

© Современная наука:  
Актуальные проблемы теории и практики

Scientific and practical journal



В НОМЕРЕ:

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ  
СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ  
РАДИОТЕХНИКА  
МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,  
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ,  
ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАТИКИ  
ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ,  
ГИДРОХИМИЯ

Журнал издается с 2011 года

Редакция:  
Главный редактор  
**А.В. Царегородцев**  
Выпускающий редактор  
**Ю.Б. Миндлин**  
Верстка  
**Д.М. Замятин**

Подписной индекс издания  
в каталоге агентства "Почта России" — 80016

В течение года можно произвести подписку  
на журнал непосредственно в редакции

Авторы статей  
несут полную ответственность за точность  
приведенных сведений, данных и дат

При перепечатке ссылка на журнал  
«Современная наука: Актуальные проблемы  
теории и практики» обязательна

Журнал отпечатан в типографии  
ООО "КОПИ-ПРИНТ"  
тел./факс: (495) 973–8296  
Подписано в печать 12.04.2012 г.  
Формат 84×108 1/16  
Печать цифровая  
Заказ № 0000  
Тираж 2000 экз.

# СОДЕРЖАНИЕ

# CONTENTS

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

**Д.Х. Базиев**

Свойства жидкого гелия в рамках единой теории физики.  
*D. Baziev – The properties of liquid helium in a unified theory of physics* ..... 3

## МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ

**А.А. Паранук**

Оптимизация расхода метанола при проведении расчетов многофазных углеводородных систем.  
*A. Paranuk – Cost optimization methanol for calculation Multiphase hydrocarbon systems* ..... 20

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

**И.В. Балабанов**

Анализ состояния с обеспечением качества систем подвижной связи.  
*I. Balabanov – State of telecommunications systems with quality supply analyze* ..... 27

## РАДИОТЕХНИКА

**Н.Н. Грачев, Д.В. Лазарев**

Вопросы оптимизации проектирования РЭС с учетом ЭМС.  
*N. Grachev, D. Lazarev – Questions of optimization of design with regard to EMC of RED* ..... 31

**Н.Н. Грачев, Д.В. Лазарев**

Методический аппарат оценки электромагнитной совместимости радиосвязных средств объектов морской инфраструктуры.  
*N. Grachev, D. Lazarev – Analytical technique of an estimation of electromagnetic compatibility of radio communication means of sea vessel on the basis of the skilled-theoretical approach*..... 40

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**А.В. Царегородцев**

Обеспечение безопасности процессов обработки данных в среде облачных вычислений.  
*A. Tsaregorodtsev – Security of data processing in the cloud computing* ..... 47

**И.В. Яхонтов**

Анализ моделей систем защиты информации на основе модифицированных сетей Петри.  
*I. Yakhontov – The analysis of models of information protection systems on the base of modified Petri networks*..... 57

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ, ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ИНФОРМАТИКИ

**И.С. Фофанов**

Процессный подход к оценке экономической эффективности внедрения информационных технологий.  
*I. Fofanov – The process approach to assessing the cost-effectiveness of it adoption*..... 66

## ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ГИДРОХИМИЯ

**Ю.П. Москвин**

Определение слоев стока весеннего половодья на реках полуострова Ямал.  
*I. Moskvina – Determination of spring flood layers in rivers of the Yamal peninsula* ..... 74

**Ю.П. Москвин**

Особенности снегонакопления в русловой сети малых рек и оврагов Крайнего Севера Западной Сибири и условия формирования максимального стока.  
*I. Moskvina – Characteristics of snow accumulation in channel network of small rivers and ravines of the far north of Western Siberia and conditions of maximum flow formation* ..... 79

**Ю.П. Москвин**

Расчет глубины оттаивания и влагосодержания талого слоя торфяной залежи на полигональных болотах.  
*I. Moskvina – Calculation of thawing depth and moisture content of the thawed layer of peat deposit in polygonal bogs*..... 87

**Ю.П. Москвин**

Радиационный баланс и испарение с полигональных болот Западной Сибири.  
*I. Moskvina – Radiation balance and evaporation from polygonal bogs of Western Siberia*..... 92

## ИНФОРМАЦИЯ

Требования к оформлению рукописей статей, направляемых для публикации в журнале ..... 98

№ 3-2012 (март)

CONTENTS

## СВОЙСТВА ЖИДКОГО ГЕЛИЯ В РАМКАХ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ФИЗИКИ

**Базиев Джабраил Харунович,**

ЗАО «УК Световит»

01.04.03

dbaziev@mail.ru

**Аннотация.** В 1911 году голландскому исследователю Г. Камерлинг-Онессу впервые удалось получить жидкий гелий, и с этого времени он стал центральным объектом в изучении процессов, происходящих при низких температурах. К середине XX века, ученые пришли к выводу, что жидкий гелий при температуре  $T_{\lambda}=2,17\text{K}$  претерпевает фазовый переход 2-го рода и в этом состоянии он становится сверхтекучей и сверхпроводящей жидкостью.

Данная статья посвящена анализу физических свойств жидкого гелия в рамках единой теории физики (ETF) и показано, что криофизики недостаточно разобрались в свойствах этого газа.

**Ключевые слова:** жидкий гелий, свойства, физика, криофизика.

## THE PROPERTIES OF LIQUID HELIUM IN A UNIFIED THEORY OF PHYSICS

**Baziev Djabrail Harunovich**

CJSC «Management company Svetovit»

**Abstract.** In 1911, a Dutch researcher H. Kamerlingh Onessu first time succeeded in liquid helium, and from that time he became a central subject in the study of processes occurring at low temperatures. By the mid-twentieth century, scientists have concluded that liquid helium at a temperature of  $T_{\lambda}=2,17\text{K}$  undergoes a phase transition of the 2nd kind and in this state it becomes a superfluid and superconducting fluid.

This article analyzes the physical properties of liquid helium in the framework of a unified theory of physics (ETF) and show that krioфизики not figured out the properties of the gas.

**Key words:** liquid helium, properties, physics, krioфизика.

### Введение

**Б**ез ущерба для полноты освещения рассматриваемого вопроса и с целью демонстрации его состояния на текущий момент в рамках официальной теории физики, я привожу сведения из обзорной статьи Г.Е.Валовика, опубликованной в физической энциклопедии [1] «Жидкий  $^4\text{He}$ -бозе жидкость, так как его атомы – бозоны; их спин равен нулю, они подчиняются Бозе -Эйнштейна статистике, жидкий  $^3\text{He}$ , состоящий из фермионов – атомов со спином  $1/2$ , подчиняющихся Ферми -Дирака статистике, является ферми-жидкостью.

С понижением температуры до  $T_{\lambda} = 2,17\text{K}$  жидкий  $^4\text{He}$  испытывает фазовый переход 2-го рода, новую фазу называют гелий-2. Гелий-2 обладает аномально высокой теплопроводностью и сверхтекучестью. Согласно теории сверхтекучести, созданной Л.Д. Ландау, гелий-2 состоит из двух компонентов: нормального и сверхтекучего.

Сверхтекучий компонент – идеальная жидкость с потенциальным течением – не обладает энтропией и не испытывает сопротивления при протекании сквозь узкие капилляры».

Обращаю внимание читателя на последнюю фразу из приведенной цитаты, утверждающей, что гелий-2 лишен трения и, стало быть, его вязкость  $\eta = 0$ .

Я предлагаю читателю анализ свойств гелия, базируясь на законах новой теории физики, которую мне удалось разработать и изложить в книге «Основы единой теории физики» [2], при этом прошу читателя проявить терпение и интерес к обсуждаемой проблеме и постараться вникнуть в суть излагаемого мною материала, описываемого фактически на новом научном языке, кажущемся физикам старой школы ошибочным. Помните, все новое дается с трудом, даже одаренным людям. Если вам удастся преодолеть самого себя и изучить данную работу, то вы войдете в новый, прекрас-

ный микромир, о существовании которого и не догадывались.

## §1. Гиперчастотные параметры гелия-1 при $T_1 = 4\text{ К}$

### 1.1. Свойство пара насыщения

Исходные данные для анализа:

$A_0 = 4$  э.а. – атомное число гелия, атом состоит из четырех элементарных атомов, э.а.,

$A = 4,002602$  э.а. – атомный вес по Международной таблице элементов 1987 г.,

$m = A \cdot m_u = 6,6460080314 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – масса атома,

$m_u = 1/2^{12} C = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – масса элементарного атома, составляющего основу таблицы Менделеева,

$m_u = n_e \cdot m_e + n_\epsilon \cdot m_\epsilon = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ , где

$n_e = 3$  – число электронов в составе элементарного атома,

$n_\epsilon = 2,41819886768 \cdot 10^8$  – число электронов в составе эл.атома,

$m_e = 9,038487 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса электрона, уточненное значение,

$m_\epsilon = 6,85575729963 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$  – масса электрино,

$\rho_1^{\text{жк}} = 128,981992597 \text{ кг/м}^3$  – плотность жидкой фазы, уточненное значение, принятое = 129 кг/м<sup>3</sup>,

$P_1^{\text{п}} = 7 \cdot 10^4 \text{ Па} = \text{Дж/м}^3$  – давление насыщенного пара, состоящего из атомов гелия,

$c_{p1}^{\text{жк}} = 3990,0 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$  – удельная теплоемкость жидкой фазы,

$\lambda_1 = 0,027 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  – теплопроводность жидкой фазы.

Результаты анализа

$$\rho_1 = 12,1977514774 \text{ кг/м}^3 \quad (1)$$

– плотность газообразного гелия при охлаждении до  $T_1 = 4\text{ К}$ ,

$$\gamma_1^{\text{жк}} = \rho_1^{\text{жк}} / \rho_1 = 10,5742433624 \quad (2)$$

– коэффициент конденсации газа в жидкую фазу.

Из результата (2) следует, что жидкий гелий-1 состоит из структурных элементов первого порядка, образованных из  $\gamma_1^{\text{жк}}$  атомов гелия, структурных элементов 2-го порядка. По своей физической сути структурные элементы 1-го порядка являются мо-

нокристаллами, как и у всех остальных жидкостей. Например, монокристалл воды, именуемый также суперосциллятором, состоит из 3761 молекул  $\text{H}_2\text{O}$ .

$$\rho_1^{\text{п}} = \frac{P_1^{\text{п}} \cdot \rho_1^{\text{жк}}}{P_0 \cdot \gamma_1^{\text{жк}}} = \frac{9,02873948179 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг/м}^6}{1,07143520869 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3} = 8,42677131436 \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

– плотность насыщенного пара над жидкой фазой,

$$V_{g1}^{\text{п}} = m_{He} / \rho_1^{\text{п}} = \frac{6,64576158818 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{\rho_1^{\text{п}}} = 7,8864862238 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 \quad (4)$$

– объем глобулы пара, индивидуальное пространство атома, где

$m_{He} = 6,64576158818 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – уточненное значение массы атома гелия, вывод приводится ниже,

$$d_{g1}^{\text{п}} = \sqrt[3]{6V_{g1}^{\text{п}} / \pi} = \sqrt[3]{15,0620791936 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3} = 2,46960962396 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (5)$$

– диаметр глобулы пара,

$$\epsilon_1^{\text{п}} = V_{g1}^{\text{п}} \cdot P_1^{\text{п}} = 5,52054035666 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} \quad (6)$$

– энергия атома пара,

$$f_1^{\text{п}} = \epsilon_1^{\text{п}} / h = 8,33129639995 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \quad (7)$$

– частота атомов пара,

$$T_1^{\text{п}} = f_1^{\text{п}} / \psi_{He} = 40,0 \text{ К} \quad (8)$$

– температура пара, где

$$h = m_\epsilon \cdot \mu \cdot \sqrt[3]{4\pi/3} / 2 = 6,6262681 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с} = \text{const} \quad (9)$$

– постоянная Планка, абсолютное значение,

$$\psi_{He} = 2,0828241 \cdot 10^{10} \text{ К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} = \text{const} \quad (10)$$

– частотная постоянная гелия,

$$\mu = 119,916984 \text{ м}^2 / \text{с} = \text{const} \quad (11)$$

– постоянная Милликена, названа мною в честь Роберта Милликена, тонким опытом измерившего заряд электрона.

Обращаю внимание читателя на результат (8), из которого следует, что температура пара над жидкой фазой, с которой пар находится в динамическом равновесии, превышает температуру жидкой фазы в 10 раз!

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1^{\text{п}} = \epsilon_1^{\text{п}} / T_1^{\text{п}} = 1,38013508917 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = \text{const} \\ k_{He} = \epsilon_0 / T_0 = \frac{377,29226057 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{273,373428103 \text{ К}} = 1,38013508917 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = \text{const} \end{array} \right. \quad (12)$$

$T_0 = 1 / \beta_{He} = 1 / 3,658 \cdot 10^{-3} K^{-1} = 273,373428103K$  (13)  
– термодинамическая температура газообразного гелия,

$$\varepsilon_0 = k_{He} \cdot T_{0He} = 3,7729226057 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \quad (14)$$

– энергия атомов гелия при  $T_0 = 273,373K$  и  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ .

Из равенства  $k_{He}$  и  $k_1^{II}$  следует, что пар над жидкой фазой гелия-1 действительно состоит из атомов, как и газ при  $P_0$  и  $T_0$ .

Теперь чтобы установить скорость движения атомов пара нам необходимо найти амплитуду колебания атомов,  $A_1^{II}$ , которая близка к диаметру глобулы  $d_{g1}^{II}$ , но не равна ему:

$$A_1^{II} = \frac{2m_{He} \cdot d_g^{II} \cdot a \cdot f_1^2 + \sqrt{4m_{He}^2 \cdot d_g^2 \cdot a^2 \cdot f_1^4 - 8 \cdot m_{He} \cdot \varepsilon_1^{II} \cdot f_1^2}}{4m_{He} \cdot a \cdot f_1^{II^2}} =$$

$$= \frac{3,67326051908 \cdot 10^{-11} + 3,63169997393 \cdot 10^{-11}}{2,97477003462 \cdot 10^{-2}} =$$

$$= 2,45563872433 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (15)$$

$$v_1^{II} = 2f_1^{II} \cdot A_1^{II} = 4,09173081271 \cdot 10^3 \text{ м/с} \quad (16)$$

– линейная скорость атомов пара в координатах глобулы,

$$i_1^{II} = m_{He} \cdot v_1^{II} = 2,71926674642 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с} \quad (17)$$

– импульс атома,

$$u_1^{II} = \varepsilon_1^{II} / i_1^{II} \cdot a = 12,5940933333 \text{ м/с} \quad (18)$$

– скорость блуждания атомов пара,

$$a = \sqrt[3]{4\pi / 3} = 1,61199195402 \text{ рад},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \alpha_1 = u_1 / v_1 = 0,00307793789 - \text{синус углового шага атома,} \\ \alpha_1^{II} = 0^\circ 10' 20'' - \text{угловой шаг атома за период,} \end{array} \right. \quad (19)$$

$$H_1^{II} = \sin \alpha_1^{II} \cdot A_1^{II} = 7,55830347 \cdot 10^{-12} \text{ м} \quad (20)$$

– линейный шаг атома пара за один период,

$$u_1^{II} = 2H_1 \cdot f_1^{II} = 12,5940933 \text{ м/с} \quad (21)$$

– физическое содержание скорости блуждания атома пара,

$$r_c^{II} = \frac{\hbar}{i_1^{II}} = 1,51166070686 \cdot 10^{-11} \text{ м} \quad (22)$$

– расстояние критического сближения пары атомов пара, когда происходит излучение электрино и во взаимодействии участвует постоянная Планка, где

$$\hbar = h / a = h / \sqrt[3]{4\pi / 3} =$$

$$= 4,11060869204 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с} = \text{const} \quad (23)$$

– постоянная Герца, названа мною в честь Генриха Герца, заложившего начало частотным явлениям в электро- и радиотехнике.

## 1.2. Свойства жидкого гелия

$$m_\mu = \gamma^{\text{жк}} \cdot m_{He} = 7,02739003619 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \quad (24)$$

– масса монокристалла жидкой фазы,

$$V_{g1} = m_\mu / \rho_1^{\text{жк}} = 5,44834972281 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 \quad (25)$$

– объем глобулы суперосциллятора,

$$d_{g1} = \sqrt[3]{6V_{g1} / \pi} = \sqrt[3]{1,04055814809 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3} =$$

$$= 1,01334061916 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (26)$$

– диаметр глобулы суперосциллятора;

Если нам допустить, что в жидкой фазе царит такое же давление, как в паровой данной термодинамической системы, то энергия монокристалла определится, как и в (6), произведением давления на объем глобулы:

$$E^I = V_{g1} \cdot P_1^{II} = 3,81384480596 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}, \quad (27)$$

и если наше допущение справедливо, то по  $E^I$  мы должны получить для жидкой фазы  $T_1 = 4K$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1^I = E^I / h = 5,75564518127 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \\ T_1^I = f_1^I / \psi_{He} = 2,763385 \text{ К} \neq T_1 \end{array} \right. \quad (28)$$

Как видим, результат (28) свидетельствуют в пользу того, что во взаимодействии монокристаллов постоянная Планка не принимает участия, т.е. гелий-1 является антиквантовой жидкостью!!! И это происходит уже при  $T_1 = 4K$ , вдали от  $\lambda$ - точки, в которой гелий-1 переходит в гелий-2!!! А подлинная энергия суперосциллятора определяется на основе теплоемкости гелия-1,  $E_\mu$ :

$$E_\mu = m_\mu \cdot c_p^{\text{жк}} \cdot T_1 = 11,2157144977 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} \quad (29)$$

А теперь допустим, что мы знаем атомное число гелия  $A_0 = 4$ , но не знаем его атомного веса. Тогда справедливо исходить из  $m_0 = A_0 \cdot m_u = 6,64228 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – масса атома до уточнения атомного веса. При этом справедливы следующие соотношения:

$$m'_\mu = \gamma^{\text{жк}} \cdot m_0 = 7,02370852012 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E'_\mu = c_p^{\text{жк}} \cdot m'_\mu \cdot T_1 = 11,209838387981 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}, \\ E'_\mu = \alpha \cdot Z_{He}^2 \cdot \gamma^{\text{жк}}, \end{array} \right. \quad (31)$$

где  $Z_{He}$  – избыточный положительный заряд атома гелия, который предстоит установить,

$$\alpha = 1,04044721942 \cdot 10^{20} \text{ Дж} / \text{ Кл}^2 = \text{const}$$

– электродинамическая постоянная единой теории физики (ЕТФ).

Решая систему (31) из двух уравнений относительно  $Z_{He}$  найдем:

$$\begin{aligned} Z_{He} &= \sqrt{c_P^{\mathcal{K}} \cdot m_{\mu}^{\prime} \cdot T_1 / \alpha \cdot \gamma^{\mathcal{K}}} = \\ &= \sqrt{1,01889636321 \cdot 10^{-42} \text{ Кл}^2} = \\ &= 1,00940396433 \cdot 10^{-21} \text{ Кл} \end{aligned} \quad (32)$$

– избыточный заряд атома гелия,

$$\Delta n_e = Z_{He} / \varepsilon = 5,07834223235 \cdot 10^5 \quad (33)$$

– избыточное число электронов в составе атома гелия,

$$\Delta m = \Delta n_e \cdot m_e = 3,48158818294 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \quad (34)$$

– избыточная масса атома гелия относительно  $m_0$ ,

$$m_{He} = m_0 + \Delta m = 6,64576158818 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = \text{const} \quad (35)$$

– точное значение массы атома гелия,

$$A_{He} = m_{He} / m_u = 4,00209662235 \text{ э.а.} \quad (36)$$

– атомный вес гелия, точное значение, где

$$\varepsilon = 1,98766431671 \cdot 10^{-27} \text{ Кл} = \text{const} \quad (37)$$

– заряд электронов,

Контроль:

$$m_u = \gamma^{\mathcal{K}} \cdot m_{He} = 7,02739003619 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \quad (38)$$

Вот только теперь природа гелия-1 становится понятной и ее можно точно описать безо всяких спекуляций. Во-первых, ввиду неучастия электронов во взаимодействиях между монокристаллами, у монокристаллов отсутствует вращение вокруг своей оси и каждый из них имеет строгую ориентацию в пространстве, но при этом монокристалл находится в непрерывном нулевом колебании совершенно аналогично атому кристалла золота или алмаза, т.е. гелий-1 является жидким кристаллом!

Во-вторых, каждый монокристалл занимает геометрический центр в своей глобуле и находится в напряжении взаимного отталкивания между ближайшим окружением, образованным шестью монокристаллами, ввиду наличия у каждого из них суммарного положительного заряда,  $Z_{\mu}$ :

$$Z_{\mu} = \gamma^{\mathcal{K}} \cdot Z_{He} = 10,6736831697 \cdot 10^{-21} \text{ Кл} \quad (39)$$

В-третьих, каждый монокристалл обладает системой электронных полей, по 12 на каждый атом, и

эти отрицательные поля, замыкая на положительные поля соседних монокристаллов, развивают силу взаимного сближения между ними.

В-четвертых, силы взаимного сближения суперосцилляторов превалируют над силами взаимного отталкивания и только поэтому, хотя и с большим трудом, но все же газообразный гелий переходит в жидкую фазу и существует в этом состоянии.

$$f_1 = \psi_{He} \cdot T_1 = 8,3312964 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \quad (40)$$

– частота нулевого колебания монокристаллов,

$$\begin{aligned} f_1^{\prime} &= E_{\mu} / h = \frac{11,2157144977 \cdot 10^{-22}}{6,6262681 \cdot 10^{-34}} = \\ &= 1,692614052 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \end{aligned} \quad (41)$$

Результат (41), не сходящийся с (40) еще раз подтверждает нам, что постоянная Планка не участвует во взаимодействиях между монокристаллами.

Развернув удельную теплоемкость гелия-1, на уровне одного монокристалла получим:

$$c_P^{\mathcal{K}} = \frac{m_{\mu} \cdot v_1 \cdot u_1}{m_{\mu} \cdot T_1} = \frac{v_1 \cdot u_1}{T_1}, \text{ м}^2 / \text{ с}^2 \cdot \text{ К} \quad (42)$$

$$v_1 \cdot u_1 = c_P^{\mathcal{K}} \cdot T_1 = 15960 \text{ м}^2 / \text{ с}^2 \quad (43)$$

– произведение линейной скорости монокристалла на скорость блуждания, а с учетом того, что область частотного пребывания монокристалла в центре своей глобулы представляет собой сферу, (43) приобретает вид:

$$v_1 \cdot u_1 \cdot a = c_P^{\mathcal{K}} \cdot T_1,$$

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{c_P^{\mathcal{K}} \cdot T_1 / a} = \sqrt{9900,79383473 \text{ м}^2 / \text{ с}^2} = \\ &= 99,5027328003 \text{ м/с} \end{aligned} \quad (44)$$

– скорость блуждания монокристалла,

$$v_1 = a \cdot u_1 = 160,397604677 \text{ м/с}$$

– линейная скорость монокристалла в координатах глобулы,

Контроль:

$$E_{\mu} = m_{\mu} \cdot v_1 \cdot u_1 = 11,2157144977 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} = (29) \quad (45)$$

Амплитуда нулевого колебания монокристаллов,  $A_{\mu}$ , оказалась в более сложной зависимости от частоты, чем у атомов газообразного гелия и имеет решение:

$$A_{\mu} = \frac{v_1}{8\pi f_1} = 7,6602939142 \cdot 10^{-11} \text{ м}, \quad (45.1)$$

она же является диаметром области частотного пребывания монокристалла, объем которой составляет  $\Delta V_{g1}$ :

$$\Delta V_{g1} = \pi A_1^3 / 6 = 2,35361228303 \cdot 10^{-31} \text{ м}^3 = 0,000431986 \cdot V_{g1} \quad (46)$$

$$r_1 = d_{g1} - A_1 = 9,3673768002 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,924405 \cdot d_{g1} \quad (47)$$

– ширина канала между монокристаллами в жидкокристаллической структуре гелия-1.

Из (46) и (47) следует, что в своем частотном движении монокристаллы занимают лишь 0,043% от объема глобулы, а пространство между монокристаллами занимает 99,957%, что свидетельствует о значительности сил взаимного отталкивания между монокристаллами и о том, что жидкое состояние гелия при  $T_1 = 4\text{К}$  малоустойчиво под давлением лишь собственного пара.

$$\sin \alpha_1 = u_1 / v_1 = 0,620350491, \quad (48)$$

$$\alpha_1 = 38^\circ 20' 30'', \quad (49)$$

$$H_1 = \sin \alpha_1 \cdot A_1 = 4,75082216828 \cdot 10^{-11} \text{ м}, \quad (50)$$

$$u_1 = 2H_1 \cdot 4\pi \cdot f_1 = 99,476 \text{ м/с}. \quad (51)$$

Подводя итог анализу гелия-1 можем утверждать следующее:

1. Гелий-1 является жидким кристаллом, а структурными элементами первого порядка выступают монокристаллы с коэффициентом конденсации  $\gamma^{\text{ж}} = 10,547$ .

2. Взаимодействие между монокристаллами осуществляется без участия постоянной Планка и гелий-1, стало быть, является некантовой жидкостью.

3. Взаимодействие между монокристаллами осуществляется только упруго, дистанционно и базируется на взаимодействии электрических полей, что обуславливает минимизацию трения в системе.

4. Несмотря на то, что монокристаллы находятся под напряжением взаимного отталкивания, ввиду наличия у них избыточного положительного заряда, напряжение взаимного сближения между ними является преваляющим на достигнутых расстояниях между ними в жидкой фазе, при охлаждении до  $T_1 = 4\text{К}$ .

### 1.3. Прочность монокристалла гелия-1

$$P_1^{\text{ж}} = \frac{\alpha \cdot Z_{\text{He}}^2 \cdot \gamma^{\text{ж}}}{V_{g1}} = \frac{-11,2157144977 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}}{5,44834947692 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3} = -2,05855269474 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (52)$$

– давление в глобуле равно давлению в жидкой фазе,

$$V_{\mu 1} = \frac{E_{\mu} - \varepsilon_{\mu}^{\text{II}}}{P_1^{\text{ж}}} = \frac{-5,6951741411 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}}{P_1^{\text{ж}}} = 2,76659138027 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 \quad (53)$$

– собственный объем монокристалла гелия,

$$a_1 = \sqrt[3]{V_{\mu 1}} = \sqrt[3]{276,659138027 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} = 6,51600896512 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (54)$$

– длина ребра монокристалла кубической формы,

$$S_1 = a_1^2 = 4,24583728335 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2 \quad (55)$$

– площадь грани монокристалла,

$$V_0 = V_{\mu} / \gamma^{\text{ж}} = 2,6163492606 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3 \quad (56)$$

– объем элементарной ячейки в составе монокристалла,

$$a_0 = \sqrt[3]{26,163492606 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} = 2,96869268476 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (57)$$

– длина ребра элементарной ячейки,

$$S_0 = a_0^2 = 8,81313613779 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \quad (58)$$

– площадь грани элементарной ячейки.

Очевидно, давление  $P_1^{\text{ж}}$  свойственно и элементарным ячейкам монокристалла, поэтому для решения поставленной задачи нам следует перейти на уровень атомов гелия в монокристалле, на уровень структурных элементов 2-го порядка. Напомню читателю, что нам достаточно поднять температуру гелия-1 от  $T_1 = 4\text{К}$  до  $T = 4,22\text{К}$ , как тут же начнется кипение с образованием пузырьков по всему объему жидкости. Т.е. сравнительно устойчивое состояние гелия-1, при  $T_1 = 4\text{К}$ , отделяет его от точки кипения, разница температур всего лишь в  $k = 4,22 / 4,0 = 1,055 \text{ раз}$ .

В рамках ЕТФ установлено, что кипение жидкости есть ни что иное как деструкция монокристаллов с переходом структурных элементов 2-го порядка в газопаровую фазу [2]. При этом также установлено, что распад монокристаллов начинается с момента достижения равенства полярных напряжений, выра-

жаемый количественно коэффициентом полярных напряжений,  $n_p$ , согласно уравнению:

$$n_p = \frac{P_1}{(P_2 + P_3)} = -1, \text{ где} \quad (58)$$

$P_1$  – напряжение взаимного притяжения атомов в кристалле, оно имеет отрицательный знак ввиду того, что энергия взаимного притяжения основана на взаимодействии отрицательных полей с положительными,

$P_2$  – напряжение взаимного отталкивания,  $P_3$  – механическое напряжение, формируемое частотой и скоростью движения атома в координатах элементарной ячейки. Это напряжение, как и  $P_2$  является положительным и его развитие работает на разрыв кристалла изнутри. При этом  $P_2$  мало зависит от температуры, тогда как  $P_3$  тесно с ней связано. Для гелия-1, при  $T_1 = 4K$  уравнение (58) приобретает вид:

$$P_1 = n_p(P_2 + P_3), \text{ где } n_p = -1,055 \quad (59)$$

Рассчитаем каждое из этих напряжений для элементарной ячейки монокристалла гелия:

$$\varepsilon_0 = E_\mu / \gamma^{\text{ж}} = 1,06066354946 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} \quad (60)$$

– энергия атома гелия в составе монокристалла,

$$k_0 = \varepsilon_0 / T_1 = 2,65165887365 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / K \quad (61)$$

– постоянная Больцмана для гелия-1,

$$q = n_e \cdot A_0 \cdot \Delta q_\lambda = -4,7125763457 \cdot 10^{-20} \text{ Кл} \quad (62)$$

– суммарный отрицательный заряд электронных полей атома гелия, где

$$\Delta q_\lambda = -3,92714695476 \cdot 10^{-21} \text{ Кл} = \text{const} \quad (63)$$

– заряд одного электронного поля,  $A_0 = 4$  – атомное число гелия,  $n_e = 3$ ;

$$E_q = E_1 = \alpha \cdot q \cdot z_\lambda \cdot \gamma^{\text{ж}} = -5,47300578978 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \quad (64)$$

– энергия взаимного сближения атома в составе монокристалла,

$$z_\lambda = 1,055559701471 \cdot 10^{-24} \text{ Кл} = \text{const} \quad (65)$$

– элементарный заряд положительного поля атома,

$$P_1 = \frac{E_1}{V_0} = \frac{-5,47300578973 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{266163492606 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3} = -2,609184831404 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (66)$$

– напряжение взаимного притяжения, испытываемого каждым атомом,

$$E_z = E_2 = n_\lambda \cdot \alpha \cdot z_\lambda^2 \cdot \gamma^{\text{ж}} = 1,47111596271 \cdot 10^{-26} \text{ Дж} \quad (67)$$

– энергия взаимного отталкивания, где  $n_\lambda = n_e \cdot A_0 = 12$  – число электронных полей атома,

$$P_2 = \frac{E_z}{V_0} = 562,278127337 \text{ Па} = \text{Дж} / \text{м}^3 \quad (68)$$

– напряжение взаимного отталкивания, испытываемое каждым атомом в кристалле,

$$P_3 = \frac{\kappa_0 \cdot T_1}{u_\pi \cdot r_0 \cdot a_0^2}, \text{ Па} = \text{Дж} / \text{м}^3 \quad (69)$$

– уравнение механического напряжения кинетической энергией атома  $\varepsilon_0 = \kappa_0 \cdot T_1$ , где  $r_0$  – ширина межатомного канала в монокристалле.

Поскольку значение  $r_0$  еще неизвестно, то нам проще вывести значение  $P_3$  из (59):

$$P_3 = \frac{P_1 - n_p \cdot P_2}{n_p} = \frac{-2,09184831404 \cdot 10^6 - (-1,055 \cdot 562,278127337)}{-1,055} = \frac{-2,09125511062 \cdot 10^6 \text{ Па}}{-1,055} = 1,98223233234 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (70)$$

$$r_0 = \frac{\kappa_0 \cdot T_1}{u_\pi \cdot P_3 \cdot a_0^2} = \frac{10,6066354946 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{2,1953051614 \cdot 10^{-12} \text{ Н}} = 4,83150847594 \cdot 10^{-11} \text{ м} \quad (71)$$

Как известно, модуль упругости кристаллических структур, чаще называемый модулем Юнга, это чисто экспериментальная величина. Но теперь, в рамках ЕТФ, выведено уравнение для модуля Юнга следующего вида:

$$P_i = \frac{E_q}{a_0^3} + \frac{E_z}{a_0^3} + \frac{\kappa_0 \cdot T_i}{4\pi \cdot r_0 \cdot a_0^2}, \text{ Па} = \text{Дж} / \text{м}^3 \quad (72)$$

Поскольку выше мы уже рассчитали значение всех трех членов уравнения, остается только рассчитать модуль Юнга для монокристалла гелия-1,  $P_{\text{He}}$ :

$$P_{\text{He}} = P_1 + P_2 + P_3 = -2,09184831404 \cdot 10^6 + 562,278127337 + 1,98223233234 \cdot 10^6 = -1,0959374342 \cdot 10^5 \text{ Па} \quad (73)$$

Контроль:

$$n_p = \frac{P_1}{(P_2 + P_3)} = \frac{-2,09184831404 \cdot 10^6 \text{ Па}}{1,98279461046 \cdot 10^6 \text{ Па}} = -1,055 \quad (74)$$

Установленное нами значение модуля Юнга для монокристалла гелия является рекордно низким среди известных науке кристаллических структур. Для сравнения приведу модуль Юнга для монокристалла воды при  $P_0$  и  $T = 293K$ :  $P_{\text{H}_2\text{O}} = -2,86 \cdot 10^9 \text{ Па}$  [2].

Вот такова истинная природа жидкого гелия-1, до которой никто не смог добраться в течение последних 100 лет, начиная от первых успехов камерлинг – Оннеса в 1908 году до блестящих экспериментов Капицы в 1937-41 годах и его последователей, продолжающих разрабатывать эту тему по сей день на старой, ни на что не пригодной научной основе.

**§2. Скачок теплоемкости гелия в λ- точке**

**2.1.Динамика теплоемкости между T<sub>1</sub>=4К и T<sub>2</sub>=2,62К**

При исследовании данного вопроса будем опираться на весьма полные сведения Н.Б. Варгафтика [3] по теплоемкости жидкого гелия, а также на справочник «Физические величины» [4].

$c_{p1} = 3990,0 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$  – удельная теплоемкость гелия-1 при T<sub>1</sub>=4К

$c_{p2} = 2277,0 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$  – то же при T<sub>2</sub>=2,62К.

В самом начале работы над этой темой мне бросилось в глаза одно количественное несоответствие, выражающееся в том, что разность температур и разность теплоемкостей не равны между собой. Так, отношение температур составляет n<sub>T</sub>, а отношение теплоемкостей – n<sub>c</sub>:

$$n_T = T_1 / T_2 = 1,52671755725, \quad (75)$$

$$n_c = c_1 / c_2 = 1,75230566534, \quad (76)$$

$$k_1 = n_c / n_T = 1,1477602108. \quad (77)$$

Резонно встал вопрос: почему при падении температуры жидкости от T<sub>1</sub> до T<sub>2</sub> в n<sub>T</sub> раз, удельная теплоемкость уменьшилась в n<sub>c</sub> раз? Объяснить данное расхождение ростом плотности в точке T<sub>2</sub> до ρ<sub>2</sub> = 142,95 кг / м<sup>3</sup> не удалось. Анализ показал, что причиной может явиться структурное изменение монокристалла. Обратимся еще раз к физическому содержанию теплоемкостей c<sub>p1</sub> и c<sub>p2</sub> на уровне одного монокристалла:

$$c_{p1} = \frac{m_\mu \cdot v_1 \cdot u_1}{m_\mu \cdot T_1} = \frac{\gamma_1^{жк} \cdot m_{He} \cdot v_1 \cdot u_1}{\gamma_1^{жк} \cdot m_{He} \cdot T_1} = \frac{v_1 \cdot u_1}{T_1} = 3990 \frac{M^2}{c^2 \cdot K} \quad (78)$$

$$c_{p1} = \frac{m_\mu' \cdot v_2 \cdot u_2}{m_\mu \cdot T_2} = \frac{\gamma_2^{жк} \cdot m_{He} \cdot v_2 \cdot u_2}{\gamma_1^{жк} \cdot m_{He} \cdot T_2} = \frac{\gamma_2 \cdot v_2 \cdot u_2}{\gamma_1 \cdot T_2} = \frac{v_2 \cdot u_2}{T_2 \cdot k_1} = 2277 \frac{M^2}{c^2 \cdot T_2}; \quad (79)$$

Из этих результатов следует, что несходимость в k<sub>1</sub> раз есть следствие изменения коэффициента конденсации от γ<sub>1</sub><sup>жк</sup> до γ<sub>2</sub><sup>жк</sup> при охлаждении жидкого гелия от T<sub>1</sub> до T<sub>2</sub>:

$$k_1 = \frac{n_c}{n_T} = \frac{\gamma_1^{жк}}{\gamma_2^{жк}}, \quad (80)$$

откуда для γ<sub>2</sub><sup>жк</sup> получаем:

$$\gamma_2^{жк} = \gamma_1^{жк} / k_1 = 9,21293774, \quad (81)$$

что приводит к новому значению массы монокристалла в точке T<sub>2</sub>, m<sub>μ2</sub>

$$m_{\mu 2} = \gamma_2^{жк} \cdot m_{He} = 6,12269877458 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \quad (82)$$

Стало совершенно ясно, что на участке T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> происходит уменьшение P<sub>1</sub> в монокристалле и он, в точке T<sub>2</sub>, выходит на предкритическое состояние, состояние крайней неустойчивости кристалла. Если рассмотреть λ- кривую удельной теплоемкости гелия-1, впервые полученную Камерлинг-Оннесом и Даном и подтвержденную У. Кеезомом и К. Клузиусом в 1932 г., то отчетливо видно падение удельной теплоемкости гелия от T<sub>1</sub> до T<sub>2</sub> [5].

**2.2.Природа скачка удельной теплоемкости гелия-1 на участке от T<sub>2</sub> до T<sub>λ</sub>=2,17К**

По наблюдениям физиков, изучавших свойства гелия, известно, что при откачке паров гелия-1, жидкость интенсивно кипит в температурном интервале T<sub>2</sub>-T<sub>λ</sub>, но с момента достижения T<sub>λ</sub>=2,17К кипение прекращается! Пузырьки газа больше не образуются, жидкость становится спокойной и очень прозрачной. При продолжении откачки уровень жидкости постепенно падает, что свидетельствует о наличии испарения при отсутствии кипения. Это – экспериментальный факт чрезвычайной важности для понимания физической сути явления, но только в рамках ЕТФ. Почему только? Потому что в существующей теоритической физике отсутствует само понятие глобулярной структуры газов и монокристаллической основы жидкостей, а вместе с этим отсутствует и понимание кипения жидкости. Поэтому для криофизиков остановка кипения гелия-1, при охлаждении до T<sub>λ</sub>, означает только тот факт, что жидкость перешла в сверхтекучее состояние, т.е. в гелий-2. А для меня, автора ЕТФ, совершенно ясно, что на участке T<sub>2</sub>-T<sub>λ</sub> происходит интенсивная деструкция монокристаллов и к моменту достижения T<sub>λ</sub> коэффициент конденсации γ<sub>2</sub><sup>жк</sup> вырождается в γ = 1. То есть, в λ- точке монокристалл перестает

существовать! С этого момента кипеть нечему, ибо гелий-2 состоит только из свободных атомов, аналогично газообразному гелию, но теперь он представлен переохлажденным газом! Как говорят на Руси, вот вам, батенька, и юрьев день!

А что происходит с энергетикой системы? В точке  $T_2$  энергия монокристалла, структурного элемента 1-го порядка, составляла  $E_{\mu 2}$ :

$$E_{\mu 2} = m_{\mu 2} \cdot c_{p2} \cdot T_2 = 3,652642898 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}, \quad (83)$$

а энергия атомов в монокристалле –  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_2 = E_{\mu 2} / \gamma_2^{\text{ж}} = 3,964688573 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}. \quad (84)$$

Но к моменту охлаждения гелия до  $T_\lambda$  круто изменился состав системы, поскольку каждый монокристалл к этому моменту распался на  $\gamma_2^{\text{ж}}$  свободных атомов гелия, что привело к росту объемной концентрации структурных элементов в  $n_1 = \sqrt[3]{\gamma_2^{\text{ж}}} = 2,096361 \text{ раз}$ . При этом энергия новых структурных элементов оказалась меньше энергии суперсцилляторов в точке  $T_2$  в  $n_2$  раз:

$$n_2 = E_{\mu 2} / \varepsilon_2 = 2,62 \text{ раз}, \quad (85)$$

а общее падение энергонасыщения системы в  $\lambda$ -точке составило  $n_\varepsilon$ :

$$n_3 = n_1 \cdot n_2 = 5,49246582 \text{ раз} \quad (86)$$

И теперь, чтобы вернуть системе в  $\lambda$ -точке энергонасыщенность точки  $T_2$  необходимо вложить в нее энергию извне, в результате чего теплоемкость в  $\lambda$ -точке должна подскочить в  $n_3$  раз по сравнению с  $c_{p2}$ :

$$c'_{p\lambda} = n_3 \cdot c_{p2} = 12506,344672 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К} \quad (87)$$

при экспериментальном значении  $c_{p\lambda} = 12600 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$ !

Как видим, и тут нет никаких чудес, ибо четко работают законы ЕТФ.

### 2.3. Гиперчастотные свойства гелия-2 в $\lambda$ -точке.

Исходные данные для анализа:

$\rho_\lambda = 145,1587 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность гелия-2,

$c_{p\lambda} = 12600 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$  – удельная теплоемкость,

$P_\lambda^{\text{II}} = 5000 \text{ Па} = \text{Дж} / \text{м}^3$  – давление насыщенного пара,

$T_\lambda = 2,17 \text{ К}$ ,

$m_{\text{He}} = 6,64576158818 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = \text{const}$  – масса осциллятора гелия-2.

#### 2.3.1. Жидкая фаза

$$V_\lambda = m_{\text{He}} / \rho_\lambda = 4,57827301304 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3 \quad (88)$$

– объем кристалла в жидкокристаллической структуре гелия-2,

$$a_\lambda = \sqrt[3]{V_\lambda} = \sqrt[3]{45,7827301304 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} = 3,5773977461 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (89)$$

– длина ребра кристалла,

$$S_\lambda = a_\lambda^2 = 12,7977746338 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \quad (90)$$

– площадь грани кристалла,

$$\varepsilon_\lambda = m_{\text{He}} \cdot c_{p\lambda} \cdot T_\lambda = 1,81708413343 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} \quad (91)$$

– энергия атома,

$$c_{p\lambda} = \frac{v_\lambda \cdot u_\lambda}{T_\lambda} = 12600 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{К}}, \quad (92)$$

$$v_\lambda \cdot u_\lambda = c_{p\lambda} \cdot T_\lambda = 27342 \text{ м}^2 / \text{с}^2 \quad (93)$$

– произведение скоростей атома гелия,

$$u_\lambda = \sqrt{c_{p\lambda} \cdot T_\lambda / a} = \sqrt{16961,6231221 \text{ м}^2 / \text{с}^2} = 130,236796344 \text{ м} / \text{с} \quad (94)$$

– скорость блуждания атома,

$$v_\lambda = a \cdot u_\lambda = 209,940667823 \text{ м} / \text{с} \quad (95)$$

– линейная скорость атома гелия,

$$f_\lambda = \psi_{\text{He}} \cdot T_\lambda = 4,519728297 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \quad (96)$$

– частота атомов,

$$A_\lambda = v_\lambda / 8\pi f_\lambda = 1,84818051244 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (97)$$

– амплитуда нулевого колебания атомов,

$$\Delta V_{g\lambda} = \pi A_\lambda^3 / 6 = 3,30545905783 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3 \quad (98)$$

– объем области частотного пребывания атома в центре ячейки =  $0,07261229 \cdot V_{g\lambda}$ .

$$r_\lambda = a_\lambda - A_\lambda = 1,72921723366 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,482388595 \cdot a_\lambda \quad (99)$$

– ширина межатомного канала кристаллической структуры гелия-2,

$$\begin{cases} E_\lambda^- = n_\lambda \cdot \alpha \cdot q_\lambda \cdot Z_\lambda \cdot K_\lambda \\ E^- = -\varepsilon_\lambda \cdot k = -1,91702376077 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} \end{cases} \quad (100)$$

– энергия сближения атома,

$k = 1,055$  – коэф. превышения энергии взаимного сближения над энергией взаимного отталкивания,

$$K_\lambda = \frac{E_\lambda^-}{n_\lambda \cdot \alpha \cdot q_\lambda \cdot Z_\lambda} = \frac{-19,1702376077 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{-5,17578935124 \cdot 10^{-24} \text{ Дж}} = 37,382878953 \quad (101)$$

– координационное число дальнего порядка,

$$P_{\lambda}^{+} = \varepsilon_{\lambda} / V_{\lambda} = 3,99165858 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (102)$$

– положительное напряжение в элементарной ячейке,

$$P_{\lambda}^{-} = \frac{E^{-}}{V_{\lambda}} = -4,21119980188 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (103)$$

– отрицательное напряжение в ячейке,

$$P_{\lambda} = P^{-} + P^{+} = -2,1954122188 \cdot 10^5 \text{ Па} \quad (104)$$

– модуль Юнга жидкого кристалла гелия-2, который больше токового гелия-1 на 4,95%.

### 2.3.2. Паровая фаза

а) Свойство газообразного гелия при  $T_{\lambda}$  и  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ .

$$\varepsilon^{\Gamma} = k_{He} \cdot T_{\lambda} = 2,99489314349 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \quad (105)$$

– энергия атома,

$$V_g^{\Gamma} = \varepsilon^{\Gamma} / P_0 = 2,95572972463 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 \quad (106)$$

– объем глобулы,

$$\rho^{\Gamma} = m_{He} / V_g^{\Gamma} = 22,48434508 \text{ кг/м}^3 \quad (107)$$

– плотность газа.

б) свойства пара над гелием-2 в  $\lambda$ -точке:

$$\rho_{\lambda}^{\Pi} = \frac{P_{\lambda}^{\Pi} \cdot \rho_{\lambda}^{\Gamma}}{P_0} = 1,10951564376 \text{ кг/м}^3 \quad (108)$$

– плотность пара,

$$V_{g\lambda}^{\Pi} = m_{He} / \rho_{\lambda}^{\Pi} = 5,98078628697 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3 \quad (109)$$

– объем глобулы,

$$d_{\lambda}^{\Pi} = \sqrt[3]{6V_{g\lambda}^{\Pi} / \pi} = 2,25322330756 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (110)$$

– диаметр глобулы,

$$\varepsilon_{\lambda}^{\Pi} = P_{\lambda}^{\Pi} \cdot V_{g\lambda}^{\Pi} = 2,99489314349 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} = (105) \quad (111)$$

– энергия атома пара, которая равна энергии атома газообразного гелия, охлажденного до  $T_{\lambda} = 2,17 \text{ К}$ ,

$$\varepsilon_{\lambda}^{\Pi} = c_{P\lambda}^{\Pi} \cdot m_{He} \cdot T_{\lambda} \quad (112)$$

Приравняв правые части (111) и (112) и решая эту систему относительно удельной теплоемкости пара найдем:

$$c_{P\lambda}^{\Pi} = \frac{P_{\lambda}^{\Pi} \cdot V_{g\lambda}^{\Pi}}{m_{He} \cdot T_{\lambda}} = 2076,71471637 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad (113)$$

которая меньше теплоемкости жидкой фазы в этой точке в  $n=6,067275$  раз!

$$f_{\lambda}^{\Pi} = \varepsilon_{\lambda}^{\Pi} / h = 4,51972829697 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \quad (114)$$

– частота атомов пара,

$$A_{\lambda}^{\Pi} = \frac{2m_{He} \cdot d_{g\lambda} \cdot a \cdot f_{\lambda}^2 + \sqrt{4m_{He}^2 \cdot a^2 \cdot d_{g\lambda}^2 \cdot f_{\lambda}^4 - 8m_{He} \cdot \varepsilon_{\lambda}^{\Pi} \cdot f_{\lambda}^2}}{4m_{He} \cdot a \cdot f_{\lambda}^2} =$$

$$= \frac{9,86203441378 \cdot 10^{-14} + 8,04568010031 \cdot 10^{-14}}{8,75371240896 \cdot 10^{-5}} =$$

$$= 2,04572799257 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (115)$$

– амплитуда колебания атомов пара,

$$v_{\lambda}^{\Pi} = 2A_{\lambda}^{\Pi} \cdot f_{\lambda}^{\Pi} = 184,922693918 \text{ м/с} \quad (116)$$

– линейная скорость атомов пара,

$$i_{\lambda}^{\Pi} = m_{He} \cdot v_{\lambda}^{\Pi} = 1,22895213602 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с} \quad (117)$$

– импульс атома,

$$u_{\lambda}^{\Pi} = \varepsilon_{\lambda}^{\Pi} / i_{\lambda}^{\Pi} \cdot a = 15,1176223816 \text{ м/с} \quad (118)$$

– скорость блуждания атомов пара,

$$\sin \alpha_{\lambda} = u_{\lambda}^{\Pi} / v_{\lambda}^{\Pi} = 0,081751039$$

$\alpha_{\lambda} = 4^{\circ} 41'$  – угловой шаг атома за период,

$$H_{\lambda} = \sin \alpha_{\lambda} \cdot A_{\lambda}^{\Pi} = 1,672403891 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (119)$$

– линейный шаг атома за один период.

Подводя итог результатам по  $\lambda$ -точке гелия-2, мы можем утверждать следующее:

1. Насыщенный пар над гелием-2 ведет себя точно также, как и типичный газообразный гелий, поскольку все взаимодействия между атомами проходят с участием постоянной Планка. Температура паровой и газовой фаз одинакова.

2. Параметры гелия-2 в  $\lambda$ -точке сильно искажены притоком энергии извне. Если переход гелия-1 в гелий-2 проводить адиабатно, то к моменту завершения деструкции монокристаллов температура жидкой фазы должна снизиться, относительно предкритической точки  $T_2$ , в  $n_3$  раз и должна составлять не 2,17 К, а  $T_{\lambda}'$ :

$$T_{\lambda}' = T_2 / n_3 = 0,477017 \text{ К} \quad (120)$$

и только в этом случае мы сможем получить реальную картину по  $\lambda$ -точке, как паровой, так и жидкой фаз.

## §3. Теплопроводность жидкого гелия

### 3.1. Теплопроводность гелия-1 при $T_1 = 4 \text{ К}$

$\lambda_1 = 0,027 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  – теплопроводность гелия-1, экспериментальное значение [6].

Как известно, все опыты по измерению теплопроводности жидкого гелия были проведены не только при низких температурах (1К – 4К), но и при малых дозах энергии, вносимых локально в исследу-

емую жидкость. Так академик П.Л. Капица работал с дозами мощности 0,25-0,7 Вт/см<sup>2</sup>, что составляло в импульсе от 0,001 Дж до 0,01 Дж. При этом ни один исследователь не рассчитывал того, а какая же доля от импульса энергии становится достоянием монокристалла и как она влияет на его собственную энергию и структуру. Спросите, почему они этого не делали? Отвечу – потому что никто из них не ведал того, что гелий-1 состоит из монокристаллов, готовых при малейшей возможности рассыпаться на атомы. Этот пробел мы и попытаемся восполнить теперь.

Начнем с установления приращения частоты монокристалла,  $\Delta f_1$ , от вносимого импульса мощности  $\Delta W = 0,01 \cdot 10^{-11} \text{ Bm/монокр.}$  при собственной мощности монокристалла  $W_1$ :

$$W_1 = E_\mu \cdot f_1 = m_\mu \cdot v_1 \cdot u_1 \cdot f_1 = 9,344144182 \cdot 10^{-11} \text{ Bm}, \quad (121)$$

$$\Delta f_1 = \Delta W / E_\mu = \frac{10 \cdot 10^{-14} \text{ Bm}}{1,121571145 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}} = 8,91606390248 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1} \quad (122)$$

Приращение частоты мгновенно формирует градиент температуры в системе,  $\Delta T_1$ :

$$\Delta T_1 = \Delta f_1 / \psi = 4,28075702719 \cdot 10^{-3} \text{ K} \quad (123)$$

Теперь частота монокристаллов в очаге подвода импульса мощности приобретает значение  $f_2 = f_1 + \Delta f = 8,3312964 \cdot 10^{10} + \Delta f_1 = 8,3402124639 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ , а теплопроводность жидкого гелия-1 удовлетворительно описывается уравнением вида:

$$\lambda_1 = \frac{\pi \cdot m_\mu \cdot A_1^2 (f_2^3 + f_1^3)}{a \cdot r_1 \cdot \Delta T_1} = \frac{15,007207989 \cdot 10^{-14} \text{ Bm}}{6,46400123787 \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{K}} = 2,3216592 \cdot 10^{-2} \text{ Bm/м} \cdot \text{K} \quad (124)$$

из которого следует, что роль первой скрипки в ансамбле факторов, влияющих на теплопроводность, принадлежит частоте осцилляторов и суперосцилляторов, поскольку она входит в уравнение в третьей степени.

Из (122)-(124) следует, что теплопроводность имеет место только тогда, когда появляется очаг повышенной частоты структурных элементов данной среды и возникает частотный и температурный градиенты. Термины «тепло» и «теплота» были приняты в обращение нашими пещерными предками и не несут научного содержания.

Понятие «теплоемкость материала» лишено физического смысла ввиду того, что никакая среда не может проводить через себя то, что в ней отсутству-

ет. Среда проводит только частоту, ибо она состоит из осцилляторов (атомов или молекул), которые находятся в непрерывном частотном движении и в непрерывном взаимодействии как между собой, так и с осцилляторами окружающей фоновой системы. Именно поэтому научную основу теплопроводности составляет проводимость частоты структурными элементами данного материала.

### 3.2. Теплопроводность гелия-2 в $\lambda$ -точке

При переходе гелия-1 в гелий-2 коэффициент конденсации  $\gamma^{\text{ж}}$  вырождается в  $\gamma = 1$  и меняются гиперчастотные параметры структурных элементов, при этом (124) преобразуется к виду:

$$\lambda_\lambda = \frac{\pi m_{\text{He}} A_\lambda^2 \cdot (f_{\lambda 2}^3 + f_{\lambda 1}^3)}{a \cdot r_\lambda \cdot \Delta T_\lambda}, \text{ Bm} / \text{м} \cdot \text{K} \quad (125)$$

При локальном подводе мощности  $\Delta W = 0,01 \cdot 10^{-11} \text{ Bm/ атом}$ , при реальной мощности атома гелия-2 в  $\lambda$ -точке,  $W_\lambda$ :

$$W_\lambda = \epsilon_\lambda \cdot f_\lambda = 8,21272657593 \cdot 10^{-12} \text{ Bm} \quad (126)$$

приращение частоты,  $\Delta f_\lambda$ , и теплопроводность составляют:

$$\Delta f_\lambda = \Delta W / \epsilon_\lambda = 5,503322502 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}, \quad (127)$$

что больше  $\Delta f_1$  в 6,17 раз

$$\lambda_\lambda = \frac{13,41238908 \cdot 10^{-14} \text{ Bm}}{7,365204244 \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{K}} = 1,821047805 \cdot 10^{-2} \text{ Bm/м} \cdot \text{K}, \text{ где} \quad (128)$$

$$\Delta T_\lambda = \Delta f_\lambda / \psi = 2,64224064924 \cdot 10^{-2} \text{ K} \quad (129)$$

– температурный градиент при  $T=2,17\text{K}$ .

Имеются экспериментальные данные по теплопроводности гелия-2 из одного сосуда в другой через тонкие трубки, длиной до 90 см и диаметром 0,6 мм. Локальный нагрев производился в первом сосуде, но при этом два одинаковых термометра, размещенные в них, не могли зафиксировать разницы температур между ними – настолько быстро распространялось приращение частоты  $\Delta f$  от первого сосуда ко второму. Этот результат шокировал экспериментаторов и они, схватившись за головы, по сей день решают эту загадку, но безуспешно.

Физическая суть столь быстрой передачи избыточной частоты из зоны нагрева состоит в том, что во-первых, атомы гелия не имеют вращения вокруг своих осей и жестко ориентированы в пространстве; во-вторых, они занимают малую часть пространства

в центре элементарной ячейки, обладая малой амплитудой колебания; в-третьих, атомы находятся в состоянии динамического напряжения, обусловливаемого взаимодействием полярных электрических полей; в-четвертых, они упруго взаимодействуют между собой с большой частотой  $f_\lambda = 4,519728 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$  и при этом линейная скорость атомов составляет 209,94 м/с. А когда возникает очаг повышенной частоты,  $f' = f_\lambda + \Delta f$ , тут же формируется частотный градиент, вдоль которого также формируется градиент скорости,  $v' = v_\lambda + \Delta v$ , эстафетно распространяющий избыточную частоту от атома к атому. При этом путь в  $l_{\text{ед}} = 1 \text{ м}$  волна избыточной частоты проходит за время  $\tau_\lambda$ :

$$\tau_\lambda = l_{\text{ед}} / v_\lambda = 0,004763 \text{ с}. \quad (130)$$

которое по своей продолжительности ниже порога инерционности термометров, в силу чего экспериментаторы не смогли обнаружить разницу температур между двумя сосудами, соединенными капиллярной трубкой.

#### §4. Вязкость жидкого гелия

$\eta_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – вязкость гелия-1 при  $T_1 = 4 \text{ К}$ , экспериментальное значение [4].

$\eta_\lambda = 2,05 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – вязкость гелия-2 при  $T_\lambda = 2,17 \text{ К}$ , экспериментальное значение.

Академик П.Л. Капица, проводивший целую систему весьма тонких опытов с гелием-2, настолько был поражен необычностью его свойств, что пришел к предположению о полном отсутствии у гелия вязкости и теплопроводности [8]. Полученный им результат по исследованию вязкости гелия составил  $\eta < 1 \cdot 10^{-12} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

В рамках ЕТФ вязкость гелия-1 решается на уровне одного монокристалла и имеет вид:

$$\eta_1 = \frac{m_\mu \cdot f_1}{2r_1} = \frac{\gamma^{\text{ж}} \cdot m_{\text{He}} \Psi_{\text{He}} T_1}{2(d_{g1} - A_1)}, \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (131)$$

Введя в (131) численные значения величин получим:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{m_\mu \cdot f_1}{2r_1} = \frac{5,854726931 \cdot 10^{-15} \text{ кг} / \text{с}}{1,87342118874 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = \\ &= 3,12515251038 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (132)$$

– вязкость гелия-1, теоритическое значение, которое точнее экспериментального.

Для гелия-2 уравнение (131) видоизменяется тем, что структурный элемент представлен не монокристаллом, а одним атомом гелия:

$$\eta_\lambda = \frac{m_{\text{He}} \cdot f_\lambda}{2r_\lambda} = \frac{m_{\text{He}} \cdot \Psi_{\text{He}} \cdot T_\lambda}{2(d_\lambda - A_\lambda)}, \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (133)$$

Введя численные значения величин в (133) получим для гелия-2:

$$\begin{aligned} \eta_\lambda &= \frac{m_{\text{He}} \cdot f_\lambda}{2r_\lambda} = \frac{30,0370367052 \cdot 10^{-17} \text{ кг} / \text{с}}{3,45843446732 \cdot 10^{-10} \text{ м}} = \\ &= 8,68515421906 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (134)$$

Как видим, это значение вязкости, имеющее полное обоснование в рамках ЕТФ, больше величины, полученной П.Капицей, на пять порядков, а относительно вязкости гелия-1, оно ниже в 5,37 раз. При этом ни у меня ни у читателя не должно быть и намек на упрек в адрес П.Капицы и других исследователей, получавших иные результаты, потому что дело не в их интеллектуальных способностях, которые у них были весьма велики, а в том уровне физической науки, уровне середины XX века, тогда как мы сегодня решаем нерешенные ими вопросы науки уже на уровне ЕТФ и уже в XXI веке.

#### §5. Особые свойства гелия-2

Итак, гелий-2 в интервале от  $T_\lambda$  до  $T_a = 0 \text{ К}$  – это переохлажденный газ, ибо его структурные элементы представлены атомами гелия. Они легки и являются носителями избыточного положительного заряда, что и определяло несговорчивость газообразного гелия с экспериментаторами в начале XX века, желавшими получить его в жидком состоянии. Именно это, глубоко внутреннее свойство гелия делает его поведение особенным и удивительным. Однако, аналитический материал, приведенный в параграфах 1-4, полностью освобождает гелий от всех ошибочных суждений о его природе, будто он представляет собой некую квантовую жидкость, свойства которой подчиняются не законам физики, а некоей статистике Бозе – Эйнштейна. Более того, полученные мною результаты по гелию напрочь отменяют из науки как статистику Бозе – Эйнштейна, так и статистику Ферми – Дирака, как ни на чем не основанные измышления. Думаю, что со мной согласится каждый физик, дорожающий прогрессивным развитием фундаментальной науки.

**5.1 Гиперчастотные свойства гелия-2 при  $T_4=2K$**

Поскольку все чудесные свойства гелия-2 выявлены в интервале температур от 1К до  $T_\lambda = 2,17K$ , нам, для дальнейшего успешного продвижения исследования свойств гелия, необходимо рассчитать гиперчастотные свойства гелия-2, как жидкой, так и паровой фаз при  $T_4=2K$  и сравнить полученные результаты с параметрами гелия-1 при  $T_1=4K$ .

Исходные данные для анализа.

$T_4 = 2,0K$  – температура гелия-2,  
 $\rho_4 = 145,99 \text{ кг/м}^3$  – плотность гелия-2,  
 $c_{p4} = 5180 \text{ Дж/кг} \cdot K$  – удельная теплоемкость,  
 $P_4^II = 3333,333 \text{ Па}$  – давление насыщенного пара,  
 $m_{He} = 6,64576158818 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – масса структурного элемента гелия-2.

**5.1.1. Жидкая фаза гелия-2**

$V_4 = m_{He} / \rho_4 = 4,55220329349 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$  (135)  
 – объем элементарной ячейки жидкокристаллической структуры гелия-2,

$$a_4 = \sqrt[3]{V_4} = \sqrt[3]{45,5220329349 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} = 3,5705946465 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (136)$$

– длина ребра кристаллической ячейки,

$$S_4 = a_4^2 = 12,7491461296 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \quad (137)$$

– площадь грани кристалла,

$$\varepsilon_4 = c_{p4} \cdot m_{He} \cdot T_4 = 6,88500900537 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}, \quad (138)$$

$$f_4 = \psi_{He} \cdot T_4 = 4,1656482 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, \quad (139)$$

$$u_4 = \sqrt{\varepsilon_4 / m_{He} \cdot a} = 80,1675188942 \text{ м/с}, \quad (140)$$

$$v_4 = a \cdot u_4 = 129,229395432 \text{ м/с}, \quad (141)$$

$$\varepsilon_4 = m_{He} \cdot v_4 \cdot u_4 = 6,88500900537 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}, \quad (142)$$

$$\left. \begin{aligned} E_4^- &= n_\lambda \cdot \alpha \cdot q_\lambda \cdot Z_\lambda \cdot K_4 \\ E_4^- &= -\varepsilon_4 \cdot 1,055 \end{aligned} \right\} \quad (143)$$

– энергия взаимного сближения атомов,

$$K_4 = \frac{E_4^-}{n_\lambda \alpha q_\lambda \cdot Z_\lambda} = \frac{-7,26368450066 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{-5,17578951247 \cdot 10^{-24} \text{ Дж}} = 14,0339642544 \quad (144)$$

– координационное число дальнего порядка,

$$A_4 = v_4 / 8\pi f_4 = 1,23435153955 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (145)$$

$$\Delta V_{g4} = \pi A_4^3 / 6 = 9,8472556149 \cdot 10^{-31} \text{ м}^3 = 0,0216318 \cdot V_{gu} \quad (146)$$

$$r_4 = a_4 - A_4 = 2,33624310695 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,6543008485 \cdot a_4 \quad (147)$$

– ширина межатомного канала,

$$P_4^- = E_4^- / V_4 = -1,595641502 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (148)$$

– напряжение взаимного сближения атомов,

$$P_4^+ = E_4 / V_4 = 1,5124564 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (149)$$

– напряжение взаимного отталкивания атомов,

$$P_4 = P_4^- + P_4^+ = -8,3185102 \cdot 10^4 \text{ Па} \quad (150)$$

– модуль Юнга для гелия-2, для его жидкокристаллической структуры, при  $T_4=2K$ ,

$$n_p = P_4^- / P_4^+ = -1,055 \quad (151)$$

– коэф. полярных напряжений кристаллической структуры.

При сравнении (150) с (73) выявляется, что модуль Юнга кристаллической структуры гелия-2 при  $T_4=2K$  меньше модуля Юнга монокристалла гелия-1 в  $n = P_{He} / P_4 = 1,3174684$  раза.

**5.1.2. Паровая фаза гелия-2**

$$\rho_4^{II} = \frac{P_4^{II} \cdot \rho_4^I}{P_0} = 0,8025496489 \text{ кг/м}^3 \quad (152)$$

– плотность пара над жидкой фазой гелия-2 при  $T_4=2K$ , где

$$\rho_4^I = 24,39550295 \text{ кг/м}^3 \quad (153)$$

– плотность газообразного гелия при  $T_4=2K$  и  $P_0=101325\text{Па}$ ,

$$V_{g4}^{II} = m_{He} / \rho_4^{II} = 8,28081053588 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3, \quad (154)$$

$$d_{g4}^{II} = \sqrt[3]{6V_{g4}^{II} / \pi} = 2,51010222464 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (155)$$

$$\varepsilon_4^{II} = V_{g4}^{II} \cdot P_4^{II} = 2,76027017835 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}, \quad (156)$$

$$k_4^{II} = \varepsilon_4^{II} / T_4 = 1,38013508917 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / K = k_{He}, \quad (157)$$

$$f_4^{II} = \varepsilon_4^{II} / h = 4,1656482 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, \quad (158)$$

$$A_4^{II} = \frac{2m_{He} \cdot d_{g4}^{II} \cdot a \cdot f_4^2 + \sqrt{4m^2 d_4^2 \cdot a^2 \cdot f_4^4 - 8m_{He} \cdot \varepsilon_4^{II} \cdot f_4^{II2}}}{4m_{He} \cdot a \cdot f_4^{II2}} = 2,31079426648 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (159)$$

– амплитуда нулевого колебания атомов пара,

$$v_4^{\Pi} = 2A_4^{\Pi} \cdot f_4^{\Pi} = 192,519119534 \text{ м/с}, \quad (160)$$

$$i_4^{\Pi} = m_{He} \cdot v_4^{\Pi} = 1,27943616958 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}, \quad (161)$$

$$u_4^{\Pi} = \varepsilon_4^{\Pi} / i_4^{\Pi} \cdot a = 13,3835122131 \text{ м/с}, \quad (162)$$

$$\sin \alpha_4 = u^{\Pi} / v^{\Pi} = 0,0695178341, \quad (163)$$

$$\alpha_4^{\Pi} = 3^{\circ}59', \quad (164)$$

$$H_4^{\Pi} = \sin \alpha_4 \cdot A_4^{\Pi} = 1,6064141245 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (165)$$

$$u_4^{\Pi} = 2H_4^{\Pi} \cdot f_4^{\Pi} = 13,383512213 \text{ м/с}, \quad (166)$$

$$\Delta V_{g4}^{\Pi} = \pi A_4^{\Pi 3} / 6 = 6,46074300758 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3 = 0,78 \cdot V_{g4}^{\Pi}, \quad (167)$$

$$r_c^{\Pi} = \hbar / i_4^{\Pi} = 3,21282826746 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (168)$$

$$v_4^{\Pi} \cdot u_4^{\Pi} = 2576,551 \text{ м}^2 / \text{с}^2,$$

$$c_{p4}^{\Pi} = v_4^{\Pi} \cdot u_4^{\Pi} / T_4 = 1288,27550638 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (169)$$

– удельная теплоемкость пара при  $T_4=2\text{К}$ .

Вот теперь, имея полную гиперчастотную характеристику гелия-1 (при  $T_1=4\text{К}$ ) и гелия-2 (при  $T_4=2\text{К}$ ), мы можем приступить к объяснению особых свойств жидкого гелия, которые не перестают удивлять научный мир с 1908 года, от первых опытов голландского физика Г. Камерлинг-Оннеса, ставшего отцом криофизики.

### 5.2. Эффект перетекания гелия-2 через вертикальную стенку

$$\sigma_{\lambda} = -3,7 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м} \quad (170)$$

– поверхностное натяжение гелия-2 при  $T_a = 0\text{К}$  [Свойства элементов.Т. 2, с. 257, М., 1997 г.].

В рамках ЕТФ уравнение поверхностного натяжения жидкости имеет вид:

$$\sigma_i = \frac{n_{\lambda i} \cdot \alpha \cdot q_{\lambda} \cdot Z_{\lambda} \cdot k_i}{\pi \cdot r_i^2}, \text{ Н/м} \quad (171)$$

На основе этого уравнения, поверхностное натяжение гелия-2, при  $T_4=2\text{К}$ , составит  $\sigma_4$ :

$$\sigma_4 = \frac{n_{\lambda} \cdot \alpha \cdot q_{\lambda} \cdot Z_{\lambda} \cdot k_4}{\pi \cdot r_4^2} = \frac{-7,26368450066 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}}{1,7146912778 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2} = -4,2361471098 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м} \quad (172)$$

Теперь, зная, что жидкий гелий смачивает стекло и обладает определенным поверхностным натяжением,  $\sigma_4$ , не прибегая ни к каким ухищрениям, мы объясним перетекание гелия через вертикальную стенку. Для этого сначала необходимо разобратся в структуре пристенного слоя гелия-2, на

стенке сосуда, над уровнем жидкой фазы. Состоит он из трех слоев, несущих не одинаковые функции. Первый монослой атомов гелия неподвижно связан с поверхностью стенки по всему периметру сосуда. Третий монослой, стороной, обращенной к геометрическому центру сосуда, находится в контакте с паровой фазой и взаимодействует с атомами пара. Между первым и третьим монослоями формируется кольцевой капиллярный канал по всему периметру сосуда, ширина этого канала равна межатомному расстоянию  $a_4$  и составляет  $r_c$ :

$$r_c = a_4 = 3,570594 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (173)$$

а толщина пристенного слоя,

$$l_s = 3 \cdot a_4 = 1,0711784 \cdot 10^{-9} \text{ м}. \quad (174)$$

Второй монослой атомов гелия поднимается вертикально вверх по кольцевому капиллярному каналу, а атомы этого слоя взаимодействуют только с атомами первого и третьего слоев. При этом поверхностное натяжение атомов второго слоя распределяется по углу  $4\pi$  стерадиан, а сила взаимодействия с атомами первого и третьего слоев обратнопропорциональна ширине межатомного канала этой, жидкокристаллической структуры,  $r_4 = (a_4 - A_4)$ . С учетом этих особенностей пристенного слоя, антигравитационная, капиллярная сила формирует напряжение среднего монослоя, направленное вертикально вверх,  $\Delta P_4$ :

$$\Delta P_4 = \frac{\sigma_4}{4\pi \cdot r_4} = \frac{-22,64009024 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}}{2,81014596658 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = -8,05655311776 \cdot 10^4 \text{ Па} \quad (175)$$

Как видим, капиллярное давление достигает большого значения, уступающего атмосферному давлению  $P_0$ , лишь вдвое.

Чтобы понять, почему гелий-1 не перетекает через стенку сосуда, подобно гелию-2, нам необходимо рассмотреть паровую фазу гелия-1 и гелия-2, установить давление атомов пара на стенку сосуда над гелием-1 и гелием-2. При этом давление атомов пара на стенку определяет уравнение следующего вида:

$$\Delta P_i^{\Pi} = \frac{i_1^{\Pi} \cdot f_1^{\Pi}}{S_i^{\Pi}} = \frac{4m_{He} \cdot v_i^{\Pi} \cdot f_i^{\Pi}}{\pi (d_{gi}^{\Pi})^2}, \text{ Па}, \quad (176)$$

Для пара над жидким гелием-1 имеем:

$$\Delta P_1^{\Pi} = \frac{i_1^{\Pi} \cdot f_1^{\Pi}}{\pi (d_{g1}^{\Pi})^2 / 4} = \frac{9,06327165474 \cdot 10^{-11} \text{ Н}}{1,916048467 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2} = 4,730189 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (177)$$

а для давления пара над гелием-2 получим:

$$\Delta P_4^{\text{II}} = \frac{4i_4^{\text{II}} \cdot f_4^{\text{II}}}{\pi (d_4^{\text{II}})^2} = \frac{2,13187239072 \cdot 10^{-13} \text{ Н}}{1,97939600736 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2} = 1,077031772 \cdot 10^4 \text{ Па} \quad (178)$$

– давление атомов пара на стенку при  $T_4=2\text{К}$ .

Становится совершенно ясно, что гелий-1 не может перетекать через стенку только потому, что атомы его собственного пара наглухо запирают ему выход на стенку, создавая на ней высокое давление, непреодолимое капиллярным давлением. И, наоборот, гелий-2 свободно выходит на стенку, формирует кольцевой капиллярный канал и по нему спокойно перетекает через стенку сосуда, поскольку атомы его пара над ним не создают высокого, запирающего давления, при этом капиллярное давление гелия-2 в 8 раз превосходит давление, создаваемое атомами пара на стенке сосуда.

Таким образом, мы видим, что ничего таинственного в явлении перетекания гелия-2 через стенку не существует, ибо оно просто и ясно объясняется законами истинной теории физики.

### 5.3. Эффект противотока гелия-2 в капиллярных трубках

Проведя целый ряд опытов, выдающийся экспериментатор П. Капица пришел к выводу, что в капиллярах диаметром 0,4-0,6 мм имеет место противоток гелия-2. На базе экспериментальных результатов Капицы, в 1941 году, академик Л.Д. Ландау создал теорию двухкомпонентного гелия-2, за которую в 1962 году был удостоен Нобелевской премии в области физики. А П. Капица был удостоен такой чести лишь спустя 15 лет, в 1978 году.

Я предлагаю своим читателям, вместе со мной, произвести анализ одного из опытов Капицы [7]. Суть опытов состоит в следующем:

Мини колбочка, объемом  $\Delta V$ , имеет оттянутый торец, переходящий в капиллярную трубку. Внутри колбочки помещен миниатюрный электронагреватель, на который дозированно можно подавать электроимпульс в продолжение от 5 до 17 секунд. Колбочка наполнена гелием-2 и размещается в дьюаре также с гелием-2. При подаче импульса тока в колбочку, из его капиллярного выхода вырывается струя, скорость которой была измерена по ее динамическому напору на пластинку. При этом количество жидкости в колбочке не уменьшается и резонно возникает вопрос: Каким образом восполняется

объем жидкого гелия в колбочке при очевидном вытекании из нее части жидкости?

#### Исходные данные для анализа опыта.

$u = 5,2 \text{ см/с}$  – скорость вытекающей струи из капилляра,

$T = 1,6\text{К}$  – температура гелия-2,

$$\Delta E = 1,9 \text{ Вт/см}^2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \tau = 0,04514076 \text{ Дж}$$

– энергия в импульсе,  $\tau = 10\text{с}$  – продолжительность импульса,

$\Delta P = 0,4\text{Па}$  – скоростной напор струи,

$\Delta V_0 = 0,926994 \text{ см}^3$  – объем колбочки,

$d = 0,4 \text{ мм}$  – диаметр капилляра на выходе.

#### Анализ результатов

$$S = \pi d^2 / 4 = 5,939574 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \quad (179)$$

– сечение капилляра,

$$V_{\tau} = u \cdot S = 3,08857827 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{с} \quad (180)$$

– секундный расход гелия из колбочки,

$$\Delta V_1 = V_{\tau} \cdot \tau = 3,08857827 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3 = 3,331\% \Delta V_0 \quad (181)$$

– полный объем вытекающей жидкости из колбочки за время подогрева  $\tau = 10\text{с}$ ,

$$\Delta m_1 = \rho \cdot \Delta V_1 = 0,145 \frac{2}{\text{см}^3} \cdot \Delta V_1 = 4,4784384 \cdot 10^{-3} \text{ г} \quad (182)$$

– масса гелия-2, покинувшая колбочку, где

$\rho = 0,145 \frac{2}{\text{см}^3}$  – плотность гелия-2, принятая

П. Капицей в опыте,

$$\Delta n_1 = \Delta m_1 / m_{\text{He}} = 6,73878883642 \cdot 10^{20} \quad (183)$$

– число атомов гелия, покинувшее колбочку,

$$c_p = 2400 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (184)$$

– теплоемкость гелия-2 при  $T=1,6\text{К}$ ,

$$\varepsilon_0 = c_p \cdot m_{\text{He}} \cdot T = 2,55197245 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \quad (185)$$

– энергия атомов гелия до воздействия теплом,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_0 + \frac{\Delta E}{\Delta n} = \varepsilon_0 + 6,698646 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} = \\ &= 9,25061845 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \end{aligned} \quad (186)$$

– энергия атомов истекающих из колбочки после введения импульса  $\Delta E$ ,

$$T_1 = T \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = 1,6\text{К} \cdot 3,624889622 = 5,7998234\text{К} \quad (187)$$

– температура газа, истекающего из капилляра.

Выше, при рассмотрении теплопроводности жидкого гелия, мы выяснили, что приращение частоты осцилляторов в активной зоне распространяется по гелию-2 с большой скоростью, на один метр в течение нескольких миллисекунд. А ведь объем колбочки меньше одного кубического сантиметра! Поэтому, как только включают электронагреватель в колбочке, температура ее спирали и прилегающие к ней атомы гелия моментально получают приращение частоты  $\Delta f$ , величина которого вначале очень мала, но по мере работы спирали ее температура растет до 5-10К. За этим немедленно следует рост амплитуды колебания атомов, рост объема глобул, падение плотности гелия-2, а итогом этих перестроений выступает приращение давления в колбочке, которое локализовано строго вокруг спирали нагревателя – наступает эффект переполнения емкости. Под возникшим избыточным давлением начинается истечение наиболее энергичных атомов из непосредственного окружения спирали, которые и создают струю на выходе из капилляра. При этом избыточное давление в колбочке равно скоростному напору струи на выходе из капилляра и составляет величину  $\Delta P$ :

$$\begin{aligned} \Delta P &= \rho \cdot u^2 = 0,145 \frac{2}{\text{см}^3} \cdot (5,2 \text{ см} / \text{с})^2 = \\ &= 3,9208 \text{ Па} = 39,2 \frac{\text{Дин}}{\text{см}^2} \end{aligned} \quad (188)$$

Из (187) следует, что струя из капилляра – это уже не гелий-2 и не гелий-1, ибо она образована атомами газообразного гелия, но при температуре  $T=5-6\text{К}$ .

Таким образом, не существует никакого противотока в капиллярной трубке и прежде всего потому, что в колбочке существует избыточное давление в течение всего опыта, а против давления не может течь даже гелий-2! Это – во-первых. Во-вторых, объем жидкости в колбочке не уменьшается вообще, хотя масса в ней уменьшается на величину  $\Delta m = 4,478$  миллиграмм и происходит это за счет структурного перестроения гелия-2 под воздействием подводимой энергии в колбочку: по мере нагрева плотность жидкости падает, часть жидкости покидает колбочку, а остающаяся жидкость в колбочке имеет уменьшенную плотность, занимая прежний объем.

Этот же механизм лежит в основе так называемого механокалорического эффекта, состоящего в фонтанировании гелия-2 из пробирки с малым вы-

ходным отверстием, при подаче импульса энергии достаточной мощности.

## §6. Гелий-2 и предел шкалы Кельвина

Температурная шкала Кельвина была предложена У. Томсоном (лордом Кельвином) в 1848 году и стала выдающимся достижением науки. Ее физическая суть состоит в том, что изменение температуры вещества непременно ведет к изменению объема, которое занимают ее структурные элементы. Эта зависимость особенно резко выражена у газов, что и легло в основу данной шкалы. Так, при изменении температуры газов на один градус, в изобарном режиме, происходит изменение его объема на величину  $\beta_i$ : у водорода  $\beta = 3,661 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ , у азота  $-3,67272 \cdot 10^{-3} / \text{град}$ , у гелия  $-3,658 \cdot 10^{-3} / \text{град}$  и т.д., т.е. каждый газ имеет коэффициент температурного расширения.

В качестве реперной температуры была принята тройная точка воды, самой важной и самой распространенной жидкости на Земле, которая составляет 273,16 К. При этом, температура плавления льда, которая ниже на 0,01 градуса, принята за температуру термодинамического нуля,  $T_0 = 273,15\text{К}$ . Но фактически  $T_0$  есть не что иное, как обратный коэффициент температурного расширения парогазовой фазы над твердой фазой воды, при  $P_0 = 101325\text{Па}$ :

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 1/\beta_0 = 273,15 \text{ К}, \text{ где} \\ \beta_0 &= 3,66099212878 \cdot 10^{-3} / \text{град} \end{aligned} \right\} \quad (189)$$

Однако в эту шкалу заложена серьезная и очень принципиальная ошибка, состоящая в утверждении того, что при охлаждении вещества до  $t=-273,15^\circ\text{C}$  достигается абсолютная температура,  $T_a = 0\text{К}$ , при которой прекращается тепловое движение атомов и молекул. На эту ошибку я уже указывал в ОЭТФ, в 1994 году, но до физиков это еще не дошло, поэтому я еще раз возвращаюсь к ней, поскольку понимаю – дальнейшее развитие криофизики не возможно без наведения порядка в области температур, лежащих левее  $T_a = 0\text{К}$ . Читатель, изучающий содержание данной работы, уже и сам понимает справедливость моих замечаний относительно шкалы Кельвина.

В рамках ЕТФ для газообразного гелия установлены следующие, основополагающие свойства:

$$\psi_{\text{He}} = \frac{k_0(\text{He})}{h} = 2,0828241 \cdot 10^{10} \text{ К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} = \text{const} \quad (190)$$

– частотная постоянная гелия,

$$\beta_{He} = 3,6580 \cdot 10^{-3} K^{-1} \quad (191)$$

– коэффициент объемного расширения,

$$T_0(He) = 1 / \beta_{He} = 273,373428103 \quad (192)$$

– термодинамическая температура гелия,

$$k_0(He) = \beta_{He} \cdot f_0 \cdot h = 1,38013508917 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / K = const \quad (193)$$

– удельная энергия атома гелия,

$$f_0(He) = \psi_{He} \cdot T_0(He) = 5,69388764352 \cdot 10^{12} c^{-1} \quad (194)$$

– частота нулевого колебания атомов гелия при  $T_0(He)$ ,

$$\xi_{He} = h / k_0(He) = 4,80117356047 \cdot 10^{-11} K \cdot c = const \quad (195)$$

– температурная постоянная гелия,

$$h = m_e \cdot \mu \cdot \sqrt[3]{4\pi / 3} / 2 = 6,6262681 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / c = const \quad (196)$$

– постоянная Планка, абсолютное значение.

Это – целая система хорошо выверенных и полностью согласованных с остальными 150 константами ЕТФ, без учета которых и не опираясь на них, ни один ученый не может понять поведение гелия – будь он даже семи пядей во лбу.

Поэтому я предлагаю физикам принять шкалу Базиева для области температур, лежащих между  $T_a = 0K$  и  $T_a = 0B$ , охватывающий частотный интервал от  $f(K)_a = \psi_{He} \cdot 1K = 2,0828241 \cdot 10^{10} c^{-1}$  – по шкале Кельвина, до  $f(B)_a = 2,0828241 c^{-1}$  при температуре  $T=1B$  (один градус Базиева), которая будет достигнута лишь при охлаждении гелия в  $n_T$  раз ниже  $T_a = 0K$ :

$$n_T = f(K)_a / f(B)_a = 1 \cdot 10^{10} \quad (197)$$

Из (195) следует, что между  $T_a$  по Кельвину и  $T_a$  по Базиеву существует температурный интервал, равный 10 миллиардам градусов. Иными словами, между мнимым абсолютным нулем, при  $T_a = 0K$ , и действительным абсолютным нулем, при  $T_a = 0B$ , лежит целый мир и колоссальная дистанция.

Для того чтобы криофизика могла успешно продвигаться к действительному абсолютному нулю необходимо:

1. Принять предлагаемую мною шкалу, ибо она является не моей прихотью, а диктуется достигнутым уровнем физической науки в результате открытия электрино.
2. Необходимо научиться измерять частоту нулевого колебания атомов гелия и уйти от измерения температуры в криофизике. При

этом частота устанавливается, а температура рассчитывается.

3. В области температур Базиева необходимо работать с газообразным гелием при нарастающем падении давления и плотности газа. Похоже на то, что  ${}^3\text{He}$  может оказаться более подходящим объектом в перспективе развития данной области науки. Но мною он еще не исследован.

Температурную шкалу Кельвина можно продлить влево от  $T_0 = 0K$ , но тогда, как и по шкале Цельсия, все значения левее нуля будут иметь отрицательный знак с нарастающим модулем при удалении от нуля, что противоречит уменьшающемуся модулю частоты атомов. Если же мы уменьшим частотную постоянную гелия в  $n_T$  раз, то получим не противоречивую шкалу Базиева:

$$\psi_B = \psi_{He} / n_T = 2,0828241 B^{-1} \cdot c^{-1} = const \quad (198)$$

При этом температура Базиева в точке  $T_a = 0K$  составляет  $T_{max}^B$ , а частота атомов не изменяется:

$$T_{max}^B = 1K \cdot n_T = 1 \cdot 10^{10} B, \quad (199)$$

$$f_{max}^B = \psi_B \cdot T_{max}^B = 2,0828241 \cdot 10^{10} c^{-1} = f(K)_a \quad (200)$$

Из (198-200) следует, что, во-первых, сохраняется равенство температурных интервалов между шкалой Кельвина и шкалой Базиева. Во-вторых, от  $T_a = 0K$  влево совершенно идентично уменьшаются как температура Базиева, так и частота атомов гелия, все больше приближаясь к истинному абсолютному нулю. В-третьих, по шкале Базиева температура становится идентичной частоте атомов газа, они равны по модулю.

Выше я уже говорил о том, что температура – это не физическая величина и тем не менее мы не можем от нее отказаться ввиду того, что она жестко связана с частотой структурных элементов вещества, а при высоких частотах много легче измерить температуру, чем частоту колебания атомов и молекул. А вот в области сверхнизких температур мы научимся измерять частоту молекул и тогда сможем обходиться без опоры на температуру.

А сейчас мы установим, совершенно объективно, что при  $T_a = 0K$  атомы гелия обладают высокой частотой,  $f(K)_a$ :

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \psi_{He} \cdot 1K = 2,0828241 \cdot 10^{10} c^{-1} \\ f'_1 &= -\psi_{He} \cdot (-1K) = 2,0828241 \cdot 10^{10} c^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (201)$$

Частота атомов гелия  $f_1$  имеет место при удалении от  $T_a$  вправо на один градус, а частота  $f'_1$  – при

удалении от  $T_a$  влево тоже на один градус. Стало быть, в точке  $T_a = 0K$ , расположенной между  $+1K$  и  $-1K$  частота составляет  $f(K)_a$ :

$$f(K)_a = \frac{f_1 + f'_1}{2} = 2,0828241 \cdot 10^{10} c^{-1} = const. \quad (202)$$

Сегодня криофизики уже спокойно говорят о достижении температур, очень близких к  $T_a$ . Так В.С. Эдельман приводит  $T' = 4 \cdot 10^{-4} K$  [5, с.100]. Понятно, что эта температура действительно близка к нулю, но находится от нее правее, а по сравнению с  $T = -1K$ , она правее больше чем на один градус,

а именно – на 1,0004K. А раз так, частота атомов гелия при  $T'$  должна лежать между  $f_1$  и  $f'_1$ . Проверим расчетом:

$$f(T') = \psi_{He} \cdot 4 \cdot 10^{-4} K = 8,3312964 \cdot 10^6 c^{-1}, \quad (203)$$

что меньше  $f(K)_a$  в 2500 раз! Совершенно ясно, что такой частоте атомов гелия соответствует  $T = -2500K$ , а по шкале Базиева ей соответствует температура  $T_B = f(T') / \psi_B = 4 \cdot 10^6 B$ . Обе эти температуры лежат на тысячи градусов левее  $T_a(K)$ , а криофизики по сей день считают, что еще не дошли до  $T_a = 0K$ .

### Список литературы

1. Г.Е.Валовик. Статья о жидком гелии. Физическая энциклопедия, Т.1, с.424-427, изд. «Советская энциклопедия», М., 1988г.
2. Д.Х.Базиев. Основы единой теории физики. М., Педагогика, 1994г., 640 с.
3. Н.В.Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972г.
4. Физические величины. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1991год. 1234 стр.
5. В.С.Эдельман. Вблизи абсолютного нуля. М., Физматлит, 2001г.
6. Свойства элементов. Справочник под редакцией М.Е.Дрица. М., Металлургия, Т. 1-2, 1997г.
7. П.Л. Капица. ЖЭТФ, Т.11, вып.1, 1941г.
8. П.Л.Капица. ЖЭТФ, Т, 11, вып. 6, 1941г.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА МЕТАНОЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТОВ МНОГОФАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ

**Паранук Арамбий Асланович,**  
Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ), г. Краснодар  
05.02.13  
aparanuk@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрен целостный подход к нормированию расхода ингибиторов гидратообразования с обобщением опыта предшествующих научно-технических разработок. Метанол, или метиловый спирт ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), – является низшим одноатомным спиртом, который представляет собой прозрачную жидкость с характерным резким запахом. Его молекулярная масса ( $m$ ) 32,04; может смешивается с водой в любых пропорциях. Метанол используется в составе природного газа которых присутствует сероводород и диоксид углерода. Выделены недостатки при использовании ингибиторов на основе метанола, а также рассмотрены причины его повсеместного использования на предприятиях газовой и нефтяной отрасли России.

**Ключевые слова:** метанол, гидраты, ингибитор, раствор метанол-вода, плотность водных растворов.

## COST OPTIMIZATION METHANOL FOR CALCULATION MULTIPHASE HYDROCARBON SYSTEMS

**Paranuk Arambii Aslanovich**  
Kuban State Technological University (KubGTU) Krasnodar

**Abstract.** We consider a holistic approach to the valuation rate of hydrate inhibitors with the generalization of the previous experience of research and development. Methanol, or methyl alcohol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) - is lower monatomic alcohol, which is a clear liquid with a characteristic pungent odor. Its molecular weight ( $m$ ) 32,04; be mixed with water in all proportions. Methanol is used in the composition of natural gas which is present serevodород and carbon dioxide. Highlighted shortcomings in the use of inhibitors based on methanol and examined the reasons for its widespread use in enterprises of gas and oil industry in Russia.

**Key words:** methanol, hydrate inhibitor, a solution of methanol-water, the density of aqueous solutions.

К настоящему времени в газовой отрасли имеется ряд руководящих документов [1-5], методических указаний и др., регламентирующих использование ингибиторов гидратообразования на газодобывающих предприятиях. Однако они не обеспечивают в должной мере единого подхода к нормированию расхода (потерь) метанола из-за различий в методическом подходе к расчету тех или иных статей потерь (как технологического, так и нетехнологического характера), а также термодинамических свойств ингибиторов гидратообразования. В связи с этим расход на газодобывающих предприятиях может быть завышен на 20-35% за счет нерационального использования, хранения и транспортировки реагентов. Кроме того, с появлением но-

вых экспериментальных данных по фазовым равновесиям в системе «газ - гидрат - водные растворы ингибиторов гидратообразования - вода» и внедрением новых технологических схем (в т.ч. и рециркуляционных) подготовки газа возникает необходимость в своевременной корректировке методики нормирования расхода метанола. В связи с этим необходима разработка целостного подхода к нормированию расхода ингибиторов гидратообразования с обобщением опыта предшествующих научно-технических разработок.

Более интересная ситуация возникает с индификацией гидратообразования в газовых сетях осушенного газа (природного газа, прошедшего промышленную и заводскую обработку): здесь гидратообразование принципиально возможно

непосредственно из газовой фазы, содержащей пары влаги (т.е. при полном отсутствии жидкой водной фазы в трубопроводах). Возможность процесса гидратообразования в рассматриваемом случае определяется не только исходя из термобарических условий, но и по остаточной влажности газа (либо по измеряемой приборами конденсационного типа величине точки росы газа по влаге). При этом следует иметь в виду, что температура точки росы газа по влаге (а при температуре ниже 0 °С - имеется в виду точка росы по переохлажденной воде) не совпадает с температурой начала выделения газогидратной фазы, причем разница между этими точками росы газа составляет обычно 4-6 °С при давлении в газопроводе 5-7 МПа. Наиболее реально возникновение подобной ситуации, т.е. отложения гидратов, на головных участках магистральных газопроводов северных месторождений. Здесь критерий возможности выделения из газа твердой газогидратной фазы вполне может быть расчетным, исходя из данных по двухфазному равновесию газ с парами воды - газовые гидраты.

Выше было изложено о диагностике на начальном этапе гидратообразования по давлению (р) и температуре (Т) которые являются необходимыми условиям технологического участка, а также компонентному составу и влажностью газа. В то же время по этим исходным данным при наличии оптимальных математических моделей, описывающих весь комплекс начиная с системы сбора до УКПГ газа, и программного обеспечения, реализующего эти модели на ЭВМ, оказывается возможным определение как динамики, так и месторасположения участков гидратоотложения. При этом в качестве косвенных признаков процесса гидратоотложения целесообразно использовать динамику изменения во времени таких расчетных величин, как эффективные коэффициенты гидравлического сопротивления и теплообмена, гидродинамической эффективности технологического участка и пр.

Следует, однако, отметить, что на многих практически важных случаях удается достаточно надежно диагностировать и контроли-

ровать процесс отложения гидратов и более упрощенными способами. Наиболее простой и вполне традиционный способ контроля за наличием отложений гидратов на заданном технологическом участке (например, в шлейфах или в теплообменниках установки НТС) - это контроль за перепадом давления на рассматриваемом участке. При возникновении перепада  $\Delta p$  выше «порогового» значения  $\Delta p$  и дальнейшем его увеличении, т.е. при  $\Delta p > (1,5 \div 2)\Delta p$ , может быть сделан вывод о нарастании гидравлического сопротивления технологического участка за счет процесса отложения гидратов на стенках труб и аппаратов. В качестве датчика перепада давления в аппаратах следует использовать дифференциальный манометр.

Данный способ в своей простейшей форме, однако, имеет и ряд существенных недостатков: сохраняется вероятность закупорки импульсных трубок дифференциального манометра; увеличение перепада давления может быть связано не только с гидратообразованием, но и с другими видами загрязнений (например, со смоло-парафиноотложениями); величина технологически допустимого перепада давления также связана и с другими показателями технологического процесса (расходом газа, его температурой, изменением величины уноса жидкой фазы с предыдущего технологического участка и т.п.). Поэтому специалистами отрасли были предложены технические решения, направленные на устранение отмеченных расположения участков образования гидратов. При этом в качестве косвенных признаков процесса образования гидратов целесообразно использовать динамику изменения во времени таких расчетных величин, как эффективные коэффициенты гидравлического сопротивления и теплообмена, гидродинамической эффективности технологического участка и пр.

Повсеместное использование метанола в качестве ингибитора гидратообразования на газодобывающих предприятиях России обусловлено следующими показателями:

1) Относительно низкая цена по сравнению с другими ингибиторами гидратообразования, широко развитой промышленной базой.

Производство метанола может быть развернуто непосредственно в местах потребления - газовых промыслах;

2) Высокая технологичность процесса ввода и распределения метанола в требуемые участки технологической цепочки; нет необходимости в создании блока по приготовления реагента, что, например, является характерной особенностью применения других ингибиторов не электролитов;

3) Самые высокие показатели среди всех известных ингибиторов антигидратной активностью, сохраняющей даже свои свойства при низких температурах;

4) Очень низкая температура замерзания концентрированных растворов метанола и исключительно малая их вязкость даже при очень высоких отрицательных температурах порядка около  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

5) Малая растворимость метанола в нестабильном конденсате, особенно при контакте нестабильного газового конденсата с отработанным (насыщенным) водным раствором метанола, концентрацией менее 50% массы;

6) Некоррозионность метанола и его водных растворов;

6) Наличие достаточных простых технологических схем регенерации отработанных растворов;

7) Принципиальной проработанностью в настоящее время вопросов утилизации и захоронения промышленных стоков, содержащих метанол, в связи с постоянно возрастающими требованиями к охране окружающей среды;

8) Высокой эффективностью реагента не только для предупреждения гидратообразования, но и при ликвидации возникающих при нарушениях технологического режима несплошных гидратных пробок (отложений) в промысловых коммуникациях (скважинах, шлейфах, коллекторах, аппаратах воздушного охлаждения, теплообменном оборудовании). Взамен чистого метанола практически с той же антигидратной эффективностью можно использовать технические сорта, а также его водные растворы. В соответствии с выше перечисленным, имеется целый ряд позитивных

моментов, делающих привлекательным использование в качестве ингибитора гидратообразования концентрированного метанола и его водных растворов, а в некоторых случаях и составов на его основе, особенно в сложных условиях газовых и газоконденсатных месторождений севера Тюменской области, Красноярского края и п-ова Ямал.

Однако использование ингибиторов на основе метанола имеет ряд серьезных недостатков, к которым прежде всего относятся.

1) Высокая токсичность (как при действии паров, так и при попадании на кожные покровы и внутрь организма), а также высокая пожароопасность;

2) Выпадения солей при смешивании с сильно минерализованной пластовой водой и, как следствие, солеотложения в промысловых коммуникациях;

3) Ускоренный роста кристаллогидратов в присутствии разбавленных водных растворов метанола недостаточной концентрации для предупреждения гидратов;

4) Высокая упругость паров метанола (нормальная температура кипения  $\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), связанная с этим его очень высокая растворимость в сжатом природном газе и, соответственно, повышенный удельный расход метанола. Как правило места ввода метанола определяются таким образом, чтобы температура и давление в них было выше точки гидратообразования, что приводит к неоправданному расходу метанола. Бывают случаи, когда метанол вводится значительно выше по течению, и в больших количествах, чем это необходимо. Это, помимо лишних его затрат, а также приводит к увеличению энергетических потерь, связанных с транспортировкой до точек ввода.

В связи с этими проблемами, возникает задача оптимизации схемы ввода метанола, которая может быть сформулирована следующим образом:

Точки ввода метанола должны располагаться в началах шлейфов, при движении газа по которым, температура и давление переходят через точку образования гидратов. Поэтому, после гидравлического расчета давлений в уз-

ловых точках сети и расходов на ее звеньях, должен быть произведен:

Задача предназначена для контроля состояния газосборной сети промышленных трубопроводов при образовании гидратов на внутренних поверхностях труб. В результате решения вычисляются температуры и давления газа в промежуточных узлах сети, по которым можно проверять условие гидратообразования, а также коэффициенты гидравлического сопротивления звеньев сети, по увеличению которых можно сделать вывод о наличии гидратов. В данной работе представлена математическая модель процесса.

Свойства газовых гидратов зависят от их состава и кристаллической структуры. В настоящее время известно 35 видов молекул, образующих гидрат структуры I, и 65 видов молекул, образующих гидрат структуры II. Все эти молекулы, а также некоторые крупные молекулы, размер которых не позволяет образовать устойчивый индивидуальный гидрат, могут входить в смешанные гидраты.

Последние годы для изучения свойств газовых гидратов используются новейшие инструментальные методы, исследования на молекулярном уровне: рентгенокопия, ядерный магнитный резонанс, протонный ядерный магнитный резонанс, метод ИК-спектроскопии, квантовая микрокалориметрия и т.д. Метод ИК-спектрометрии позволил оценить уровень взаимного влияния молекул в газовых гидратах («хозяин» - «гость», «хозяин»-«хозяин», «гость» - «гость»). Это влияние, связанное с колебательным, вращательным и диффузным движением молекул в гидрате газа, приводит к расширению спектральных линий отдельных молекул, появлению дополнительных спектральных линий. В частности, показано, что у большого числа газовых гидратов спектральные характеристики молекул - «гостей» практически не деформированы.

Методы парамагнитного резонанса (ЯМР и ЭПР) имеют огромное значение в цикле исследования свойств газовых гидратов. Он основан на изучении резонансных характеристик образца гидрата в системе энергетических

уровней которого под действием переменного магнитного поля происходят квантовые переходы.

ЯМР и ЭПР методы изучения гидратов позволили с большой точностью определить величины спин-спиновых и спин-решеточных взаимодействий, определить характер релаксационных процессов в газогидрате и их зависимость от  $p, T$  условий, а также позволяют судить о различных дефектах, тепловых колебаниях, диффузии и вращения молекул в гидрате, проводить идентификацию молекул - «гостей» в гидрате, определять их концентрацию.

Методом диэлектрической релаксации изучена внутренняя динамика газогидратов, связанная с электрическими характеристиками (мультипольность) молекул газа и воды; выявлены релаксационные временные постоянные молекул воды и газа, значения которых зависят от электрической мультипольности, полярности, взаимной геометрии поля ячейки и молекул - «гостей» и т.п. Представляет интересный факт четкого разделения полос поглощения воды и газа, которые обычно сильно отдалены друг от друга.

С помощью нейтронографии можно изучить динамику молекул в гидратах, получить характеристики колебательного, вращательного и трансляционного движения молекул в газогидрате. Результаты нейтронографии и ИК-электрметрии хорошо совпадают.

Метод электронографии основан на изучении дифракции электронов на образцах гидратов.

В результате использования указанных методов определены некоторые основополагающие свойства газогидратов ряда газов, которые кратко приведены в данной главе.

В результате многочисленных исследований, диэлектрическая проницаемость гидратов неполярных газов-гидратообразователей, какими являются углеводороды, при низкочастотных измерениях определяется зависимостью

$$\epsilon_0 = \epsilon_\infty + \frac{14900}{T} \approx 3 + \frac{14900}{T},$$

где  $T$  – температура, К.

С увеличением частот измерения до величин, соответствующих скорости реориентации молекул воды, диэлектрическая постоянная отклоняется от своего значения пропорционально удельной электропроводности. Электропроводность ( $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ), измеренная при частотах выше зоны дисперсии составляет около

$$8,85 \cdot 10^{-12} (\epsilon_0 - \epsilon_\infty) / \tau,$$

где  $\tau$  - ориентационное время релаксации, в сек. Величина  $\tau$  зависит от характеристики молекул-гидратообразователей. Для не дипольных молекул при  $0^\circ\text{C}$  величина  $\tau$  составляет около  $10^{-5}$  с с соответствующим вкладом порядка  $5 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$  в электропроводность при частоте 1 МГц и выше. При низких частотах измерений, когда электропроводность определяется миграцией естественных ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$  величина электропроводности гидрата на несколько порядков ниже биполярной электропроводности. Наличие в составе гидратов кислых компонентов сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) или сорби-рованных ионов солей, значительно увеличивает их электропроводность, что следует учитывать при определениях этих величин в природных гидратах газогидратных залежей.

В результате определены и уточнены структурные формулы гидратов простых и сложных газов. Установлено что при температуре равной  $0^\circ\text{C}$  размеры элементарной ячейки гидратов структуры I изменяются в пределах 1,197-1,215 нм, а структуры II-1,714-1 757 нм. Измерения параметров решеток гидратов структур I и II при температурах до минус  $100-160^\circ\text{C}$  и интерпретация их на интервал положительных температур, показали, что коэффициент термического расширения гидратов практически такой же, как у льда ( $9,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}/^\circ\text{C}$ ).

Гидраты газов, полученные из пресной воды, обладают в 10-15 раз более высокой электропроводностью, чем льда ( $10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ). Гидраты, полученные из растворов солей с минерализацией 10 г/л, имеют электропроводность в 3-4 раза ниже электропроводности исходного раствора. Для раствора минерализации 50 г/л это отличие составляет всего 40-70%.

В области очень низких температур (ниже минус  $220^\circ\text{C}$ ) гидраты некоторых газов при микроволновых измерениях характеризуются интенсивным всплеском диэлектрического поглощения за счет переориентации «гостевых» молекул.

Пластично упругие свойства гидратов газов изучены недостаточно из-за отсутствия специальных инструментальных методов и сложности их исследования. При изучении морфологии кристаллогидратов газов автором отмечена высокая упругость гидрата метана: спиральный кристалл гидрата метана, выращенный параллельно плоской гидратной поверхности, устойчиво выдерживал колебательные нагрузки от собственной массы спирали при соотношениях длина -диаметр 1500. Диаметр нити кристаллогидратной спирали при этом составлял  $5 \cdot 10^{-5}$  м.

Установив зависимость скорости звука в изотропной среде от адиабатического значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, Вэлли вычислил отношение продольной скорости звука в гидратах метана и пропана к скорости звука во льду. Эти соотношения были соответственно 0,939-для гидрата метана ( $\text{CH}_4 \cdot 5,75\text{H}_2\text{O}$ ) и 0 945 - для гидрата пропана ( $\text{C}_3\text{H}_8 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ ). Твердость этого гидрата изучена слабо, но полученные результаты Называют, что она превышает твердость льда примерно в 2 раза больше.

Скорость прохождения сейсмволн через пористую среду, насыщенную, гидратами на 60-100% выше, чем через аналогичную среду, ненасыщенную гидратами. Кристаллогидраты газов характеризуются высокой упругостью, низкой проницаемостью и теплопроводностью.

Метанол, или метиловый спирт ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), является низшим одноатомным спиртом, который представляет собой прозрачную жидкость с характерным резким запахом. Его молекулярная масса (m) 32,04; может смешивается с водой в любых пропорциях. Физические параметры метанола при нормальных условиях приведены ниже.

Молекулярный вес	32,04
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,8100
Вязкость, мПа·с	0,817
Температура кипения, °С	64,7
Температура плавления, °С	-97,68
Теплота парообразования, ккал/моль	8,94
Теплота сгорания, ккал/моль	
жидкого	173,65
газообразного	177,40

При стандартных условиях метанол имеет незначительное давление насыщенных паров. При повышении температуры давление насыщенных паров резко возрастает. При возрастании температуры с 10 до 60 °С давление насыщенных паров повышается от 54,1 до 629,8 мм рт. ст., а при 100 °С оно составляет 2640 мм рт. ст. углеводородами. Метанол хорошо поглощает пары воды, двуокись углерода и некоторые другие вещества. Уникальность метанола заключается в том, что он хорошо растворяет большинство известных газов и паров. Так, растворимость неона, кислорода, гелия, аргона, в метаноле при стандартных условиях выше, чем растворимость их в бензоле, этиловом ацетоне, спирте, циклогексане и т.д. Растворимость всех этих газов при разбавлении метанола водой уменьшается. Высокой растворимостью газов широко пользуются в промышленности, применяя метанол и его растворы в качестве поглотителя для извлечения примесей из технологических газов.

Изменение плотности метанола в зависимости от температуры показано в рис. 1.

Свойства растворов метанола в смеси с другими веществами могут значительно отличаться от свойств чистого метилового спирта, поэтому рассмотрим изменение свойств системы метанол-вода. Температура кипения водных растворов метанола будет закономерно увеличиваться при повышении концентрации воды и давления. Температура затвердевания растворов по мере увеличения концентрации метанола понижается: -54 °С при содержании 40% CH<sub>3</sub>OH и -132°С при 95% CH<sub>3</sub>OH.

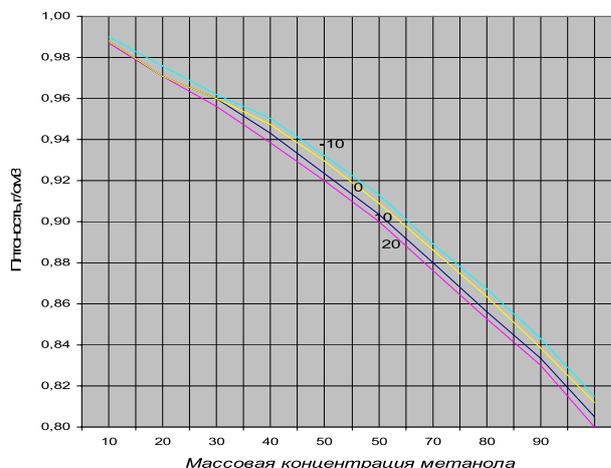


Рис. 1. Изменение плотности растворов метанола - вода.

Плотность водных растворов метанола может увеличиваться при понижении температуры и почти равномерно будет уменьшаться с увеличением концентрации метанола от плотности воды до плотности спирта при измеряемой температуре. Зависимость вязкости от концентрации метанола имеет максимум при содержании CH<sub>3</sub>OH около 40% при всех исследованных температурах. В точке максимума вязкость раствора больше вязкости чистого метанола.

Метанол может смешиваться во всех отношениях со значительным числом органических соединений. Со многими из них он образует азеотропные смеси -это растворы, которые могут перегоняться без изменения состава и температуры кипения, т.е. без разделения; К настоящему времени известно свыше 100 веществ, в числе которых имеются и соединения, обычно присутствующие в метаноле-сырце. К этим веществам, например, относятся метилацетат, метилпропионат, метилацетат, метилэтилкетон, ацетон, и некоторые другие. Необходимо отметить, что азеотропные смеси с содержанием таких соединений, как метилпропионат, пропилформиат, изобутилформиат, метилэтилкетон и ряд других имеют температуру кипения, близкую к температуре кипения чистого метанола (62-64,6 °С).

### Выводы

Метанол сочетает свойства очень слабого основания и еще более слабой кислоты, что обусловлено наличием алкильной и гидроксильной групп. Он также постоянно рекомендуется как ингибитор гидратообразования и на вновь проектируемых месторождениях п-ова Ямал. Метанол используется на Оренбургском, Кошехабльском ГКМ, и Астраханском ГКМ, в составе природного газа которых присутствует сероводород ( $H_2S$ ) и диоксид углерода, а также на большинстве ПХГ, ГРС и шельфовых ГКМ.

Повсеместное использование метанола в качестве ингибитора гидратообразования на газодобывающих предприятиях России, обусловлено следующими причинами:

- относительно низкой стоимостью (по сравнению с другими ингибиторами гид-

ратообразования), а также широко развитой промышленной базой. Производство метанола может быть развернуто непосредственно в местах потребления -газовых промыслах;

- высокой технологичностью процесса ввода и распределения метанола в требуемые участки технологической цепочки в результате чего отпадает необходимость в блоке приготовления реагента, что например, является характерной особенностью применения ингибиторов неэлектролитов;
- наивысшей среди известных ингибиторов антигидратной активностью, сохраняющейся даже при низких температурах;
- очень низкой температурой замерзания концентрированных растворов метанола и исключительно малой их вязкостью даже при температурах ниже  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Список литературы

1. Липко А.Н., Бырко В.Я., Тетерин Г.Э., Дылюк А.Г. Определение расходов газа в газосборной сети от скважины до УКПГ // Газ. пром. 2003. №12. С. 63-64.
2. Вяхирев Р.И., Коротаев Ю.П., Кабанов Н.И. Теория и опыт добычи газа. М.: Недр, 1998. 112 с.
3. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин. М.: ООО «Недра - Бизнесцентр», 2002. 632 с.
4. Булатов А.И., Проселков Ю.М. Морские нефтегазовые сооружения. Краснодар: Просвещение-ЮГ, 2006. 412с.
5. Истомина В.А., Квон В.Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. 263 с.
6. Зиновьев В.В., Басниев К.С., Будзуляк Б.В. Повешение надежности и безопасности эксплуатации подземных хранилищах газа. М.: ООО «Недра»-Бизнесцентр», 2005. 412 с.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ КАЧЕСТВА СИСТЕМ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ

**Балабанов Иван Викторович**

Московский государственный технический университет  
радиотехники, электроники и автоматики

05.02.23

ivan-balabanov@mail.ru

**Аннотация.** исследование методов анализа и оптимизации систем подвижной связи для обеспечения непрерывной доступности голосовых услуг и информационных сервисов при заданных параметрах качества на требуемой территории.

**Ключевые слова:** телекоммуникации, связь, качество.

## STATE OF TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS WITH QUALITY SUPPLY ANALYZE

**Balabanov Ivan Viktorovich**

Moscow State Institute of Radio-engineering Electronics and Automation

**Abstract.** investigation of method's analyses and optimization global and universal systems for mobile communications. There are continuous voice and information's services with fixed KPI in the location.

**Key words:** analyze and optimization, mobile, telecommunications, quality.

### Введение

В настоящее время телекоммуникационное оборудование обладает высокой степенью интеграции в повседневную жизнь. Использование его обусловлено в первую очередь обеспечением связи между пользователями, пользователем и машиной с целью получения информации. Одними из таких программно-аппаратных исполнений являются глобальные системы связи (GSM, UMTS, LTE), радиолокации и позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) [1-5].

Поддержание работоспособности и обеспечение качества такого рода оборудования осуществляется посредством анализа состояния сети, поиска проблем и ее оптимизации. Основная задача – выполнение требований лицензий на предоставляемые сервисы, а перспективное направление работ по обеспечению качества – увеличение ключевых показателей эффективности телекоммуникационных систем KPI (Key Performance Indicators).

Цель данной статьи состоит в исследовании методов анализа и оптимизации систем подвижной связи для обеспечения непрерывной доступности голосовых услуг и информационных сервисов при заданных параметрах качества на требуемой территории.

### Показатели качества систем связи

Существует не так много практических подходов к оптимизации подвижной связи, несмотря на множество математических моделей, и методов решения уравнений с большим количеством переменных. Как и любая система, подвижная связь настраивается посредством установки большего количества сложно связанным между собой параметров, прямо или косвенных влияющих на качество предоставляемых услуг. Функционирование и исправность контролируется путем мониторинга ключевых индикаторов качества [6-7].

Определение ключевых показателей эффективности относится к первоначальному этапу при подходе к вопросам оптимизации

и контроля системы. Эти параметры должны однозначно отображать состояние сети, в наглядном виде отражать ощущения абонента, удовлетворение качеством и доступностью предоставляемых ему услуг. КРІ в видении подвижной связи представлены в качестве численных значений, описывающих количество событий, степени использования ресурсов, вариантов и режимов работы.

Наиболее важными параметрами при использовании голосовых услуг подвижной связи, поверхностно, но достаточно отображающими качество связи, является доступность речевых сервисов по времени и месту, а также непрерывность. К таким параметрам относят количество неуспешных соединений (CunSR - Call Unsucsecc Rate) и количество неуспешных установлений соединений (CunSSR - Call Unsucsecc Setup Rate).

Большинство сетей мобильной связи логически представляют собой совокупность секторов с приемопередатчиками, обслуживающих некоторую территорию, которую принято называть сотами. Каждая сота может включать в себя несколько несущих, которые используют абоненты для доступа к сети. При дифференцировании сети подвижной связи все элементы радио части системы сходятся к сектору, наименьшему элементу сети, для которого на практике и высчитываются ключевые параметры эффективности. Совокупность этих показателей для всех секторов сети оператора определяет ключевые показатели качества сети, соответствие которые должно удовлетворять лицензии, получаемой на право предоставления телекоммуникационных услуг, согласно «РД 45.254-2002 Сети сотовой подвижной связи. Нормы на показатели качества услуг связи и методика проведения их оценочных испытаний» [8].

Причиной неуспешных событий могут быть различные проблемы, как в радио, так и в коммутационной части подсистемы. Однозначное и быстрое определение состояния необходимо для своевременной фиксации проблем. Оборудование, контролирующее узлы подвижной связи, имеет возможность

собирать статистику по множеству индикаторов, определяет уровни сигнала мобильных станций, интерференции, дальности нахождения абонента от приемопередатчиков, этапы соединений на которых происходили события.

Вывод оптимальных формул из сочетаний счетчиков позволит однозначно определить участки и параметры сети, требующие оптимизации. Рекомендации по изменению логических и физических настроек, таких как мощностей передатчиков, углов и азимутов антенн, условий смены обслуживающих сот, позволяют удаленно и в короткий срок вносить изменения в параметры сети. Систематическое проведение оптимизационных работ посредством анализа статистики и изменения логических параметров позволит сократить средства на обслуживание существующих ресурсов и создания новых, экономически не оправданных узлов связи.

Стоит обращать внимание на прикладные аспекты статистических данных. Важно учитывать, что статистика в ночное время менее информативна, по той причине, что при двух вызовах, одно из соединений абонентов могло разорваться, в результате чего, процент успешных соединений составит 50%. Для чего имеет смысл вывод средневзвешенных значений формул, в зависимости от количества абонентов. В таких случаях можно не учитывать участки сети с трафиком менее 1 Эрланга. Помимо этого, при анализе статистики, целесообразно обрабатывать большой временной интервал, так как всплеск значений индикаторов может носить разовых характер. Разовое скопление абонентов в одном месте, запрашивающих сверх имеющихся ресурсов сети на данной территории, однозначно не указывает на необходимость добавления каналов или стройку дополнительных базовых станций, так как это экономически не выгодно. Для таких случаев предусмотрены и используются мобильные базовые станции. При достаточном количестве статистических данных рекомендуется собирать и обрабатывать данные, относящиеся к часу с наибольшей трафиковой нагрузкой,

это время называется ЧНН (час наибольшей нагрузки).

### **Вопросы оптимизации сетей подвижной связи**

Основной задачей сбора и обработки статистических данных является поиск участков сети, которые требуют модернизации или перенастройки из-за низких показателей качества. Существующие у операторов сотовой сети центры обработки аварий фиксируют перегревы, отсутствие питания, потерю трафиковых каналов. Зачастую эти меры не определяют зависания и программные проблемы оборудования. Отсутствие трафика на секторе можно определить только за счет анализа статистических данных. Посредством анализа статистики, можно детектировать большинство проблем сетей подвижной связи, предлагая различные варианты их решения.

Несмотря на доступность статистических данных для оптимизации систем подвижной связи, существует и имеет важную роль проведение объездов зоны покрытия для поиска локальных мест с пониженным качеством предоставляемых услуг, их доступностью, а так же для контроля правильности подключения антенно-фидерных устройств к приемопередатчикам и др.

### **Основные проблемы сетей подвижной связи и методы их решения**

Недоступность сети подразумевает работы направленные на:

- контроль работоспособности оборудования;
- использование 900 диапазона (GSM сети);
- увеличение мощности приемопередатчиков;

- использование антенн с различным углом ДН;
- строительство новых станций и др.

Низкое качество связи требует проведения работ по:

- корректировке частотно-территориального плана сети (ЧТП);
- включению современных кодеков кодирования речи (AMR, EFR и др.);
- увеличению ресурсов сети на одного абонента;
- строительству новых базовых станций;
- поиску источников интерференции и др.

Отказы и обрывы обслуживания (не по радио причинам) требуют:

- оптимизации логических параметров сети;
- контроля работы транспортной сети;
- контроля загрузки оборудования;
- увеличения количества каналов (увеличение приемопередатчиков) и др.

### **Заключение**

Рассматривая системы подвижной связи важно помнить об экономической составляющей. Планирование, строительство и обслуживание дорогостоящего оборудования требует больших финансовых и человеческих затрат. Необходимо уделить должное внимание вопросам оптимизации сетей подвижной связи, посредством изменения логических параметров устройств и физической конфигурации базовых станций и антенн, с целью повышения качества и равномерного распределения нагрузки сети. Правильно настроенная сеть мобильной связи позволит сэкономить средства на ее последующую эксплуатацию и оптимизацию, при этом, улучшив ключевые показатели эффективности, что сделает ее предпочтительней относительно других видов связи.

**Список литературы**

1. GSM. <http://ru.wikipedia.org/wiki/GSM>. (дата обращения: 19.09.2011).
2. GSM core network. <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 19.09.2011).
3. UMTS. <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 19.09.2011).
4. 3GPP Long Term Evolution. <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 19.09.2011).
5. Базовая станция. <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 19.09.2011).
6. Попов, В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И.Попов. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 292 с.
7. Мамчев, Г.В. – Основы радиосвязи и телевидения. Учебное пособие для вузов / Г.В. Мамчев. – М: Горячая линия – Телеком, 2007. – 416 с.
8. РД 45.254-2002. Сети сотовой подвижной связи. Руководящий документ отрасли. – М., 2002. – 31 с.

## ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС С УЧЕТОМ ЭМС

**Грачев Николай Николаевич**

К.т.н., профессор, Московский институт  
электроники и математики (МИ-ЭМ НИУ ВШЭ)  
nngachev@mail.ru

**Лазарев Дмитрий Владимирович**

К.т.н., доцент, Московский институт  
электроники и математики (МИЭМ НИУ ВШЭ)  
qsk@mail.ru  
05.12.04

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы оптимизации проектирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости. В зависимости от наличия и вида ограничений, количества этапов в модели, ее вида находят применение аналитические или численные методы математического программирования. Рассматриваются и анализируются алгоритмы оптимизации на графах и сетях.

**Ключевые слова:** Электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства, численные методы, математическое программирование, методы оптимизации.

## QUESTIONS OF OPTIMIZATION OF DESIGN WITH REGARD TO EMC OF RED

**Grachev N.N., Lazarev D.V.**

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

**Abstract.** The article deals with the optimization of radio-electronic means проектирования based EMC. Depending on the availability and type of constraints, number of phases in a model of its kind are used analytical or numerical methods in mathematical programming. Considered and analyzed optimization algorithms on graphs and networks.

**Key words:** Electromagnetic compatibility and radio electronics, numerical methods, mathematical programming and optimization techniques.

**П**од оптимальным решением задачи проектирования понимают такое решение (управление), которое минимизирует или максимизирует некоторый критерий (целевую функцию, функцию качества) при заданной системе ограничений. Критерий  $S$  – это некоторая функция (функционал) от принятого решения (управления  $U$ ), которая позволяет количественно оценить целесообразность принятого решения. В нем должна быть формализована цель проектирования.

Методологически процесс проектирования можно разделить на следующие этапы: составление математической модели проектирования РЭС, выбор критерия эффективности, определение информации, необходимой для исследования модели, и исследование матема-

тической задачи для отыскания оптимального решения.

Одной из основных является задача выбора оптимального сочетания проектных параметров. К ней можно отнести и проблему проектирования РЭС с учетом ЭМС. Повышение помехоустойчивости требует дополнительных затрат, в связи с чем и возникает задача выбора минимально необходимого набора способов и устройств, предназначенных для повышения помехоустойчивости РЭС. Кроме этой задачи при проектировании РЭС возникает большое число вопросов, которые приходится решать с учетом противоречивых требований (увеличение пропускной способности при снижении стоимости; увеличение точности измерения параметров сигналов при сокращении време-

ни измерения и т.д.) при сохранении высоких показателей помехоустойчивости РЭС.

При использовании методов оптимизации для решения технических задач приходится формировать большое количество вариантов технических устройств, чтобы в последующем их сравнивать. Поэтому применение традиционных методов проектирования в этом случае затруднено из-за их большой громоздкости. Более того, при этом обычно и не требуется детальная разработка узлов до степени, позволяющей их изготовлять. В связи с этим процесс проектирования РЭС автоматизируется и применяются современные ЭВМ.

Блок проектирования РЭС с учетом ЗМС представляет собой математическую модель процесса проектирования, позволяющую по заданным основным характеристикам этого РЭС и параметрам, определяющим ЭМС (отражающим в конечном итоге уровень помехоустойчивости и помехозащищенности) вычислить все необходимые для последующего анализа параметры РЭС, спроектированного оптимальным образом. В зависимости от объема информации, которую необходимо получить в результате проектирования, блок проектирования может представлять собой либо набор небольшого числа простейших формул, либо сложнейший алгоритм.

В общем случае блок проектирования представляет собой иерархическую структуру задач проектирования, вверху которой находится проектирование РЭС в целом, последующие уровни – проектирование блоков, устройств и ячеек. При этом используют стандартные приемы расчленения задач оптимизации на более простые подзадачи.

Нужно отметить, что ряд задач оптимизации может решаться и внутри уровня. Само проектирование можно подразделить на три этапа: выбор принципиальной основы (схемы) технического устройства, проведение расчетов для определения типа и размеров деталей и узлов, а также компоновка технического устройства; причем, эти этапы могут повторяться как на разных стадиях проектирования (этапы предэскизного, эскизного и технического про-

ектирования), так и внутри каждого из этих этапов.

Наиболее сложен первый этап проектирования РЭС, так как он основан на комбинациях существующих принципов, идей, схем, узлов при соблюдении определенных логических связей между ними. При этом то, что довольно легко выполняется опытным конструктором весьма трудно описать алгоритмом, реализуемым в ЭВМ.

Построение модели второго этапа проектирования обычно более просто, чем других этапов, так как подавляющее большинство стадии этого процесса достаточно хорошо формализовано и имеются математические зависимости позволяющие произвести необходимый расчет параметров модели.

Компоновка РЭС состоит в пространственном размещении его блоков при выполнении определенных ограничений (например, массо-габаритных) и в стремлении к выполнению некоторых условий (например, минимум расстояний между отдельными блоками и т.д.). В этом случае задача может сводиться к упрощенной геометрической путем представления компонентов РЭС в форме оболочек простейших очертаний. В более сложных случаях приходится изображать область в поле рецепторов с помощью двоичного кода. Третий этап обычно более прост, чем первый, и более сложен, чем второй.

Основная трудность, с которой приходится сталкиваться при построении блока проектирования, состоит в том, что существует огромное количество схем построения РЭС, как правило, оно превышает сотни тысяч вариантов. Расчет всех возможных сочетаний, даже если расчет каждого из них достаточно прост, представляет огромные технические трудности даже для современных высокопроизводительных ЭВМ. Для преодоления этих трудностей используют теоретические и эвристические методы и приемы. Тщательный анализ основных принципов функционирования технических устройств и опыта их проектирования позволяет в ряде случаев установить определенные логические правила конструирования, которые

могут выражаться в невозможности сочетания определенных типов узлов или, наоборот, в целесообразности некоторых сочетаний и т.д. Применение некоторых из этих правил может существенно сократить количество рассматриваемых вариантов или хотя бы установить рациональный порядок их анализа, когда в первую очередь будут рассматриваться наиболее эффективные варианты. Эвристические методы состоят в формализации опыта проектирования, которая может осуществляться как в виде логических правил типа указанных выше (но в данном случае отсутствуют строгие их обоснования), так и во введении всякого рода эмпирических формул, порядка действий, оценок по эмпирическим правилам и т.д. При формировании различных вариантов построения РЭС обычно можно вводить существенные упрощения и получать простые алгоритмы. Однако надо помнить, что при упрощении модели можно “выплеснуть ребенка” и исключить влияние на отдельные процессы тех параметров, которые исследуются.

Критерий или целевая функция должен отвечать следующим основным требованиям: он должен быть представительным, критичным к исследуемым параметрам, по возможности простым, включать в себя результаты всех основных существенных процессов, происходящих в РЭС.

Представительность критерия означает оценку основной, а не второстепенных, задач проектирования. Несмотря на очевидность этого требования, при решении практических задач возникают ошибки, связанные с тем, что не выясняется основная цель оптимизации и поэтому неправильно формируется критерий.

Критичность к исследуемым параметрам состоит в значительных изменениях числового значения критерия при сравнительно малых изменениях исследуемых параметров. Высокая критичность в ряде случаев облегчает проведение математических исследований.

Как правило, функционирование современных РЭС производится в сложной электромагнитной обстановке, параметры которой могут изменяться непредсказуемым образом.

По этой причине используется вероятностное описание работы РЭС и критерий является случайной величиной. В таких случаях обычно рассматривают математическое ожидание критерия и ищут его минимум или максимум. В тех случаях, когда дисперсия его велика, рассматривают и доверительные интервалы, чтобы оценить, в какой мере выбранное решение является гарантированным.

Основная постановка задачи оптимизации: оптимальным решением является такое, которое обеспечивает выполнение поставленной перед РЭС задачи при минимуме материальных затрат. Возможна обратная постановка: оптимальным решением является такое, которое обеспечивает максимум эффективности при фиксированных материальных затратах. Отсюда общей формой критерия при прямой постановке задачи исследования операций будет математическое ожидание материальных затрат (которые в общем случае выражаются в стоимости) при заданной эффективности (в данном случае она является ограничением), т.е.

$$\min S = \min M \left( \sum_{i=1}^N C_i \right) j; \mathcal{E} \geq \mathcal{E}_{\text{дон}} \quad (1)$$

В случае обратной постановки задачи общей формой критерия будет эффективность  $\mathcal{E}$  при заданных материальных затратах, которые являются ограничением, т.е.  $\max \mathcal{E}$ , (2)

Отметим, что не всегда есть необходимость в использовании критериев самого общего вида. В самом деле, если материальные затраты выражаются в однородных продуктах, то нет необходимости переходить к их стоимости, а можно ограничиться определением их количества, веса, объема и т.д. Общей формой критерия следует пользоваться тогда, когда более простые его формы не пригодны.

Выбор критерия – достаточно сложная задача, требующая в ряде случаев самостоятельных исследований и, в частности, анализа моделей более высоких классов.

Помимо ограничений, связанных с общей формой задач оптимизации, при решении практических задач приходится сталкиваться

и с другими видами ограничений. Ими могут быть ограничения на вес и габаритные размеры подсистем, ограничения по допустимым техническим характеристикам (например, на суммарную вероятность ложных тревог  $F_z$ ), вызванных совокупностью естественных и взаимных помех при работе РЛС и т.д. Эти ограничения связаны главным образом с тем, что рассматривается только часть общей модели и разорванные связи с другими частями заменяются ограничениями.

В зависимости от используемых математических методов ограничения могут усложнять или упрощать решение задачи.

После того как составлена модель проектирования, выбран критерий, определены ограничения и получена входная информация, необходимо найти оптимальное решение (план, программу). Решение этой задачи и составляет предмет математического программирования, которое не имеет ничего общего с составлением программ для ЭВМ.

Под управлением (программой) понимается определенный план действий, который может быть непрерывным, многоэтапным и одноэтапным. В первом случае управление представляет собой функцию независимой переменной, чаще всего времени. В частном случае задача сводится к отысканию параметров, определяющих эту функцию. Во втором случае ищется набор параметров, определяющих управление на каждом этапе. В третьей случае рассматривается только один этап и отыскивается набор параметров, характеризующих управление.

В зависимости от наличия и вида ограничений, количества этапов в модели, ее вида находят применение аналитические или численные методы математического программирования. К первым относятся дифференциальное и вариационное исчисление и принцип максимума Л.С. Понтрягина. Ко второй группе относится динамическое, линейное, нелинейное программирование, методы регулярного и случайного поиска.

Для использования аналитических методов необходимо, чтобы расчетная формула

критерия, ограничения и связи между координатами, управлениями и независимой переменной, а также начальные и конечные условия были представлены в форме функций, которые должны быть по крайней мере один раз дифференцируемыми и иметь конечное число точек разрывов. Для использования классических методов (дифференциального и вариационного исчисления) обязательно, кроме того, отсутствие ограничений. Если управление представляет собой набор чисел, то могут использоваться методы дифференциального исчисления, если управление – функция, то к задаче применимы методы вариационного исчисления. Для использования численных методов необходимо знать возможную область изменения управлений и чем область уже (чем больше ограничений), тем эффективнее применение численных методов.

В случае, когда имеются ограничения и управление является функцией независимых переменных, но модель представляет собой набор аналитических зависимостей, могут применяться принцип максимума Л.С. Понтрягина и методы, основанные на достаточных условиях В.Ф. Кротова [1].

Для исследования многоэтапных процессов используется динамическое программирование, которое формально может быть применено в любых случаях, и ограничено только возможностями используемой ЭВМ. Аналогичными свойствами обладает и дискретный принцип максимума, являющийся распространением принципа максимума Л.С. Понтрягина на дискретные процессы.

В случае, когда критерий представляет собой линейную функцию управлений, а ограничения являются набором линейных неравенств (уравнений) и процесс одноэтапный, то это – классическая задача линейного программирования, в ряде случаев к ней можно свести и многоэтапные задачи.

Если критерий и ограничения – нелинейные функции управлений, а процесс одноэтапный, мы приходим к задаче нелинейного программирования. Такие задачи могут решаться с использованием регулярных и случайных

методов поиска, применение поисковых методов ограничено в основном трудоемкостью расчетов.

К сожалению, хорошо разработанные аналитические методы мало пригодны для решения задач проектирования РЭС с учетом ЭМС. Это связано как с большой размерностью задач, так и с разрывным и неаналитическим характером функций, применяемых для описания критериев, ограничений и связей. Во многих практически интересных случаях эти задачи можно характеризовать линейной целевой функцией и линейными ограничениями, так что для их решения, вообще говоря, могли бы успешно применяться известные методы линейного программирования. Однако большая размерность обуславливает необходимость поиска более эффективных алгоритмов оптимизации, которые позволяли бы экономить вычислительные ресурсы ЭВМ и обеспечивать их гибкость по отношению к изменениям исходных данных. Плодотворной основой для построения таких алгоритмов могут служить их представления на сетях и графах [2].

Граф – это совокупность множества  $X$ , элементы которого называются вершинами, и множества  $A$  упорядоченных пар вершин, элементы которого называются дугами. Граф обозначается как  $(X, A)$ . Если направления дуг не задаются, то такой граф называется неориентированным. Неориентированные дуги называются ребрами.

Сеть – это не что иное, как граф, каждой дуге которого поставлены в соответствие одно или несколько чисел.

Ниже будут рассмотрены постановки задач проектирования РЭС с учетом ЭМС с использованием процедур оптимизации на графах или сетях. Ввиду ограниченного объема для более полного понимания излагаемого материала рекомендуем обратиться к работам [2,3].

Постановки задач оптимизации. Напомним ряд терминов теории графов.

01. Вершина и дуга инцидентны друг другу, если вершина является для этой дуги целевой или начальной точкой.

02. Две дуги инцидентны друг другу, если обе они инцидентны одной и той же вершине.

03. Паросочетанием графа называется некоторое множество его дуг, такое, что каждая вершина графа инцидентна не более чем одной дуге этого множества.

04. Покрытием графа называется некоторое множество дуг, такое, что каждая его вершина инцидентна по крайней мере одной дуге этого множества.

Как будет видно из дальнейшего изложения, отыскание паросочетаний и покрытий оказывается плодотворным при решении задач оптимизации РЭС с учетом с ЭМС. Проиллюстрируем четыре типа задач:

- Задача о покрытии максимальной мощности.
- Задача о паросочетании максимальной мощности.
- Задача о паре-сочетании с максимальным весом.
- Задача о покрытии с минимальным весом.

Пример 1. Пусть РЭС содержит  $k$  источников и  $l$  рецепторов. Построим граф, в котором каждый источник представляется вершиной и каждый рецептор также представляется вершиной. Таким образом, граф будет иметь  $m = k+l$  вершин. Соединим дугой вершину, соответствующую источнику, и вершину, соответствующую рецептору, в том случае, когда имеет место электромагнитная совместимость рассматриваемых средств. Производя такую процедуру с остальными вершинами, получим некоторое паросочетание. Это паросочетание графа представляет собой допустимое множество ЭМС -пар средств, которые могут работать, не мешая друг другу. Нас интересует поиск такого паросочетания этого графа, которое содержит наибольшее количество дуг, т.е. паросочетание максимальной мощности. Естественно, при малых  $m$  задача решается простым перебором всех возможных пар “источник-рецептор”. Однако при больших  $m$  задача – резко усложняется и ее решение становится проблематичным, особенно при использовании мини-ЭВМ. В то же время ис-

пользование алгоритма поиска паросочетания максимальной мощности [13] приводит к эффективным в вычислительном отношении процедурам, которые могут быть реализованы и на мини-ЭВМ.

**Пример 2.** Пусть в результате экспериментальных проверок ЭМО на объекте выявлена электромагнитная несовместимость  $M$  пар “источник-рецептор”. Для реализации ЭМС на объекте в нашем распоряжении имеется набор (комплекс) мер системотехнического и конструкторско-технологического характера. Набор мер ограничен, в то же время каждая из мер может быть применена к повышению ЭМС более чем одной пары “источник-рецептор”. Считается, что мы можем достаточно точно прогнозировать эффект от применения конкретной меры для повышения ЭМС каждой несовместимой пары “источник-рецептор”. Мы заинтересованы в максимизации общего эффекта от применения набора мер по повышению ЭМС. Возникает вопрос: каким образом может быть достигнут этот максимум? Пусть каждая мера и каждая несовместимая пара “источник-рецептор” представляются отдельными вершинами графа; соединим две соответствующие вершины дугой в случае, когда конкретная мера из комплекса мер использована для повышения ЭМС данной пары “источник-рецептор”. Каждая дуга при этом представляет возможный вариант использования меры из заданного комплекса мер. Присвоим каждой дуге  $\gamma$ -графа вес, равный величине эффекта от применения конкретной меры для данной несовместимой пары “источник-рецептор”. Мы можем максимизировать общий эффект от реализации мер повышения ЭМС, если назначение мер будет соответствовать паросочетанию графа с наибольшим общим весом. Иными словами, нужно решить задачу поиска паросочетания с максимальным весом.

**Пример 3.** Пусть заданы состав и номенклатура средств, входящих в систему, повышением помехозащищенности которой мы занимаемся. Каждое средство имеет свои характерис-

тики ЭМС. при работе в составе системы. В то же время возможны различные варианты сочетания средств, решающих в комплексе поставленную перед системой целевую задачу. Нужно спроектировать систему таким образом чтобы в нее входили по крайней мере по одному средству из заданной номенклатуры средств. Число допустимых для применения средств превышает количество возможных мест применения средств. Необходимо определить конкретный состав системы, включающий наименьшее число средств-претендентов и удовлетворяющий всем отмеченным выше требованиям.

Построим граф, в котором каждый вариант исполнения средства представляется вершиной и каждое конкретное место использования средства представляется вершиной. Пусть любое средство, которое мы отбираем для работы в составе системы, представляется дугой графа, соединяющей вершины, соответствующие данному средству и конкретному месту его использования. Любой набор средств, решающий поставленную перед системой функциональную задачу, соответствует покрытию этого графа. Набор средств с наименьшим числом средств и удовлетворяющий отмеченным выше требованиям соответствует покрытию графа с наименьшим количеством дуг, иными словами – покрытию минимальной мощности.

**Пример 4.** Пусть аналогично примеру 2 на объекте выявлена электромагнитная несовместимость  $M$  пар “источник-рецептор”. Для реализации ЭМС на объекте в нашем распоряжении имеется набор из  $N$  мер системотехнического и конструкторско-технологического характера. Размер затрат (стоимость реализации, трудоемкость осуществления, требуемое время) на осуществление ЭМС каждой конкретной пары “источник-рецептор” различен в зависимости от конкретных мероприятий, требуемых для ее реализации. Как с минимальными затратами обеспечить ЭМС для всех пар “источник-рецептор”?

Построим граф, в котором каждой паре “источник-рецептор” соответствует вершина

и каждой мере из набора мер по повышению ЭМС соответствует вершина. Тогда соединим вершины дугой в том случае, когда конкретная мера использована для повышения ЭМС конкретной пары “источник-рецептор”. Каждой дуге припишем вес, равный затратам на реализацию соответствующей меры в каждом конкретном случае применения. Любое покрытие этого графа представляет собой вариант реализации комплекса мероприятий по повышению ЭМС на объекте. Необходимо найти покрытие графа с наименьшими общими издержками, другими словами – покрытие с минимальным весом. Эту постановку иллюстрирует рис. 1. Здесь все меры как системотехнического, так и конструкторско-технологического характера упорядочены в один набор мер  $1, 2, \dots, N-1, N$ . Места возможного приложения мер также упорядочены и объединены в другой набор пар  $1, 2, \dots, M$ , которые нуждаются в применении к ним мер, повышающих ЭМС. Дугам 1-1, 2-1, 3-2 и т.д. приписан вес  $a(i, j)$  равный затратам на реализацию меры  $i$  в случае применения ее к паре  $j$ . Введем  $x(i, j) = 1$ , если ребро  $(i, j)$  принадлежит покрытию; в противном случае  $x(i, j) = 0$ .

Получим следующую задачу: минимизировать

$$\sum_{i,j} a(i, j)x(i, j) \quad (3)$$

При ограничениях

$$\sum_{i,j} \left[ \left[ x(i, j) + x(j, i) \right] \right] \geq 1 \text{ для всех } i \text{ и } j$$

$$\sum_{i,j} \downarrow (i, j) \left[ \left[ x(i, j) \right] \right] \geq n_m + 1, m = 1, 2, \dots, z, x(i, j) \geq 0$$

для всех  $(i, j)$

В соответствии с первым ограничением требуется, чтобы по крайней мере одно ребро, принадлежащее покрытию, было бы инцидентно вершине  $i$ . Второе ограничение означает, что по крайней мере  $(n_m + 1)$  ребер, принадлежащих множеству  $U_m$ , должно входить в покрытие. Целевая функция представляет собой

общий вес покрытия. Алгоритм, с помощью которого на графе  $G = (X, E)$  находится покрытие с минимальным весом, представлен в [2]. Основной процедурой в этом алгоритме является процедура построения так называемого чередующегося дерева [2]. Алгоритм выполняется в два этапа. На первом этапе строится некоторое паросочетание; на втором этапе это паросочетание преобразуется в покрытие, которое является покрытием с минимальным весом.

Вопросы программирования алгоритмов оптимизации на сетях и графах рассмотрены в [4].

Постановка задачи оптимизации структуры РЭС. Изложенный выше материал позволяет сформулировать достаточно общую задачу оптимизации структуры РЭС с учетом параметров ЭМС.

При проектировании сложных радиоэлектронных систем необходимо иметь, объем задач, решаемых системой, условия работы и параметры электромагнитной обстановки (см. рис. 2). Сущность задачи сводится к отысканию такого набора характеристик РЭС, который обеспечил бы минимум оценочного критерия. Для генерации вариантов возможного построения структуры системы необходимо иметь модель проектирования. Эффективность выбранного варианта оценивается с помощью модели функционирования РЭС. Отметим, что как в модели проектирования технического устройства или системы. Так и в модели функционирования РЭС может производиться внутренняя оптимизация (оптимизация более низкого иерархического уровня). Вычисление заданного критерия качества для каждого варианта реализации структуры РЭС позволяет сравнить варианты и выбрать лучший. Это достигается с помощью блоков оптимизации и управления структурой.

Вопрос выбора критерия оценки ЭМС рассматривался выше. Его решение определяется конкретными требованиями к проектируемой системе. Оценка ЭМС радиолокационного комплекса может быть произведена, например, по суммарной вероятности ложных тревог  $F \Sigma$ ,

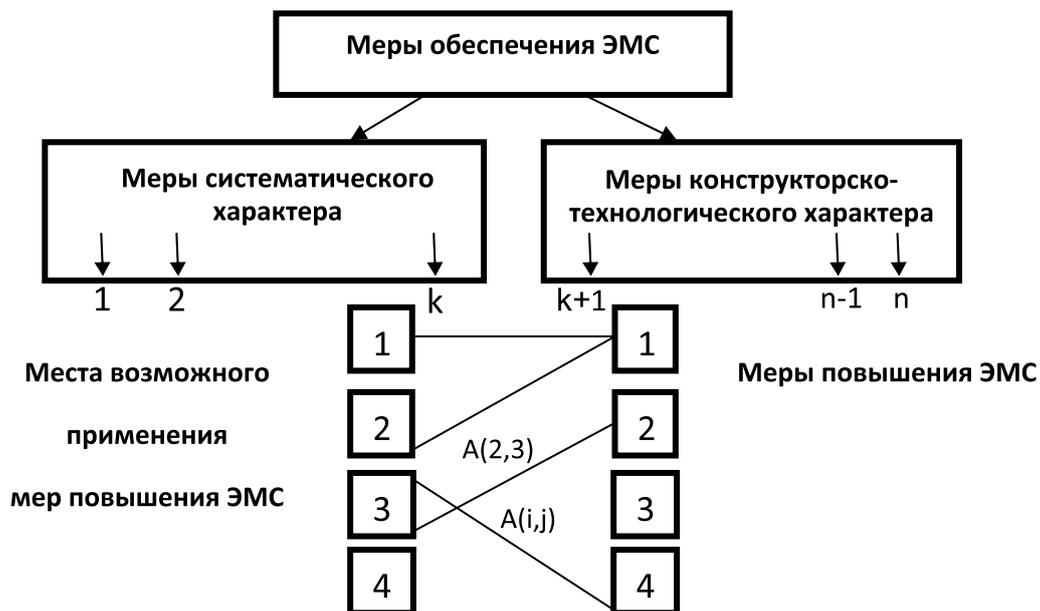


Рис. 1. Постановка задачи оптимизации с использованием теории графов.

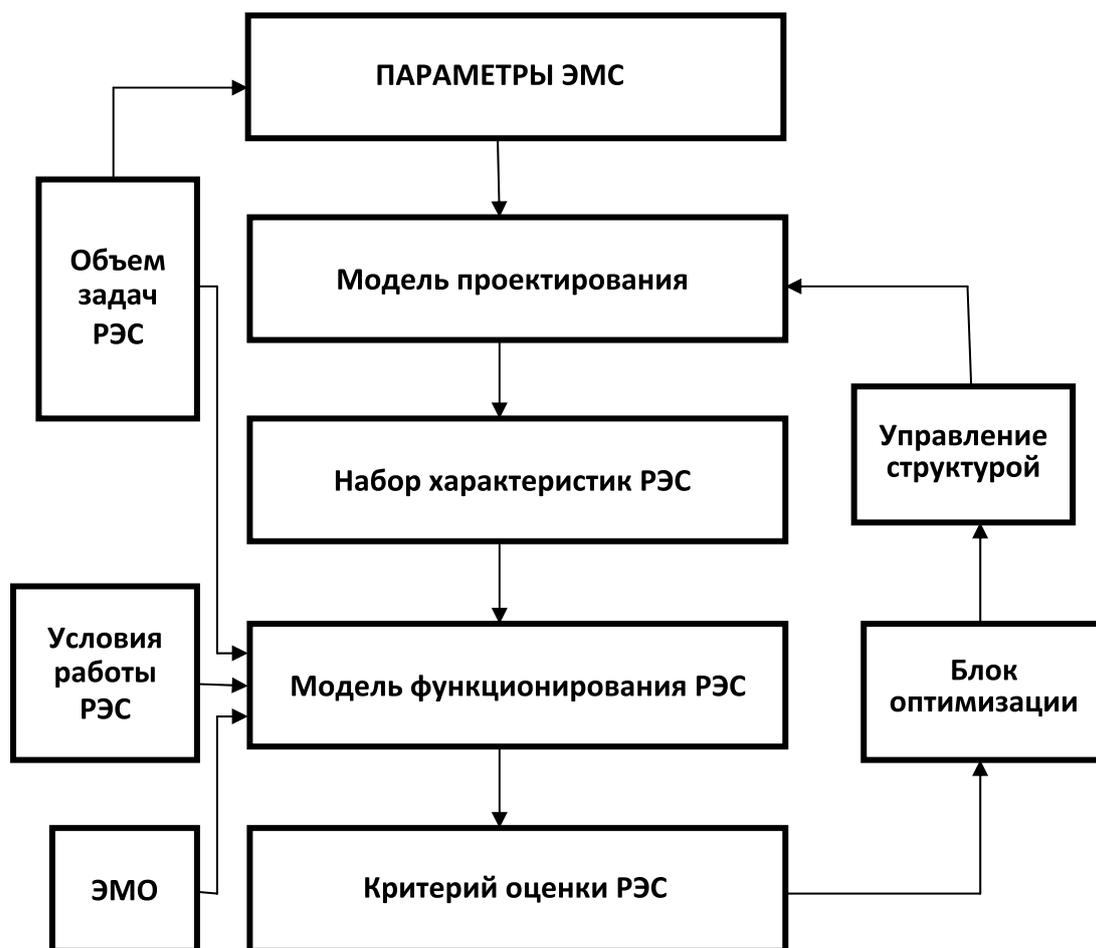


Рис. 2. Оптимизация структуры РЭС с учетом параметров ЭМС.

вызванных совокупностью естественных и перекрестных помех или по величине  $S = F/F_{\Sigma}$  характеризующей относительное изменение вероятности ложных тревог при работе станции в комплексе, по сравнению с вероятнос-

тью ложных тревог  $F$  в отсутствии взаимных помех [17].

При построении блока оптимизации рекомендуется использовать приведенные выше алгоритмы оптимизации на графах и сетях.

### Список литературы

1. Чуев Ю.В. Спехова Г.П. Технические задачи исследования операций. – М.: Сов. Радио, 1971, -214 с.
2. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 323с.
3. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.-496 с.
4. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. – М.: Мир, 1974.

# МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОСВЯЗНЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Грачев Николай Николаевич**

К.т.н., профессор, Московский институт  
электроники и математики (МИ-ЭМ НИУ ВШЭ)  
nngachev@mail.ru

**Лазарев Дмитрий Владимирович**

К.т.н., доцент, Московский институт  
электроники и математики (МИЭМ НИУ ВШЭ)  
qsk@mail.ru  
05.12.04

**Аннотация.** В статье представлены основные положения аналитической методики оценки электромагнитной совместимости радиосвязных средств морских судов по критерию ширины полос блокирования взаимными радиопомехами на основе использования смешанного опытно-теоретического подхода.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, радиосвязные средства морских судов, оценка электромагнитной совместимости, программно-алгоритмическое обеспечение.

## ANALYTICAL TECHNIQUE OF AN ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO COMMUNICATION MEANS OF SEA VESSEL ON THE BASIS OF THE SKILLED-THEORETICAL APPROACH

**Grachev N.N., Lazarev D.V.**

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

**Abstract.** In the report substantive provisions of an analytical technique of an estimation of electromagnetic compatibility of radio communication means of sea vessel by criterion of width of strips of blocking by a mutual radio interferences on the basis of use of the mixed skilled-theoretical approach are presented.

**Key words:** Electromagnetic compatibility and radio communication facilities vessels, evaluation of electromagnetic compatibility, software and algorithmic support.

На морских судах, укомплектованных с большой плотностью разнообразными радиосвязными средствами (РСС) Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), складывается сложная электромагнитная обстановка (ЭМО), которая препятствует их совместному эффективному функционированию. При этом условия эксплуатации радиосвязных средств характеризуются своими особенностями. Одна из них заключается в наличии на судах разветвлённой верхнепалубной архитек-

туры, состоящей из проводящих элементов, искажающих нормированные характеристики эксплуатируемых приёмных и передающих антенн. Решение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) РСС начинается с этапа проектирования морского судна при разработке или подборе соответствующих средств радиосвязи с необходимыми параметрами и продолжается в течение всего его жизненного цикла.

Спецификой морских судов является наличие большого количества всевозможных РСС,

имеющих большие излучаемые мощности и занимающих различные диапазоны радиочастот, при этом его радиоприемные устройства имеют высокую чувствительность, что налагает жёсткие ограничения на допустимые уровни возможных радиопомех, создаваемых, в том числе, соседствующими РСС. Всё это усложняет обеспечение совместной работы РСС морских судов.

Для примера на рисунке 1 показана зависимость уровня наводимого напряжения при

ненаправленные антенны метровых и дециметровых волн. При этом число таких антенн может достигать более десятка при ограниченных возможностях по их размещению. Поэтому большинство из них не может быть размещено выше верхнепалубных надстроек морских судов и горизонтальное расстояние между антеннами и металлическими элементами верхнепалубной архитектуры часто невелико. По этой причине диаграммы направленности большинства, как приёмных, так и

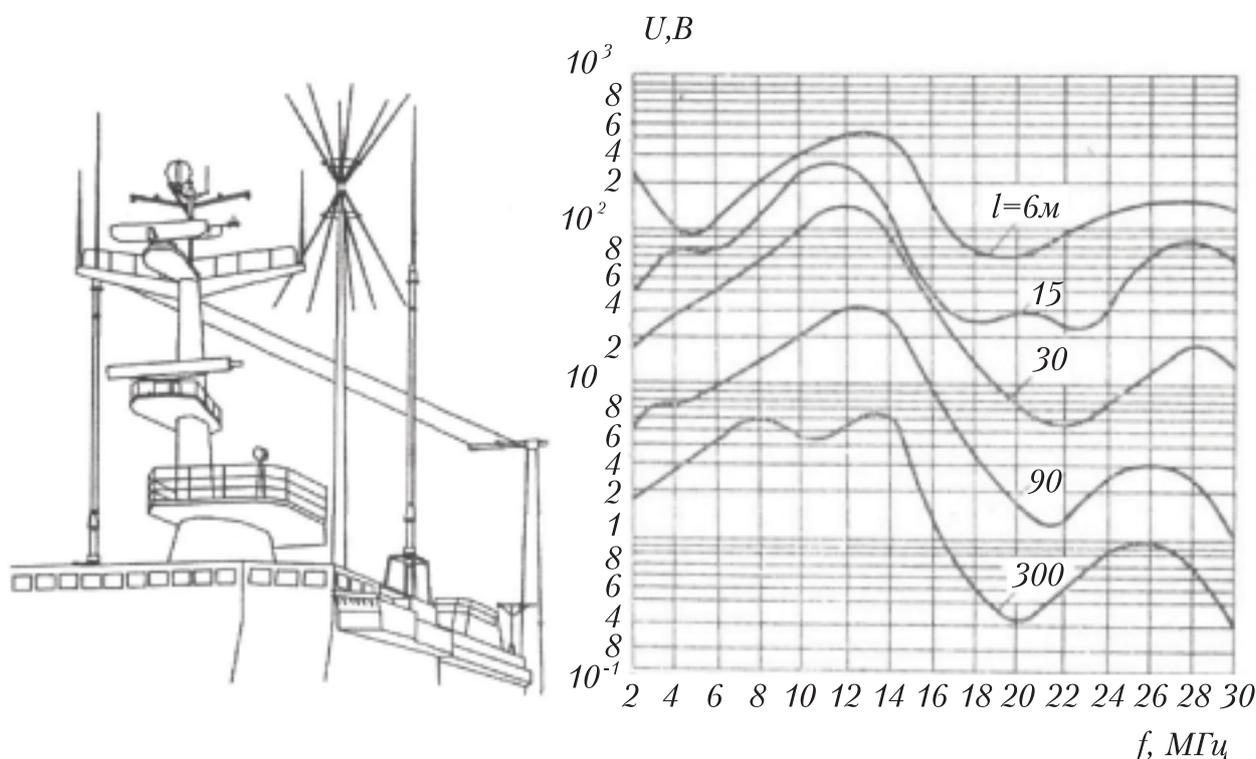


Рис. 1. Эскиз взаимодействующих антенн радиосвязи на ТОМБ и зависимость уровня наведённого напряжения при взаимодействии приёмной и передающей антенн в зависимости от расстояния между ними и радиочастотного диапазона их работы.

взаимодействию приёмной и передающей антенн РСС в зависимости от расстояния между ними и радиочастотного диапазона их работы. Наличие таких больших уровней наведённых напряжений приводит к широким полосам частот блокирования радиоприёма и существенно усложняет совместное одновременное функционирование таких радиоэлектронных средств.

Для ведения радиосвязи с морских судов используют вертикальные поляризованные

передающих антенн радиосвязи, размещенных на морских судах значительно отличаются от круговых [7].

При этом не стоит забывать, что в основном в пределах морских судов электромагнитное поле (ЭМП) радиопередатчиков РСС окончательно не сформировано и структура электромагнитных волн соответствует ближней зоне излучения, что сильно усложняет возможность расчёта взаимных влияний. К этому

также добавляется то, что помимо основного излучения радиопередатчиков существует наличие внеполосного и побочного излучения, также существуют и побочные каналы радиоприёма у приёмных устройств, которые за счёт этого являются рецепторами большого количества взаимных радиопомех.

Таким образом, актуально создание доступной научно-технической инженерной методики по расчёту электромагнитного взаимовлияния РСС, расположенных на морских судах, с целью обоснования технических решений по обеспечению их электромагнитной совместимости. При этом данная методика должна основываться на экспериментальных данных испытаний РСС при их эксплуатации на морских судах. А также необходима её автоматизация для выполнения большого количества и с заданной точностью трудоёмких расчётов различных вариантов размещения антенных устройств и анализ их зависимостей от различных параметров их эксплуатации.

На основе теоретических материалов и результатов экспериментальных исследований взаимного влияния РСС в пределах морских судов была разработана методика аналитической оценки ЭМС РСС для диапазона радиочастот  $0,3 \div 400$  МГц.

Исходными данными для неё служат:

1. Радиочастота электромагнитных волн, излучаемых передающим устройством (основная, внеполосная, на гармониках, на субгармониках, комбинационная, интермодуляционная, паразитная, шумовая):  $f_{\text{прд}}$ , МГц;

2. Мощность передающего устройства, излучающего электромагнитные волны на рассматриваемой радиочастоте (для основных, боковых, дальних, задних лепестков диаграммы направленности антенны):  $P_{\text{прд}}$ , Вт;

3. Полоса частот излучения радиопередатчика на  $r$ -ой гармонике (1-й, 2-й, ... 5-й) на уровне  $X$  дБ (-3дБ, -30 дБ, -60 дБ), МГц  $\Delta f_{\text{хрпрд}}$ ;

4. Тип антенны радиопередатчика;

5. Геометрические размеры антенны радиопередатчика;

6. Вид поляризации электромагнитных волн, излучаемых передающим устройством: вертикальная, горизонтальная, круговая;

7. Полное сопротивление антенны радиопередатчика  $Z_{\text{вх}}$ , Ом;

8. Активное сопротивление антенны радиопередатчика  $R_{\text{вх}}$ , Ом;

9. Коэффициент усиления антенны радиопередатчика для основного, бокового, дальнего и заднего лепестка на рабочих частотах,  $G_{\text{прд}}$ , в раз;

10. Ширина диаграммы направленности передающей антенны  $\Psi_{\text{прд}}$ , град;

11. Погонная емкость вертикальной  $C_{\text{вер}}$  и горизонтальной  $C_{\text{гор}}$  части проволочных (лучевых) антенн радиопередатчика, Ф/м;

12. Тип применяемого кабеля для антенно-фидерного тракта передатчика с указанием следующих параметров:

Диэлектрическая проницаемость изоляции  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ , диаметр внешнего проводника (экрана)  $D$ , диаметр внутреннего проводника  $d$ , длина применяемого кабеля  $l$ ;

13. Радиочастота электромагнитных волн, принимаемых приёмным устройством (основная, промежуточная, зеркальная, комбинационная, на субгармониках):  $f_{\text{прм}}$ , МГц;

14. Промежуточная частота радиоприёмника  $f_{\text{пч}}$ , МГц;

15. Частота гетеродина радиоприёмника  $f_{\text{г}}$ , МГц;

16. Полоса пропускания усилителя промежуточной частоты радиоприёмника на уровне  $X$  дБ (-3дБ, -30 дБ, -60 дБ)  $\Delta f_{\text{хпрм}}$ , МГц;

17. Чувствительность радиоприёмника  $\sigma$ , В;

18. Полное сопротивление антенны радиоприёмника  $Z_{\text{вх}}$ , Ом;

19. Активное сопротивление антенны радиоприёмника  $R_{\text{вх}}$ , Ом;

20. Тип антенны радиоприёмного устройства;

21. Геометрические размеры радиоприёмного устройства;

22. Вид поляризации электромагнитных волн, принимаемых приёмным устройством: вертикальная, горизонтальная, круговая;

23. Коэффициент усиления антенны радиоприёмника для основного, бокового, дальнего и заднего лепестка на рабочих частотах,  $G_{\text{прм}}$ , в раз;

24. Параметры аппроксимации двухсигнальной частотной характеристики приёмника по блокированию  $\Delta f_0, \%$ ,  $U_0, \text{В}$ ;

25. Ширина диаграммы направленности приёмной антенны  $\Psi_{\text{прм}}$ , град;

26. Тип применяемого кабеля для антенно-фидерного тракта приёмника с указанием следующих параметров:

Диэлектрическая проницаемость изоляции  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ , диаметр внешнего проводника (экрана)  $D$ , мм, диаметр внутреннего проводника  $d$ , мм, длина применяемого кабеля  $l$ , м;

27. Угол между линиями, соединяющими расчётную точку в пространстве с концами вертикальной  $\gamma_{\text{вер}}$  и горизонтальной  $\gamma_{\text{гор}}$  частями проволочной (лучевой) антенны, град;

28. Угол между осью штыревой антенны и линией, соединяющей расчётную точку в пространстве и основание антенны  $\alpha$ , град;

29. Вид расположения взаимодействующих антенн: на одном уровне, на разных уровнях;

30. Процент затенённости препятствиями взаимодействующих антенн  $\chi, \%$ ;

31. Расстояние между взаимодействующими антеннами  $r$ , м.

### Порядок расчёта

#### 1. Частотный анализ.

На данном этапе вычисляются возможные частотные каналы влияния при взаимодействии приёмных и передающих устройств.

$$K_{\text{max}} = \frac{f_{\text{max прд}}}{f_{\text{min прм}}}; \quad K_{\text{min}} = \frac{f_{\text{min прд}}}{f_{\text{max прм}}};$$

Если

$K_{\text{max}} > 1; 1 < K_{\text{min}} < 1,3$  внеполосное излучение

$K_{\text{max}} \geq 1; K_{\text{min}} \leq 1$ ; основное излучение

$0,7 < K_{\text{max}} < 1; 0,5 < K_{\text{min}} < 1,3$  внеполосное излучение

$K_{\text{max}} \geq 0,5; K_{\text{min}} < 0,5$  вторая гармоника

$K_{\text{max}} \geq 0,33; K_{\text{min}} < 0,33$  третья гармоника

$K_{\text{max}} \geq 0,25; K_{\text{min}} < 0,25$  четвертая гармоника

$K_{\text{max}} \geq 0,2; K_{\text{min}} < 0,2$  пятая гармоника

Для однократного преобразования частот в радиоприёмниках при выполнении неравенства будет иметь место влияние

$$\left| p f_{\text{прд}} - \frac{m}{n} f_{\text{прм}} - v f_{\text{пч}} \frac{n - v \zeta}{m} \right| - \frac{\Delta f_{\text{хпрд}}(p) + \Delta f_{\text{хпрм}}}{2} \leq 0,$$

где

$p = 1, 2, 3, \dots, p_{\text{max}}$  – порядковый номер гармоники центральной частоты радиопередатчика,

$n = 0, 1, 2, \dots, n_{\text{max}}$  – порядковый номер частот гетеродина;

$m = 0, 1, 2, \dots, m_{\text{max}}$  – порядковый номер побочного канала;

$v$  – признак настройки гетеродина радиоприёмника (+1 – для верхней настройки, -1 – для нижней настройки);

$\zeta$  – признак зеркального канала радиоприёмника ((+1 – для верхней настройки, -1 – для нижней настройки);

$$p_{\text{max}} = 10^{\frac{E-B}{A}}, \quad n_{\text{max}} = 10^{\frac{E-D}{C}},$$

$$E = \lg\left(\frac{P_{\text{прд}}}{\sigma} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \left(\frac{3 \cdot 10^8}{4\pi r f_{\text{прд}}}\right)\right)$$

Коэффициенты выбираются из таблицы 1.

Таблица 1

Рабочие частоты, МГц	A	B	C	D
Менее 30 МГц	7,0	2,0	2,5	8,5
От 30 до 300 МГц	8,0	3,0	3,5	8,5
Более 300 МГц	6,0	4,0	4,0	6,0

#### 2. Энергетический анализ.

На данном этапе вычисляются возможные уровни электромагнитных полей в заданной области.

В общем случае выражение для электрической составляющей напряженности электромагнитного поля равна

$$E = \Im(C_A, Z_A) * \Re(P_{\text{прд}}, R, f_{\text{прд}}) * G_{\text{прд}}(f_{\text{прд}}, R) * \xi_{\text{прд}} *$$

$$* \eta_{\text{фпрд}}(l_{\text{прд}}, \epsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прд}}) * K_3 * K_\Gamma * \sin \frac{\alpha}{2},$$

где

$\mathfrak{Z}(C_A, Z_A)$  – выражение, зависящее от погонных емкостей и входных сопротивлений антенны радиопередающего устройства;

$$\Re(P_{\text{прд}}, R, f) = Q_1(P, f) * R^{-6} + Q_2(P, f) * R^{-5} + Q_3(P, f) * R^{-4} + Q_4(P, f) * R^{-3} + Q_5(P, f) * R^{-2} + Q_6(P, f) * R^{-1}$$

где  $Q_1 \div Q_6$  – коэффициенты аппроксимации полинома,

$R$  – расстояние между антенной и анализируемой точкой пространства,

$P$  – мощность передатчика,

$f$  – радиочастота передатчика,

$$G_{\text{прд}}(f_{\text{прд}}, R) = G_0(0,7 + 0,3e^{-0,6 \frac{\Delta f}{f_0}}) - 15e^{-4 \frac{R}{R_{\text{дз}}}}$$

$G_0$  – коэффициент антенны передатчика по техническим условиям;

$\Delta f$  – отстройка по частоте от номинальной;

$R_{\text{дз}}$  – граница дальней зоны для данной радиочастоты;

$$\eta_{\text{Фпрд}}(l_{\text{прд}}, \varepsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прд}}) =$$

$$= e^{-2l(2,62 * 10^3 \sqrt{\varepsilon f(1+D/d)/D} \lg(D/d)) + (9,1 * 10^3 f \sqrt{\varepsilon \text{tg}(\delta)})}$$

$K_3$  – коэффициент, учитывающий затенение препятствиями между взаимодействующими антеннами;

$K_r$  – коэффициент, учитывающий уменьшение уровня сигнала на гармонических составляющих;

### 3. Уровень наводимых напряжений.

На данном этапе рассчитывается уровень наводимых напряжений на входе приемного устройства, учитывающий распространение сигнала по антенно-фидерному тракту

$$U = E * ((\lambda / \pi) \sqrt{G_{\text{прм}} R_A / 73,1}) *$$

$$* K_{\text{П}} * \eta_{\text{Фпрм}}(l_{\text{прм}}, \varepsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прм}}),$$

где

$\lambda$  – длина волны принимаемых радиоволн;

$K_{\text{П}}$  – коэффициент, учитывающий разную рабочую поляризацию для взаимодействующих приёмной и передающей антенны.

$$\eta_{\text{Фпрм}}(l_{\text{прм}}, \varepsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прм}}) =$$

$$= e^{-2l(2,62 * 10^3 \sqrt{\varepsilon f(1+D/d)/D} \lg(D/d)) + (9,1 * 10^3 f \sqrt{\varepsilon \text{tg}(\delta)})}$$

### 4. Ширина полосы блокирования радиопомехами.

На данном этапе рассчитывается ширина полосы радиочастот приёмного устройства, заблокированная радиопомехами от работы радиопередающего устройства, в зависимости от уровня наведённого напряжения.

$$\Delta f_{\text{БЛ}} = \pm \sqrt{-2 * \Delta f_0^2 * \ln(1 - \frac{U}{2U_0})}$$

На основе разработанной методики были рассчитаны графические зависимости уровня наведённого напряжения от различных параметров при парном взаимодействии приёмного и передающего устройства (рис. 2÷4).

На основе разработанной методики оценки электромагнитной совместимости РСС был сформирован алгоритм функционирования её программной реализации.

На рисунке 5 показан укрупнённый алгоритм функционирования программы расчёта электромагнитной совместимости РСС, в котором можно выделить последовательность и основные этапы расчёта.

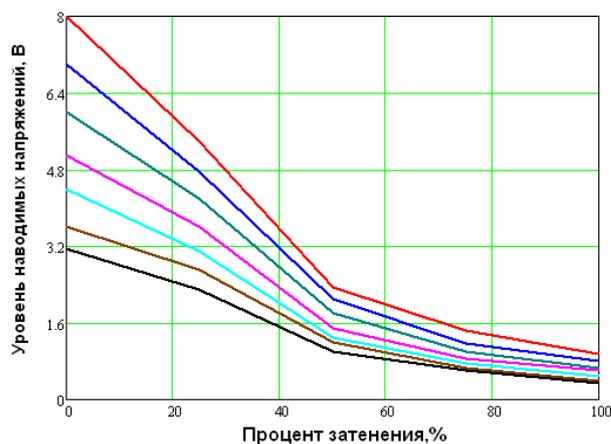


Рис. 2. Зависимость уровня наводимых напряжений от процента затенённости препятствиями между взаимодействующими антеннами для различных значений мощности радиопередающего устройства.

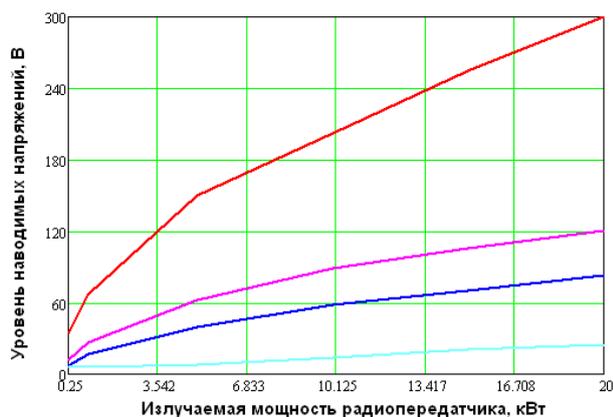


Рис. 3. Зависимость уровня наводимых напряжений от мощности радиопередающего устройства при различных расстояниях между взаимодействующими антеннами.

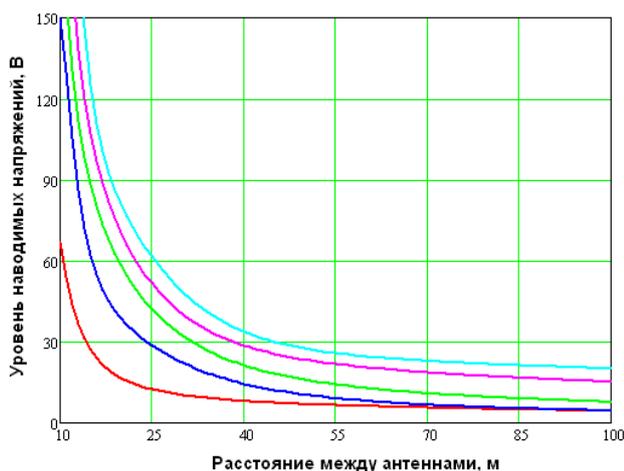


Рис. 4. Зависимость уровня наводимых напряжений от расстояния между взаимодействующими антеннами при различных мощностях радиопередающего устройства.

В соответствии с сформированным алгоритмом была разработана программа расчёта взаимного влияния РЭС при их совместном функционировании на морских судах.

На рисунке 6 представлены результаты расчёта данной программы по разработанному алгоритму при парном взаимодействии приёмной и передающей антенн РЭС. На нём приводятся значения ширины полос блокирования



Рис. 5. Укрупнённая структура алгоритма программной реализации методики расчёта ЭМС РЭС.

взаимными помехами при их совместном функционировании в пределах морского судна в зависимости от расстояния между ними.

Разработанная программно-алгоритмическая реализация научно-технической методики по оценке электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств связного профиля позволяет осуществлять парную оценку электромагнитной совместимости РЭС при их расположении в пределах морского судна с наглядным отображением результатов в виде графиков по интересующим параметрам.

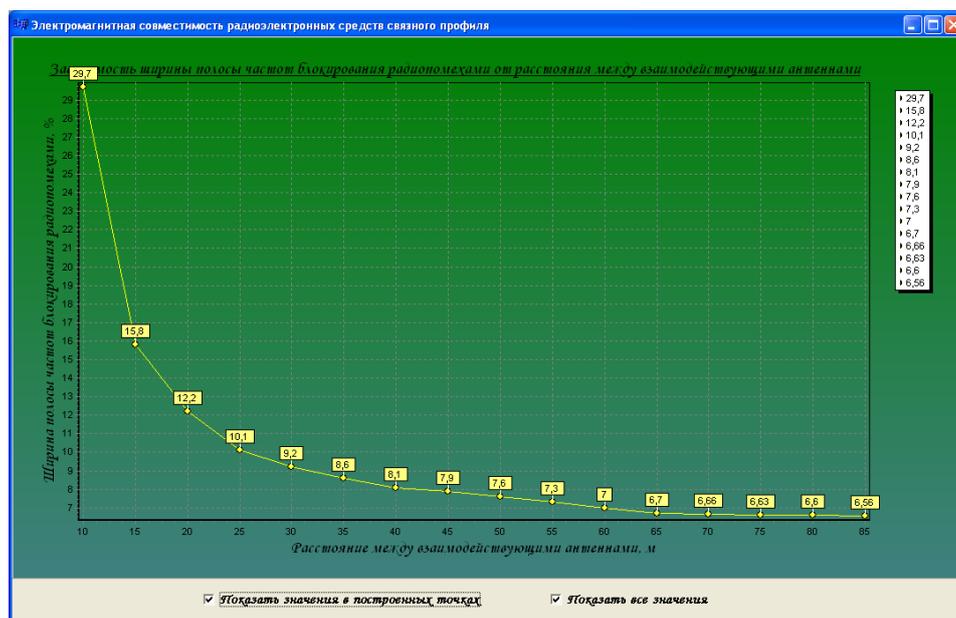


Рис. 6. Результаты расчёта зависимости ширины полосы блокирования радиопомехами от расстояния между взаимодействующими приёмной и передающей антеннами.

Разработанные научно-методическое и программно-алгоритмическое обеспечение оценки ЭМС РСС позволяет уменьшить вре-

менные, финансовые и материальные затраты при проектировании морских судов и комплексов их радиосвязными системами.

### Список литературы

- ГОСТ Р 52691 – 2006. «Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование и системы морской навигации и радиосвязи. Требования и методы испытаний». – 28 с.
- Лысенко Э.Л., Сазонов С.П., Крупнов С.Р., Азаров Б.В. Проблемные вопросы в области электромагнитной совместимости и перспективные пути их решения // Морская радиоэлектроника, №1 (4), 2003. – Л.: Судостроение, 2003. – с. 14-18.
- РД 31.64.26-00. Нормы и правила обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) на морских подвижных объектах и методы комплексной оценки ЭМС. – СПб: ЦНИИ МФ, 2000. – 104 с.
- Григорьев А.Г., Матисен А.И., Патрин В.С. Защита радиоприема на судах от помех. – Л.: Судостроение, 1973. – 208 с.
- Вершков М.В. Судовые антенны. – С-Пб.: ЦНИИ МФ, 2008. – 414 с.
- Лазарев Д.В. Автоматизация управления параметрами электромагнитных полей в условиях корабля в интересах обеспечения электромагнитной совместимости его радиоэлектронных средств // Морской вестник №4 (36), Спб: Мор Вест, 2010. – С. 19-28.
- Яковлев А.Ф. Использование элементов надстроек корабля для улучшения характеристик коаксиальной логопериодической антенны // Судостроение, №5 (744), 2002. – С. 31-34.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СРЕДЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**Царегородцев Анатолий Валерьевич**

Доктор технических наук, профессор,  
Всероссийская государственная налоговая академия  
Министерства финансов Российской Федерации (Москва)  
05.13.19  
academic\_tsar@mail.ru

**Аннотация.** Широкое распространение и применение облачных вычислений диктует необходимость адаптации и доработки существующих моделей безопасности компьютерных систем. Для достижения конфиденциальности данных на основе существующих моделей развёртывания облачных сервисов предлагается процедура распределения рабочего процесса между компонентами среды облачных вычислений.

**Ключевые слова:** облачные вычисления, публичное облако, частное облако, гибридное облако, требования безопасности, теория графов, конфиденциальность данных.

## SECURITY OF DATA PROCESSING IN THE CLOUD COMPUTING

**Tsaregorodtsev Anatolii Valerievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
The State Tax Academy of Russian Federation (Moscow)

**Abstract.** Use of cloud computing applications and services requires review and adaptation of existing formal models for computer security. It is necessary to consider the benefits of cloud deployment models and provide the procedure for allocating process among components of cloud computing environment for achieving confidentiality and data protection.

**Key words:** cloud computing, public cloud, private cloud, hybrid cloud, security requirements, theory of graphs, data confidentiality.

### Введение

Облачные вычисления в ближайшем будущем станут одной из самых распространённых ИТ технологий для развёртывания приложений, благодаря своим ключевым особенностям: гибкости решения, доступности по запросу и хорошим соотношением цена/качество.

Под облачными вычислениями будем понимать модель, позволяющую осуществлять повсеместный и удобный доступ по требованию к общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов (например, совокупность сетей, серверов, хранилищ данных, приложений и услуг), который может быть оперативно предоставлен сервисным провайдером [1].

Необходимо отметить, что самыми критичными вопросами при построении инфраструктуры, основанной на среде облачных вычислений, являются аспекты обеспечения информационной безопасности. Достижение целей информационной безопасности организации, является ключевым фактором для принятия решений об услугах аутсорсинга информационных технологий и, в частности, для принятия решения о миграции информационных активов организации на различные модели предоставления облачных сервисов. Большинство организаций не могут себе позволить защитить все свои вычислительные ресурсы и активы в силу бюджетных ограничений, поэтому при переходе на новую модель предоставления ИТ-услуг особое внимание

должно уделяться вопросам обеспечения безопасности обработки информации.

### 1. Общие требования информационной безопасности облачных вычислений

Рассмотрим ряд факторов, которые должны всегда рассматриваться в качестве основы построения облачной конфигурации.

**Затраты и ресурсы.** С одной стороны финансовые ресурсы облачного провайдера ограничивают его в инвестициях на усовершенствование технологий управления информационной безопасностью. Отсутствие неограниченных ресурсов может мотивировать провайдера серьезно подойти к вопросам проектирования, построения архитектуры и решения. С другой стороны уменьшение стоимости ИТ решения – это главная мотивация для потребителя облачных услуг. Природа этих ограничений приводит к развитию сервисов с рабочими характеристиками, которые не идеальны для всех потребителей.

**Надёжность.** Под надёжностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [2].

**Производительность.** Совокупность нескольких свойств, которые имеют отношение к полезности системы. К примеру, общие меры включают оперативность реагирования на входную информацию (чувствительность) и пропускную способность системы при обработке.

**Целостность. Конфиденциальность. Доступность.** Это основные принципы информационной безопасности для всех типов систем, главная цель при построении комплексной защиты это соотнесение этих показателей с надёжностью, производительностью и стоимостью решения.

**Правовые и нормативные ограничения.** Нормативно-правовые ограничения могут привести к необходимости учета дополнитель-

ных требований, связанных с техническими контролями безопасности, политики доступа, хранения данных.

Рассмотрим требования безопасности, которые выдвигаются для *физической безопасности* облачного центра обработки данных. Физическая безопасность объекта должна включать системы защиты с отдельными элементами безопасности, обеспечивающей многоуровневую защиту. Эти элементы включают в себя аспекты:

- природоохранного проектирования,
- контроля доступа (в том числе механического, электронного и процедурного),
- мониторинг (в том числе видео-, тепловой, близость наряду с экологическими датчиками),
- идентификации персонала и управления доступом,
- обнаружения вторжений с оповещением.

Физическая безопасность на объекте должны быть многоуровневой, каждый элемент должен быть интегрирован в общий автоматизированный центр контроля и управления.

Наряду с уникальными требованиями к безопасности облачной архитектуры, существуют общие, которые должны отвечать требованиям соответствующих стандартов, например, ISO 27001 и ISO 27002, так как они содержат практическую ценность, опыт, отчёты и рекомендации лучших практик.

Кроме того, все аспекты безопасности должны быть отражены в документе «**Политика информационной безопасности организации**» («Политика облачной безопасности»), которая имеет статус официального документа, согласовывается и утверждается высшим руководством. Политика безопасности должна рассматриваться, как фундамент построения всей системы, и не должна содержать подробных технических или архитектурных подходов (так как они могут меняться чаще, чем сама политика). Основная цель политики должны заключаться в определении основополагающих организационных и управленческих решений в области построения комплексной безопасности облака. Например, политика должна

объяснить необходимость применения шифрования с помощью использования какого-либо коммерческого продукта, а не включать в себя техническое описание безопасности транспортного уровня, уровня, протоколы защиты информации или другие специальные средства.

Политика безопасности также должна иметь ссылки на следующие разделы [3]:

- Ряд руководящих принципов для обеспечения безопасности при разработке программного обеспечения, в процессах управления ИТ инфраструктурой, и других операционных процедурах.
- Политика допустимого использования ресурсов для каждой категории пользователя: от внутренних операций, выполняемых администратором до действий конечных пользователей. Этот раздел должен идентифицировать категории использования ресурсов, определить критичную информацию, доступ к которой запрещен, обозначить последствия для нарушений.
- Ряд стандартов безопасности для всех аспектов облачной архитектуры, от миграции данных до операционной деятельности.

Стандарты безопасности для облачных вычислений должны включать в себя:

- 1. Средства управления доступом.** Детализация целей данного уровня должна быть достаточной для осуществления контроля физического доступа к ЦОД и логического доступа к системам и приложениям.
- 2. Управление реагированием на инциденты безопасности.** Должно быть подробно описано назначение всех ролей и обязанностей различных сторон, наряду с процедурами и сроками обнаружения инцидентов.
- 3. Резервное копирование системной и сетевой конфигурации.** Необходимо иметь гарантированно надёжную копию всех конфигураций, включая компоненты инфраструктуры, серверы, и другое сетевое оборудование для всех хост-систем.

**4. Тестирование безопасности.** Облачный провайдер должен выполнять и документировать результаты первоначального и периодического тестирования безопасности. Этот стандарт должен включать роли и обязанности, а также подробное описание, когда планируется проведение сторонних тестирований или аудита.

**5. Шифрование данных и связи.** Должны быть идентифицированы все функциональные области (например, веб-трафик сервера), утверждены криптографические алгоритмы и необходимая длина ключа шифрования.

**6. Политика строгих паролей.** Должны быть описаны ключевые аспекты при задании паролей (в частности, длина и состав) и как облачный провайдер будет проводить процедуру аутентификации.

**7. Непрерывный мониторинг.** Должно быть детально описано, как выполняется управление конфигурациями и изменениями (развитие и обновление) с целью поддержки требуемого уровня безопасности и сохранение ключевого требования к информационной безопасности – непрерывности бизнеса.

Существует ряд других областей безопасности, которые непосредственно управляются со стороны облачного провайдера:

- 1) прекращение неактивных сессий;
- 2) определение ролей и ответственностей для персонала, обслуживающего облако;
- 3) разделение обязанностей и матрицы полномочий;
- 4) управление магнитными и электронными средствами удаления информации;
- 5) управление удалением или использованием оборудования;
- 6) своевременное удаление пользовательских привилегий;
- 7) аварийное восстановление и обеспечение непрерывности операций.

## 2. Специфические требования к построению защиты облачных вычислений

### 1) *Управление идентичностью*

Идентичность – основной элемент оперативной безопасности облака. Информация должна быть корректной и доступной для всех компонентов облачных вычислений, у которых есть утвержденная потребность в доступе. Требования включают в себя следующие цели:

1. Должны быть реализованы контроли для защиты конфиденциальности, целостности и доступности информации, подтверждающей идентичность.

2. Должна быть внедрена система управления идентичностью, которая будет поддерживать потребности для аутентификации облачных клиентов и привилегированных пользователей.

3. Должен быть использован принцип «федеративной идентификации», чтобы обеспечить мобильность для пользователя и представить единый механизм для внутреннего доступа [4].

4. Проверка идентичности пользователей во время регистрации в соответствии с политикой безопасности и юридическими требованиями.

5. Должно обеспечиваться сохранение исторической информации после удаления идентификатора пользователя для дальнейших правовых исследований

6. Необходимо при процедуре повторно назначения профиля полномочий от одного пользователя к другому убедиться, что не предоставляется доступ к предыдущим данным старого пользователя, его контексту, или другой частной информации.

7. Должны быть реализованы специальные средства для клиентов для проверки утверждения идентичности персоналом облачного провайдера.

### 2) *Управление доступом*

Контроль доступа использует идентификационную информацию для обеспечения и ог-

раничения доступа к операционной среде облака и поддерживающей её инфраструктуре. Требования включают следующие цели:

1. Обслуживающий персонал облака должен иметь ограниченный доступ к данным клиента. Персоналу может потребоваться доступ к гипервизору или к устройствам хранения данных, к хосту клиента виртуальных машин или непосредственно к данным клиента, но такой доступ должен быть жестко ограничен конкретными операциями, которые должны быть определены в политике безопасности и в сервисном соглашении об обслуживании (SLA).

2. Должна быть реализована многофакторная аутентификация для высоко привилегированных и критичных операций путём применения дополнительных элементов защиты.

3. Не допускается использование ролей со всеми полномочиями, даже для администратора должен быть настроен профиль, в котором не предусмотрена возможность получения доступа ко всем компонентам облака.

4. При назначении прав доступа должны быть заложены основные минимальные привилегии (LPP) и реализована модель ролевого управления доступом (RBAC) для ограничения доступа авторизованных пользователей на основе их роли [4].

5. Для всех удалённых доступов должен использоваться белый список IP адресов отправителей. Если это сделать невозможно, то необходимо реализовать доступ с помощью дополнительных механизмов, таких как шлюзы.

### 3) *Управление ключами шифрования*

В облаке, шифрование в первую очередь рассматривается, как основной механизм для защиты данных в состоянии покоя (при хранении), а также между хранением и фазой обработки. Требования к управлению ключами включают в себя следующие задачи [5]:

1. Необходимо убедиться, что существуют меры контроля для ограничения доступа к данным о ключах шифрования.

2. Необходимо убедиться, что корневой каталог и подписка ключей осуществляется надлежащим образом.

3. Необходимо убедиться, что отмена действия ключа осуществляется без побочных эффектов или неоправданной задержки для нескольких сайтов инфраструктуры облака.

4. Необходимо убедиться, что существует процедура восстановления взломанных ключей, и она эффективно работает.

5. Необходимо обеспечить защиту и шифрование всех клиентских данных и образов виртуальных машин на всех этапах жизненного цикла.

#### 4) *Аудит системы и сети*

Журнализация событий информационной безопасности является залогом её успешного управления. В облаке, фиксация событий аудита будет происходить в принципиально разных зонах доверия. Таким образом, события безопасности должны быть признаны, как имеющие разную степень целостности данных. Ниже перечислены основные требования к проведению аудита событий:

1. Аудит является обязательным для всех операционных систем, от инфраструктуры и сетевых компонентов до клиентских виртуальных машин. Соглашение о конфиденциальности, а также контракты на обслуживание могут установить границы для того, как данные могут быть собраны виртуальной машине арендатора и его виртуальной сети.

2. Все связанные с безопасностью события должны быть записаны со всей исчерпывающей информацией, необходимой для анализа, включая правильное время, рассматриваемую систему, идентификаторы пользователей, соответствующие коды событий.

3. Правильная работа системы аудита и регистрации должна постоянно проверяться на основе периодический сигналов и системы «запрос-ответ».

4. Все журналы аудита должны постоянно и централизованно собираться в целях обеспечения их целостности и для поддержки своевременных предупреждений и мониторинга.

5. Все журналы аудита должны надежно храниться в течение времени, определенного в требованиях политики безопасности, желатель-

но до бесконечности и поддерживать возможность долгосрочного анализа.

6. В случае необходимости для поддержки проверки юридических или оперативных потребностей арендаторов или клиентов, записи аудита будут продезинфицированы, чтобы поделиться с арендаторов и покупателей либо как часть службы безопасности или по мере необходимости.

7. Контроли должны быть реализованы для защиты конфиденциальности, целостности и доступности событий аудита, сбора протоколов аудита, логов хранения, обработки и отчетности.

#### 5) *Мониторинг безопасности*

Мониторинг безопасности основывается на журналы аудита, мониторинг безопасности сети (с использованием контроля трафика), и данных об окружающей обстановке (физическая безопасность). К требованиям мониторинга безопасности относят следующие:

1. Мониторинг безопасности должен запускаться, как ключевой сервис, доступный для удаленного управления в безопасном режиме.

2. Должно быть предусмотрено оповещение на основе автоматического распознавания критического события или инцидента безопасности.

3. Должна быть реализована доставка критических оповещений через различные средства для оперативного реагирования.

4. Средства для обеспечения безопасности персонала для расследования и уголовного преследования разворачивается инцидент или просто просмотреть журналы для улучшения механизмов оповещения или вручную идентифицировать случаи нарушения безопасности.

5. Должна быть обеспечена возможность обнаружения аномалий в облачной среде в виде сервиса для клиентов и пользователей.

6. Должны быть предоставлены функциональные возможности, позволяющие клиентам обнаружить вторжение или другие аномалии для моделей PaaS (платформы-как-услуга) и IaaS (инфраструктура как услуга) с целью

передачи кодов событий и оповещения облачного провайдера [5].

7. Мониторинг безопасности должен быть надежно осуществлен даже в условиях сбоя при генерации события и создания на его основе отчетности.

#### б) *Управление инцидентами*

Управление инцидентами и реагированием на них должно быть зафиксировано в виде положений при составлении соглашения об уровне обслуживания и политики безопасности:

1. Должен быть построен формальный процесс для обнаружения, выявления, оценки и реагирования на инциденты на периодической основе.

2. Процесс управления инцидентами должен включать в себя составление периодических отчетов.

#### 7) *Тестирование и управление восстановлением*

Тестирование функций безопасности должно быть выполнено для всего программного обеспечения до его внедрения. Важно найти уязвимость и возможность проникновения при постоянном тестировании программно-аппаратного обеспечения облака. Для большей эффективности, тестирование должно проводиться совместно с системами мониторинга и управления конфигурацией для предотвращения ложных тревог и реагирования на инциденты. Конкретные требования включают в себя следующее [5]:

1. Должны использоваться отдельные среды для разработки, тестирования, переноса и продуктивного запуска для всех программных приложений и систем облака, включая развертывание патчей в продуктивной среде.

2. Процедуры управления исправлениями должны быть определены для всех компонентов инфраструктуры, серверов, систем хранения, программного обеспечения для виртуализации, приложений и компонентов безопасности.

3. Должна быть определена комплексная стратегия восстановления и формирования контрмер, которые можно было бы использовать для целого ряда обстоятельств: от ответа

на известные угрозы до внедрения менее критических патчей для повышения безопасности и надежности работы облака.

#### 8) *Сетевое и системное управление*

Сетевое и системное управление должно быть реализовано для инфраструктур, осуществляющих хостинг клиентских данных, прикладных программ и всего сетевое оборудование, включая в себя все физические и виртуальные компоненты или услуги. Конкретные требования включают в себя следующее:

1. Должна быть обеспечена соответствующая изоляция, конфигурация и безопасность для всех облачных компонентов.

2. Должна быть реализована изоляция на уровне сети между различными функциональными областями облачной инфраструктуры начиная от создания разных сетей, включая физическое разделение и виртуализацию сети для общественно доступных компонентов (хостов виртуальных машин хостов и интерфейсов хранилищ данных в общественном облаке) до управления компонентами инфраструктуры

и обеспечения безопасности и сетевого администрирования. Усилить эти действия можно за счёт использования программных брандмауэров на виртуальных машинах [4].

3. Должно быть предусмотрено отделение аппаратной платформы от операционной системы (ОС) (или виртуальной машины) с целью запрета пользовательского доступа к аппаратной части из публичного доступа. Обратный доступ (из виртуальной машины к платформе) также должен быть предотвращен.

4. Должны быть применены контроли для усиления изоляции между виртуальными машинами, принадлежащими к различным клиентам.

5. Должен осуществляться контроль за целостностью:

- ОС,
- образов виртуальных машин,
- приложений инфраструктуры,
- сетевой конфигурации,
- программного обеспечения и данных клиента.

6. Должны применяться современные средства сканирования на предмет наличия вредоносных сигнатур.

### 3. Модель безопасности процесса обработки данных

Для определения модели безопасности рабочих процессов в среде облачных вычислений предлагается модифицировать классическую модель безопасности Белла-ЛаПадула за счёт добавления новых условий и компонентов с использованием ключевых элементов теории графов.

Процесс обработки данных рассмотрим в виде ориентированного графа, облачные сервисы и данные которого будут изображены в виде вершин. На рисунке 1 изображен граф, с помощью которого описано последовательное выполнение двух облачных сервисов с использованием нескольких элементов данных [5].

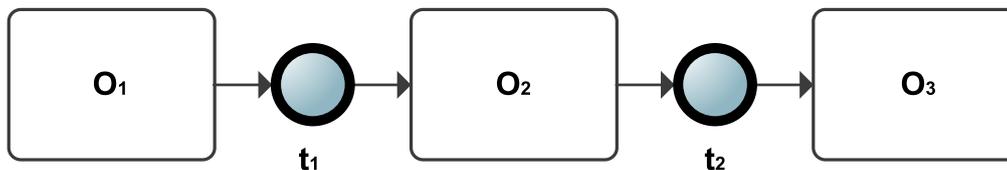


Рис. 1. Граф рабочего процесса с последовательным выполнением двух облачных сервисов.

Для формального описания требований безопасности воспользуемся положениями классической модели управления доступом Белла-ЛаПадула и рассмотрим два базовых свойства безопасности, которыми должен обладать каждый безопасный доступ субъекта к объекту [4].

- Доступ  $(s, o, r)$  обладает *ss-свойством* относительно  $f = (f_s, f_o, f_c)$ , где  $f_s$  – функция уровней доступа субъектов,  $f_o$  – функция уровней конфиденциальности объектов,  $f_c$  – функция текущих уровней доступа субъектов, когда выполняется условие:

$$r \in \{read; write\} \text{ и } f_s(s) \geq f_o(o).$$

- Доступ  $(s, o, r)$  обладает *\*-свойством* относительно  $f = (f_s, f_o, f_c)$ , когда выполняется одно из условий:

$$r = execute;$$

$$r \in \{read; write\} \text{ и } f_c(s) \geq f_o(o)$$

$$r = read; \text{ и } f_c(s) = f_o(o).$$

Основываясь на приведённых основных положениях классической модели безопасности, интерпретируем её по отношению к рабочему процессу, протекающему в среде облачных вычислений и выполняющему обработку над данными разного уровня конфиденциальности.

1. Представим облачные сервисы в виде субъектов  $(T)$ , а данные в виде объектов  $(O)$ .

2. Обозначим набор действий  $(A)$ , который субъект  $(T)$  может совершить с объектами  $(O)$ . В рамках данной задачи рассмотрим только действия чтения и записи.

3. Определим решетку безопасности  $(L)$  в виде таблицы, где для каждого блока процесса обработки данных обозначим требуемый уровень безопасности.

Блок процесса обработки данных	Уровень безопасности (l)	
$o_1$	1	Высокий
$t_1$	0	Низкий
$o_2$	0	Низкий
$t_2$	0	Низкий
$o_3$	0	Низкий
$c_o$	0	Низкий
$c_1$	1	Высокий

4. Определим матрицу текущих доступов для облачных сервисов, как  $M : T \times O \rightarrow A$ .

Сервис	Операция	Данные
$t_1$	Чтение	$o_1$
	Запись	$o_2$
$t_2$	Чтение	$o_2$
	Запись	$o_3$

5. Определим уровни конфиденциальности данных, как  $B : S \times O \rightarrow A$ .

Критичные данные  $o_1$  должны храниться и обрабатываться только на частном облаке  $c_1$ , а данные  $o_2, o_3$  можно хранить и в рамках общедоступного облака  $c_o$ .

Данные	Уровень конфиденциальности
$o_1$	1
$o_2, o_3$	0

6. Определим текущие уровни доступа сервиса к данным, как  $C : S \rightarrow L$ .

Сервис	Уровень доступа
$t_1$	1
$t_2$	0

7. Введём в модель новый элемент: карту текущих размещений блоков рабочего процесса  $l : S + O \rightarrow L$ .

Вершина графа	Частное облако $c_1$	Общедоступное облако $c_o$
$o_1$	x	
$t_1$	x	x
$o_2$	x	x
$t_2$	x	x
$o_3$	x	x

Модель Белла-ЛаПадула утверждает, что система безопасна, если для  $\forall t \in T$  и  $\forall o \in O$ , выполняются условия:  $B_{ui} \subseteq M_{ui}$  (1),  $l(t) \leq c(t)$  (2).

Запрет считывания информации сервисом, имеющим уровень доступа ниже уровня секретности информации, опишем как:  $r \in B_{ui} \Rightarrow c(u) \geq l(i)$  (3). Запрет понижать уровень секретности информации, к которой обращается сервис, опишем как:  $w \in B_{ui} \Rightarrow l(u) \leq l(i)$  (4) [2].

Для адаптации классической модели безопасности к условиям среды облачных вычислений предлагается ввести новые переменные.

1. Карта размещений процессов обработки данных ( $P$ ), которая будет включать в себя доступные компоненты среды облачных вычислений. Для рассматриваемого примера карта размещений состоит из двух компонентов:

Компонент	Уровень секретности
Частное облако $c_1$	1
Общедоступное облако $c_o$	0

2. Карта присвоений сервисов и данных к компоненту облака ( $H$ ), которая будет использоваться для описания присвоения каждого сервиса и данных в облаке. Например, вариант присвоения  $o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0$  означает, что данные  $o_1$  размещаются в рамках частного облака  $c_1$ , а сервисы  $t_1, t_2$  и данные  $o_2, o_3$  размещаются в рамках общедоступного облака  $c_o$ .

Таким образом, можно сформулировать правило, позволяющее развернуть блок рабочего процесса (сервис или данные) на компоненте только в том случае, если уровень конфиденциальности компонента больше или равен текущего уровня доступа сервиса и уровня конфиденциальности данных. Если карта присвоений сервисов и данных к компоненту облака требует, чтобы данные  $o_1$  располагались на облаке  $P_a$ , сервис  $t_1$  на облаке  $P_b$ , данные  $o_2$  на облаке  $P_c$ , то тогда должны выполняться условия:  $l(p_a) \geq l(o_1)$ ,  $l(p_b) \geq l(t_1)$ ,  $l(p_c) \geq l(o_2)$  и  $l(p_c) \geq l(o_2) \geq l(t_1)$ .

#### 4. Процедура распределения рабочего процесса между компонентами среды облачных вычислений

Используя полученную модификацию модели доступа Белла-ЛаПадула можно получить все варианты распределения рабочего процесса обработки данных в рамках среды облачных вычислений ( $V$ ), где  $V : T + O \rightarrow P$  [3]. Тогда полный набор возможных вариантов развёртывания рабочего процесса будет состоять из 16 различных комбинаций, где верхний индекс – это компонент, на котором развернуты данные или сервис.

Таблица 1

Множество возможных размещений блоков рабочего процесса между компонентами среды облачных вычислений

№	Вариант
1	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0$
2	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^1$
3	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0$
4	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^1$
5	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^0$
6	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1$
7	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^0$
8	$o_1^1 \rightarrow t_1^0 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1$
9	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0$
10	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^1$
11	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0$
12	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^1$
13	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^0$
14	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1$
15	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^0$
16	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1$

Для осуществления перехода между двумя компонентами облачной среды предлагается ввести особый вид *транспортного сервиса*, который позволил бы преодолеть следующие ограничения:

1) сервис может генерировать выходные данные на другом компоненте облачной среды

без необходимости предварительного сохранения на компоненте своего размещения;

2) сервис может использовать в качестве входной информации данные из другого компонента облачной среды без сохранения на компоненте своего размещения.

Переход предлагается осуществлять за счёт добавления в модель новых компонентов, функционирующих на облаке-источнике и облаке-получателе. В этом случае транспортный сервис будет принимать данные на одном облаке и создавать копию на другом. При осуществлении транспорта необходимо удостовериться, что *облако-получатель* имеет уровень безопасности, достаточный для хранения копии данных, которая наследует уровень конфиденциальности оригинала. В силу этих причин должно быть соблюдено правило:  $l(p) \geq l(o)$ . Если происходит нарушение приведенного условия, то, варианты, по которым происходит распределение рабочего процесса, перестают отвечать установленным требованиям безопасности и должны быть исключены из набора надёжных переходов. В итоге проверка на соблюдение формальных требований безопасности для вариантов размещения рабочего процесса из таблицы 1 не допускает использование более половины возможных вариантов. В результате шесть вариантов, не нарушающих требования безопасности, отражены в таблице 2.

#### Заключение

Для обеспечения безопасной обработки критичных данных в условиях среды облачных вычислений предложена модель безопасности процессов обработки данных, позволяющая на основании требований безопасности, распределить критические активы организации в *новую гибридную среду* облачных вычислений. Адаптирована классическая модель безопасности Белла-ЛаПадула с использованием ключевых элементов теории графов для определения формализованных требований безопасности облачных сервисов и данных.

Таблица 2

**Допустимые варианты распределения рабочего процесса**

№	Вариант
1	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0$
2	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_2^0 \rightarrow t_2^0 \rightarrow o_3^0 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_3^1$
3	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_2^0 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1 \rightarrow \text{передатчик}$
4	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_2^0 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1$
5	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1 \rightarrow \text{передатчик} \rightarrow o_3^0$
6	$o_1^1 \rightarrow t_1^1 \rightarrow o_2^1 \rightarrow t_2^1 \rightarrow o_3^1$

**Список литературы**

1. Peter Mell, Timothy Grance. NIST Special Publication 800-145. The NIST Definition of cloud computing. 2011. 3 p.
2. Bishop M. Computer Security: art and science. ISBN 0-201-44099-7. 2002. 1084 p.
3. Девянин П. Н. Анализ безопасности управления доступом и информационными потоками в компьютерных системах. М.: Радио и связь, 2006, 176 с.
4. Bell, D. E. and LaPadula, L. J.: Secure Computer System: Unified Exposition and Multics Interpretation, Tech report ESD-TR-75-306, Mitre Corp, Bedford, Ma. (1976)
5. Харари Ф. Теория графов. Изд. 2-е. – М.:Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.
6. Вдовин И. СОБИТ 4.1. Издательство: Аудит и контроль информационных систем. ISBN 978-5-9901321-1-5; 2008 г. 240 с.

# АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

**Яхонтов Иван Владимирович**

Аспирант, Всероссийская государственная налоговая академия  
Министерства финансов Российской Федерации

05.13.19

ivan.yakhontov@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрены различные методы анализа и построения систем защиты информации на основе сетей Петри.

**Ключевые слова:** информация, информационная безопасность, сети Петри, системы защиты информации.

## THE ANALYSIS OF MODELS OF INFORMATION PROTECTION SYSTEMS ON THE BASE OF MODIFIED PETRI NETWORKS

**Yakhontov Ivan Vladimirovich**

Postgraduate student,  
The tax academy of the Russian Federation

**Abstract.** In article various methods of the analysis and construction of information systems protection based on Petri's networks are considered.

**Key words:** information, information security, networks of Petri, system of protection of the information.

### Введение

Насколько важна любая информация, относящаяся к бизнесу понятно многим. Пользуясь собранной и обработанной информацией, можно успешно конкурировать на своем рынке и захватывать новые. Информация помогает в поиске партнеров и способствует четкому определению позиции по отношению к ним.

Кроме того, при переходе к рыночной экономике информация становится товаром и должна поэтому подчиняться специфическим законам товарно-рыночных отношений. В этих условиях проблема защиты информации весьма актуальна и для организаций любой формы собственности.

Вопросы безопасности — важная часть концепции внедрения новых информационных технологий во все сферы жизни общества. Широкомасштабное использование вычислительной техники и телекоммуникационных

систем в рамках территориально-распределенной сети, переход на этой основе к безбумажной технологии, увеличение объемов обрабатываемой информации и расширение круга пользователей приводят к качественно новым возможностям несанкционированного доступа к ресурсам и данным информационной системы, к их высокой уязвимости.

Системный подход обеспечивает адекватную многоуровневую защиту информации, рассматриваемую как комплекс организационно-правовых и технических мероприятий. Кроме того, при реализации механизмов защиты должны использоваться передовые, научно обоснованные технологии защиты, обеспечивающие требуемый уровень безопасности, приемлемость для пользователей и возможность наращивания и модификации систем защиты информации (СЗИ) в дальнейшем.

Современные вычислительные системы могут работать в мультипрограммном режиме (одновременно решается несколько задач), в

мультипроцессорном режиме (создаются условия для решения программы задачи несколькими параллельно работающими процессорами), а также в режиме разделения времени, когда к информационным ресурсам одновременно может обращаться большое количество абонентов. При таких режимах работы в памяти компьютеров одновременно могут храниться программы и массивы данных различных пользователей, с ПК или серверами одновременно будет поддерживать связь значительное число абонентов. В этом случае необходимо решение как проблем физической защиты информации, так и защита ее от пользователей несанкционированно вклинивающихся в вычислительный процесс.

В условиях возрастающих возможностей современной технологий задача совершенствования средств анализа, оценки и оптимизации систем физической защиты, особенно на ранних этапах проектирования, становится все более актуальной. Это связано в первую очередь с возрастающей сложностью систем физической защиты и увеличением числа, альтернативных вариантов построения системы. В то же время, важность решения задачи обеспечения безопасности объектов жизнедеятельности человека предъявляет жесткие требования к эффективности систем физической защиты и рентабельности проектных решений, что диктуется условиями рыночной экономики. При этом высокая стоимость систем физической защиты не позволяет провести практическую проверку принимаемых проектных решений. Сложный и дорогостоящий процесс проектирования систем физической защиты предъявляет жесткие требования к проектным решениям, принятым на ранних стадиях разработки проекта.

### 1. Анализ систем физической защиты информации

Анализ моделей СЗИ проводился по следующим показателям:

- возможность рассчитать вероятность реализации угрозы в зависимости от исполь-

зуемых средств защиты, и уязвимостей в них;

- возможность рассчитать время реализации угрозы в зависимости от используемых средств защиты, уязвимостей в них;
- возможность моделирования параллельных процессов преодоления СЗИ;
- возможность моделирования скоординированных действий группы злоумышленников;

Для наглядности результаты сравнительного анализа были помещены в таблицу 1:

«+» возможность реализации данной характеристики;

«-» невозможность реализации данной характеристики;

В результате анализа моделей СЗИ можно сказать, что для оценки защищенности информационной системы (ИС), из рассмотренных моделей, наиболее подходящей с точки зрения характера получаемых показателей является модель, построенная с использованием вероятностных сетей Петри

Таким образом, обобщая полученные результаты анализа, выделим следующее.

Для построения модели оценки защищенности ИС были определены структурные компоненты исследуемой ИС, подлежащие защите, выделены защищаемые ресурсы ИС, проведен анализ модели типичного поведения злоумышленника при взломе ИС, были сформулированы особенности процесса реализации угроз.

В результате анализа моделей СЗИ можно сказать, что для оценки защищенности ИС, из рассмотренных моделей наиболее подходящей с точки зрения характера получаемых показателей является модель, построенная с использованием вероятностных сетей Петри, так как она позволяет рассчитать вероятность реализации угрозы за заданное время и поддерживает возможность моделирования параллельных процессов преодоления СЗИ и моделирования скоординированных действий группы злоумышленников.

Э.Р. Бейбутов в своей статье «Анализ защищенности корпоративных систем на основе

Таблица 1

**Результаты сравнительного анализа программных средств  
оценки эффективности системы безопасности**

Критерии оценки Модель СЗИ	возможность рассчитать вероятность реализации угрозы	возможность рассчитать время реализации угрозы	возможность моделирования параллельных процессов преодоления СЗИ	возможность моделирования скоординированных действий группы злоумышленников
обобщенные модели	-	-	-	-
модели, теории вероятностей	+	-	-	-
модели, теории случайных процессов	+	+ (для полумарк.)	-	-
модели, теории сетей Петри	+	+	+	+
модели, теории автоматов	-	-	-	-
модели, теории графов	-	-	-	-
модели, теории нечетких множеств	+	-	-	-
модели, теории катастроф	+	-	-	-
модели, теории игр	-	-	-	-
модели, энтропийного подхода	-	-	-	-

вероятностных сетей Петри» [6] рассматривает основные элементы защиты корпоративных систем (КС) от внешних и внутренних угроз. Он говорит, что получить количественную оценку защищенности и определить уровень доверия можно с помощью моделирования критических событий, используя вероятностные сети Петри.

Метод, изложенный в его статье, предполагает:

1) выделение и моделирование отдельных механизмов защиты от конкретных типов угроз;

2) вычисление вероятности реализации выбранных типов угроз;

3) определение общей вероятности нарушения безопасности объектов КС;

4) вывод уровня доверия к защищенной КС, исходя из рангов защищаемых объектов и вероятностей проявления угроз.

Полученные результаты можно использовать, как при оценке проектов, так и для контроля существующих КС. Анализ промежуточных значений поможет выявить слабые места и уязвимости в рассматриваемых корпоративных системах.

## **2. Действия по достижению целей атак**

Для успешной реализации угрозы злоумышленник предпринимает конкретные действия, список которых не бесконечен. Можно разбить по группам известные активности в зависимости от их принадлежности к конкретным целям атак (таблица 2).

Таблица 2

Действия злоумышленника

	Серверы демилитаризованной зоны	Серверы корпоративной сети	ЭВМ и серверы внутренней локальной сети	ЭВМ и серверы внешних подразделений корпорации	Соответствующие системы защиты (сокращения раскрыты в тексте)
Mailbombing	X			X	Антиспам
Атаки (D)DoS	X	X		X	МЭ
Подбор пароля	X	X	X	X	IDPS
Rootkits, дыры в ПО	X	X	X	X	Скан., IDPS
Инъекция(SQL,PHP)	X	X		X	Скан.
Вирусы, трояны, черви	X	X	X	X	Антивирус., МЭ
Сетевая разведка	X	X		X	МЭ, IDPS
Man-in-the-Middle	X			X	Крипт.
Сниффинг пакетов	X	X	X	X	VPN, Крипт.
IP-спуфинг	X	X		X	Крипт.

Конечно, в общем случае стоило бы рассматривать всевозможные сочетания действий и целей, но надо учитывать реальные условия эксплуатации КС. Тем более, что, рассматривая только технические аспекты проблемы защищенности корпоративной системы, не стоит забывать об обязательных организационно-правовых режимах, установленных на объекте информатизации, в контролируемой зоне которого она функционирует.

Развитие инфраструктуры вычислительных сетей даёт много возможностей для автоматизированной обработки информации, ускоряет обмен документов и снижает долю рутинных операций в системе. Огромное количество достоинств делает корпоративную сеть с установленными программно-аппаратными системами автоматизации процессов незаменимой при выполнении повседневных задач и ведении бизнеса. Но неизбежно появляются информационные риски, снижение которых достигается установкой защитных комплексов. Вопрос о составе и стоимости необходимых программно-аппаратных систем защиты является основным при создании преград действиям злоумышленников. Это индивидуальная задача проектирования, решение которой выходит за пределы статьи.

**3. Построение вероятностной сети Петри (ВСП) для анализа средств защиты КС**

На рисунке 1 представлена типовая ВСП, которая строится для решения поставленной задачи. Естественно, что при анализе конкретных корпоративных систем, сеть будет меняться, а её параметры перерасчитываться.

Рассмотрим подробнее сеть Петри, изображенную на рисунке 1. Начальная позиция P0 отражает совокупность угроз вирусов, червей и троянских коней. Срабатывание одного из трех переходов (T0,T1,T2) определяет конкретный тип атаки. Позиция P6 с маркером отвечает за безопасное функционирование антивирусной системы. Если срабатывает переход T3, то маркер перемещается в P4, P5, что говорит о появлении новых эпидемий в сети, против которых антивирус может оказаться бессильным. В свою очередь, активация одного из переходов {T5, T6, T7} является следствием не удачной работы эвристического метода, а активация T8 – сигнатурного метода. При успешной реализации угрозы маркер перемещается в позицию P8.

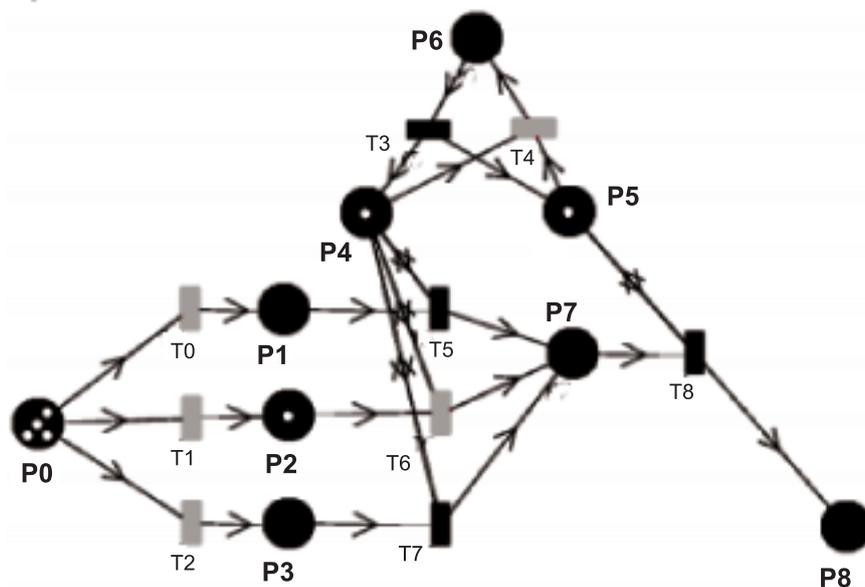


Рис. 1. Сеть Петри работы антивируса.

Аналогичными способами взаимодействия строятся сети Петри других систем защиты КС. Для получения вероятностной сети Петри необходимо заполнить матрицу  $P(r)$ , которая связана с достижимыми разметками, изучаемой сети. Вероятности смены разметок определяются следующими значениями:  $P01(t0)=q01$ ;  $P02(t1)=q02$ ;  $P03(t2)=q03$ ;  $P14(t3)=q14$ ;  $P25(t3)=q25$ ;  $P36(t3)=q36$ ;  $P47(t5)=q47$ ;  $P57(t6)=q57$ ;  $P67(t7)=q67$ ;  $P78(t4)=q78$ ;  $P79(t8)=q79$ .

Параметры вероятностных сетей Петри межсетевого экрана и других средств защиты КС находятся аналогичным способом.

#### 4. Решение задачи о нахождении вероятности реализации угрозы

На этом этапе предполагается, что смоделирована работа всех средств защиты и найдены вероятности смены разметок в соответствующих ВСП. Следующим шагом является вычисление вероятности успешной реализации атаки, т.е. возможности перехода сети Петри из начальной разметки в разметку, соответствующую успешной реализации угрозы.

Вернёмся к вероятностной сети Петри, изображенной на рисунке 1. Для ответа на поставленный вопрос необходимо вычислить вероятность перехода из начальной разметки  $M0(\infty, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$  к разметке  $M'(x, x, x, x, x, x, x, x, 1)$ , которая соответствует проникновению вирусной атаки в корпоративную систему.

Очевидно, что  $M'$  соответствует элементу  $M9$  множества  $R(N)$ . Начальное состояние  $M0$  и состояние  $M9$  соединяют несколько путей.

Так как переход от разметки  $M'$  к  $M''$  не зависит от того, как появилась разметка  $M'$ , а зависит лишь от данного состояния системы, то переходы от одной разметки к другой можно представить цепью Маркова, для которой вероятность перехода от состояния  $S_i$  к состоянию  $S_j$  есть произведение вероятностей перехода к промежуточным между  $S_i$  и  $S_j$  состояниям. Следует, что вероятность  $\bar{P}(M_0 \xrightarrow{v} M)$  определяется формулой (1):

$$\bar{P}(M_0 \xrightarrow{v} M) = \prod_{j=1}^k P_{j-1, j}(r_j) \quad (1)$$

Очевидно, величина  $\bar{P}(M_0 \mapsto M)$  определяется по формуле (2):

$$\bar{P}(M_0 \xrightarrow{v} M) = \sum_{i=1}^l \bar{P}(M_0 \xrightarrow{v_i} M) \quad (2)$$

где  $l$  – число путей.

### 5. Определение уровня доверия к защищенной корпоративной системе

Вернёмся к таблице 1. Предполагается, что уже найдены все вероятности реализации угроз  $P_{ij}$ . Для определения степени критичности целей атак необходимо ввести понятие коэффициента важности объекта  $c_i$ . Перечислим конкретные значения коэффициентов некоторой корпоративной системы ( $\sum c_i = 1$ ): серверы демилитаризованной зоны – 0,25; серверы корпоративной сети – 0,35; ЭВМ пользователей и серверы внутренней локальной сети – 0,1; ЭВМ пользователей и серверы внешних подразделений корпорации – 0,3.

Для каждого объекта по формуле (3) вычислим среднее значение вероятности реализации угроз.

$$\bar{P}_i^{Cp} = \frac{\sum_{j=1}^{R_i} P_{ij}}{R_i} \quad (3)$$

где  $R_i$  – общее количество реализуемых атак.

Далее определим уровень доверия к защищенной КС как сумму произведений соответствующих коэффициентов и средних значений вероятности успешной работы средств защиты:

$$Q = \sum_{i=1}^4 x_i \times (1 - \bar{P}_i^{Cp}) \quad Q \in [0; 1]$$

Разработанный метод позволяет дать количественную оценку информационной безопасности корпоративной системы. Поэтапные действия, исходящие из логичного структурирования объектов, средств защиты и угроз КС, основываются на известных математических аппаратах сетей Петри, цепей Маркова и теории вероятностей.

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Моделирование различных механизмов защиты от конкретных типов угроз является гибкой процедурой. Это говорит о том, что степень приближения модели к реальной системе зависит только от наличия соответствующей информации и требований менеджмента ИБ к детальности проводимого анализа.

2. Вычисление вероятности реализации выбранных типов угроз происходит по апробированным расчетам на основе математического аппарата вероятностных сетей Петри, являющегося развитием теории конечных автоматов.

3. Определяемая общая вероятность нарушения безопасности объекта КС служит важным промежуточным показателем защищенности. Анализ этого значения важен при идентификации рисков, так как помогает оценить уровень угроз интересующего объекта, а не системы в целом.

4. Вывод уровня доверия к КС учитывает коэффициент важности защищаемых объектов, что говорит о его адекватности. Итоговый количественный показатель может использоваться при точном сравнении нескольких корпоративных систем, а также незаменим при выборе наилучших вариантов при проектировании комплексных систем безопасности.

### 6. Модель оценки защищенности корпоративной системы на основе вероятностных сетей Петри

Реализация угрозы в корпоративной информационной системе предполагает поэтапное использование уязвимостей системы защиты информации в данной корпоративной информационной системе. Причинами возникновения уязвимостей СЗИ могут быть различные факторы — это могут быть уязвимости аппаратного и программного обеспечения, некорректно настроенная политика безопасности, уязвимости физической или технической подсистем защиты информации и т.д. Использование какой-либо уязвимости СЗИ дает злоумышленнику новые возможности в корпоративной информационной системе, однако уровень этих возможностей различается в зависимости от

использованных уязвимостей. При этом не все уязвимости доступны злоумышленнику изначально. Часть из них может стать доступной для злоумышленника в процессе преодоления СЗИ как результат использования изначально доступных уязвимостей СЗИ.

Модель реализации угрозы, основывается на работе Арькова П.А. и описывает последовательное использование уязвимостей системы защиты информации, корпоративной системы и отображается в виде сети Петри, описанной кортежем представленным ниже:

$$N = (P1, T, I, W, M0)$$

где P1 – множество мест сети; T – множество переходов представляет собой фактически множество способов эксплуатации той или иной уязвимости; I – отношение между вершинами соответствующее дугам сети; W – функция задающая кратность дуги,  $W=1$ .

условии, что в дальнейшем он перейдет в j-ое состояние.

Анализ сети осуществляется моделированием. При моделировании до достижения одного из поглощающих состояний определяется среднее время, затрачиваемое на осуществление угрозы  $t_{угр}$ , и вероятность P осуществления злоумышленником угрозы при отсутствии ограничений времени.

Архитектура программного комплекса реализующего модель оценки защищенности КИС на основе вероятностных сетей Петри, состоит из четырех блоков (рис. 2).

Первый блок. Пользовательский интерфейс приложения. Пользователь формирует сеть Петри и вводит входные данные: наименование уязвимости, вероятность выбора данной уязвимости, вероятность успешной эксплуатации данной уязвимости, а также пользователь вводит параметры логнормального рас-

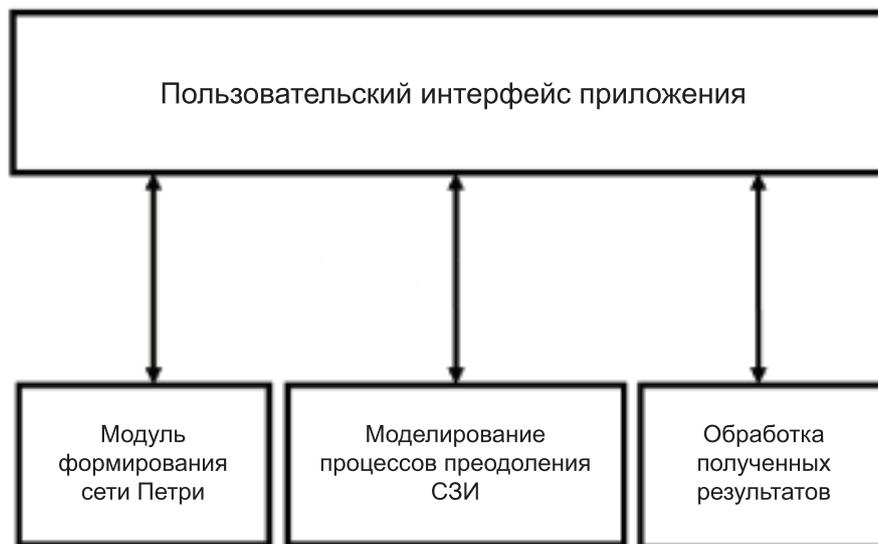


Рис. 2. Архитектура программного комплекса.

Для разрешения конфликтов используется предварительный выбор по вероятности срабатывания перехода, которая интерпретируется как вероятность выбора злоумышленником данного способа эксплуатации уязвимости. В модели время пребывания в состоянии интерпретируется как время необходимое злоумышленнику на эксплуатацию i-й уязвимости, при

пределения для данной уязвимости и время моделирования.

Второй блок. Моделирование процессов преодоления СЗИ. Осуществляется заданное число экспериментов по преодолению СЗИ, в результате чего накапливается статистика успешных и безуспешных атак, а также времени преодоления СЗИ.

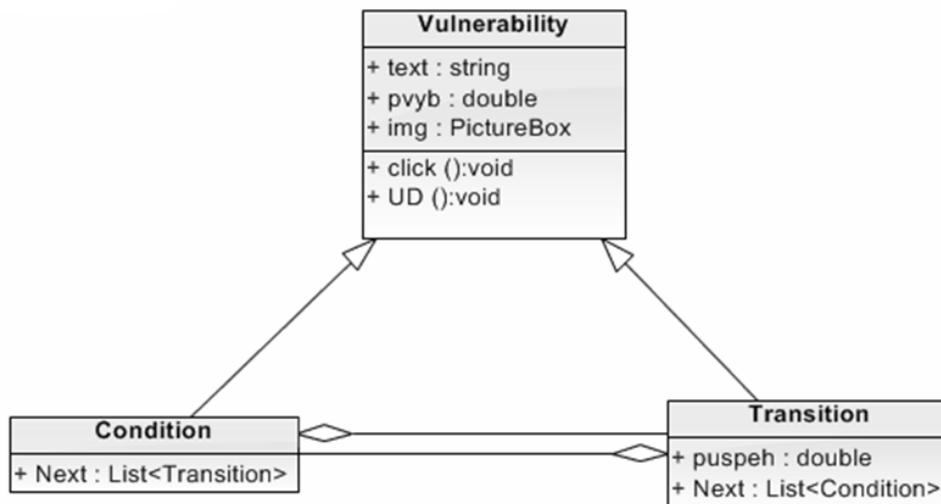


Рис. 3. Классы программного комплекса.

Третий блок. Обработка полученных результатов. Осуществляется обработка полученной статистики экспериментов, на основании которой вычисляется вероятность и среднее время преодоления СЗИ.

В программном комплексе реализованы три класса (см. рисунок 3): родительский класс «Vulnerability» (уязвимость), класс «Condition» (состояние), класс Transition (переход).

Класс «Vulnerability» содержит поля:

- text: string содержит текстовое описание узла сети;
- параметр pvyb: double вероятность выбор этого узла;
- img: PictureBox параметр для графического представления узла.

В классе присутствуют два основных метода click():void вызывается при нажатии на графическое представление узла, для выбора узла сети и второй метод UD():void вызывается при передвижении узла. В нем происходит пересчет координат центра верхней и нижней грани для отображения связей между узлами.

От класса «Vulnerability» (уязвимость) наследуются еще два класса «Condition» (состояние) и «Transition» (переход).

Класс «Condition» наследует все свойства и методы родительского класса «Vulnerability» и

описывает дополнительные свойства характерные для состояния, это: Next: List<Transition> – список объектов класса «Transition» следующих за этим узлом.

Класс «Transition» так же наследует свойства и методы класса «Vulnerability» и имеет свои уникальные свойства, это puspeh: double – вероятность преодоления перехода и Next: List <Condition> – объекты класса «Condition» следующий за данным узлом сети.

На диаграмме показана связь между классами «Transition» и «Condition», от класса «Condition» к классу «Transition» идет ассоциация агрегация, так как к одному объекту класса «Condition» может идти несколько объектов класса Transition.

## 7. Е-сеть

Е-сеть является расширением сети Петри, которая позволяет реализовать множество параллельных информационных процессов. Математическая модель на базе Е-сетей – это графическая модель в сочетании с логическими правилами изменения состояния (разрешающие позиции) Е-сетей, позволяющими воспроизвести динамику функционирования информационной системы, представляет собой математическую модель имитационного типа.

Структурно E-сеть – это граф, состоящий из двух типов вершин: позиций и переходов, соединенных друг с другом ориентированными дугами, причем каждая дуга может связывать лишь позицию с переходом или, наоборот, переход с позицией.

### **Заключение**

Проведен анализ методов оценки и построения систем защиты информации на основе сетей Петри. Выявлены ограничения каждого из подходов и показаны возможные пути их применения в задачах анализа защищенности корпоративных систем.

### **Список литературы**

1. “Математическое моделирование распределенных систем защиты информации”, Давыдова Е.Н. (Davidova\_EN@mail.ru) <http://swsys.ru/index.php?page=article&id=2764>;
2. Сравнительный анализ моделей систем защиты информации. <http://inf-bez.ru/?p=767>;
3. Модель оценки защищенности корпоративной системы на основе вероятностных сетей Петри. <http://inf-bez.ru/?p=769>;
4. Специальные методы неформального моделирования основаны на применении неформальной теории систем. <http://www.virustory.net/infosave42.html>;
5. “Теория сетей Петри и моделирование систем” Питерсон Джеймс. <http://www.kodges.ru/57650-teoriya-setej-petri-i-modelirovanie-sistem.html>;
6. Актуальные проблемы безопасности информационных технологий: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции 2008 года. <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/576/61576/31607>;
7. «Анализ защищенности корпоративных систем», А.А. Астаханов, открытые системы №07-08 2002.

## ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Фофанов Илья Сергеевич**

Аспирант, Всероссийская государственная налоговая академия  
Министерства финансов Российской Федерации  
05.25.05  
fofanov1988@bk.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена функциональная структура вуза и процессный подход к оценке экономической эффективности внедрения ИТ. Также рассмотрены методики расчёта показателей эффективности инвестиций в ИТ.

**Ключевые слова:** управление вузом, ИТ в управлении вузом, структура вуза, процессный подход, инвестиции в ИКТ вуза.

## THE PROCESS APPROACH TO ASSESSING THE COST-EFFECTIVENESS OF IT ADOPTION

**Fofanov Ilya Sergeevich**

Postgraduate student,  
the tax academy of the Russian Federation

**Abstract.** The article describes the functional structure of the university and the process approach to assessing cost-effectiveness of IT adoption. Methods for calculating the effectiveness of IT investments are presented.

**Key words:** Higher education institution managing, IT in higher education management, Higher education institution structure, Process approach, IT investments in higher education.

### Введение

Участие России в Болонском процессе, появление свободы выбора студентами вузов для обучения, как российских, так и зарубежных, сформировавшиеся конкурентные отношения на рынке знаний заставляют вузы стремиться к повышению конкурентоспособности, улучшая качество предоставляемого образования. Рыночный тип организационной культуры вуза, который поддерживает ориентацию организации на достижение целей наиболее эффективно, по мнению исследователей, развит не достаточно даже в передовых учебных заведениях РФ [1].

Согласно данным статистики, растёт доля вузов РФ, использующих ИКТ (к примеру, в 2005г. – 97,4% вузов использовали ПК, в 2006 – 98,1% вузов), а также специальные программные средства (ПС) (в 2005г. – 95,4% вузов, в

2006г. – 95,1%, причём 77,2% вузов указали, что пользуются специальными ПС для решения организационных, экономических и управленческих задач).

Современные отношения на рынке знаний являются жёсткими, основанными на усиливающейся конкуренции. Для того, чтобы успешно выполнять свои функции, решать задачи и развиваться в сегодняшних условиях, вузы вынуждены бороться за повышение эффективности своей деятельности. Основным фактором поддержания приемлемой конкурентоспособности является грамотное управление, под которым понимается генерация «совокупности управляющих воздействий, нацеленных на соответствие реального хода процесса желаемому» [2].

Среди общих положительных последствий внедрения ИСУ среди специалистов упоминаются следующие [3]:

- увеличение качества и оперативности принятия управленческих решений;
- сокращение ошибок управленческого персонала;
- рост производительности труда управленческого персонала;
- увеличение объема обрабатываемой и анализируемой информации;
- улучшение качества обслуживания потребителей и взаимоотношений с партнерами;
- стандартизация и совершенствование процессов деятельности;
- увеличение возможностей прогнозирования, планирования, контроля и анализа деятельности и процессов организации;
- сокращение затрат на управление, непродуктивных расходов, себестоимости производимого товара и операций принятия решений.

Статистика на примере западных компаний показывает следующее [4]:

- снижение транспортно-заготовительных расходов – на 60%;
- сокращение производственного цикла – на 50%;
- снижение задержек с отгрузкой готовой продукции – на 45%;
- уменьшение уровня неснижаемых остатков на складах – на 40%;
- снижение производственного брака – на 35%;
- сокращение затрат на административно-управленческий аппарат – на 30 %;
- сокращение производственного цикла по базовым изделиям – на 30%;
- уменьшение складских площадей – на 25%;
- увеличение оборачиваемости средств в расчетах – на 30%;
- рост оборачиваемости товарно-материальных запасов – на 65%;
- увеличение количества поставок «точно в срок» – на 80%.

Внедрение ИСУ также может позволить:

- уменьшить среднее время, затрачиваемое на принятие управленческого решения;

- уменьшить частоту принятия ошибочных управленческих решений или вероятность принятия ошибочного управленческого решения;
- снизить в целом средние затраты на принятие управленческого решения;
- снизить ущерб от ошибочных управленческих решений за определённый период;
- увеличить скорость обнаружения ошибок в управленческих решениях.

Перед тем как рассмотреть процессный подход к оценке экономической эффективности в ИТ, рассмотрим функциональную структуру вуза, которая проясняет смысл процессного подхода.

### **Функциональная структура вуза**

Вуз можно рассматривать как совокупность шести подсистем, представляющих собой функционально взаимосвязанные сферы деятельности с соответствующими наборами управляемых процессов [1]:

1) учебная деятельность (управление учебно-методическими учебными процессами; управление информатизацией и компьютеризацией);

2) научная деятельность (управление научно-консалтинговой деятельностью; управление проектно-конструкторскими работами);

3) экономическая деятельность (управление экономическим развитием, финансами и бухгалтерским учётом);

4) управленческая деятельность (управление стратегией развития; организация системы и процессов управления; управление персоналом и социальным развитием);

5) маркетинговая деятельность (управление маркетингом образования, качеством образовательного процесса; управление международными связями);

6) хозяйственная деятельность (управление материально-техническим снабжением; управление охраной труда; управление обслуживающим хозяйством и транспортом).

Общепринятым является выделение в составе образовательной деятельности вуза сле-

дующих базовых функций (видов обучения) [2]:

- теоретическое обучение, состоящее в передаче обучающимся фундаментальной и современной информации по определённой области знаний. Подача информации о состоянии и перспективах развития системы знаний в данной области;
- практическое обучение, целью которого является формирование у обучающихся умений и навыков применения теоретических знаний для решения задач в реальных условиях, что, в дальнейшем, обеспечит их результативное участие в деятельности профильных организаций и предприятий.

С позиций степени взаимодействия обучаемых с преподавателями следует различать такие организационно-образовательные функции (формы обучения), как [2]:

- аудиторное обучение, предполагающее совместную деятельность обучаемых и преподавателя в определённые периоды времени (как правило, в часы лекционных и практических занятий) в пассивном (лекционные занятия) или активном (практические занятия) режиме;
- внеаудиторное обучение, состоящее в совместной деятельности обучающихся и преподавателей, носящее более индивидуальный, чем аудиторное обучение характер и заключающееся в таких способах передачи информации, как, например, консультации;
- самостоятельная работа, сущность которой состоит в изучении обучающимися информации, рекомендованной преподавателем, либо определяемой обучаемым, исходя из его личных профессиональных интересов по собственной инициативе, а также в выполнении конкретных заданий в пределах учебных планов подготовки специалистов (домашних заданий, курсовых проектов, выпускных квалификационных работ).

Процессный подход к оценке экономической эффективности внедрения ИТ

В настоящее время, одним из основных подходов к анализу целесообразности инвестиций в информационные системы управления является процессный подход, предполагающий выделение и анализ бизнес-процессов высшего учебного заведения.

При процессном подходе управление рассматривается как процесс – серия взаимосвязанных непрерывных действий. Эти действия называют управленческими функциями.

Каждая управленческая функция тоже представляет процесс, потому что также состоит из серии взаимосвязанных действий. Процесс управления является общей суммой всех функций.

Существует несколько взглядов на состав функций управления, наиболее признанными считаются следующие функции – планирование, организация, мотивация и контроль. Эти четыре первичных функции управления объединены связующими процессами коммуникации и принятия решения. В контексте управления вузом, было бы разумным добавить функции учёта и анализа.

Существует следующая пирамида потребностей вуза в информационных технологиях (рисунок 1):

С учётом присутствия процессов коммуникации на всех уровнях управленческой деятельности, для определения эффектов от внедрения информационной системы управления, казалось бы, достаточно рассмотреть совокупность первых двух уровней технологий, однако в долгосрочной перспективе – необходимо оценить также и остальные уровни.

Информационные системы управления (ИСУ), которые позволяют обрабатывать информацию на различных уровнях, агрегировать её и анализировать, которые позволяют частично автоматизировать труд персонала, в первую очередь повлияют на бизнес-процессы управления вуза. Таким образом, использование процессного подхода может являться основой при определении экономического эффекта от внедрения ИСУ, а также основой при, собственно, проектировании ИСУ. Это позволит



Рис. 1. Пирамида потребностей вуза в информационных технологиях.

произвести системный анализ управленческой деятельности вуза.

Если проанализировать типичные цели, которые ставит перед собой вуз при принятии решения о внедрении ERP системы, то мы увидим, что это, как правило, следующие [5]:

Формирование единого информационного пространства;

- Автоматизация документооборота для наведения порядка в хаосе бумажных документов;
- Автоматизация учета;
- Управление бухгалтерией и финансами;

Методика оценки эффективности инвестиций в информационную систему управления вузом заключается в совместном применении двух подходов [3]:

а) рассмотрение процесса внедрения ИКТ с затратной стороны (с использованием показателя совокупной стоимости владения);

б) рассмотрение внедрения ИКТ в качестве процесса, создающего для вуза положительные измеряемые эффекты;

Анализ экономической эффективности

проекта по внедрению ИСУ по разным оценкам составляет от 1 до 2% стоимости собственно проекта [6]. Поэтому организации, придерживающиеся мнения об убыточности автоматизации систем управления, используют информационные системы управления с расширенными функциональными возможностями без проведения сложных и затратных предварительных работ по оценке эффективности применения ИКТ, стремясь сократить свои финансовые расходы [3]. Это приводит к тому, что затраты на ИКТ определяются не из действительных потребностей, а исходя из критерия «достаточности», то есть как доли от прибыли или как фиксированной величины затрат на одно рабочее место [6].

Для оценки эффективности инвестиций могут быть привлечены экспертные оценки, однако экспертные оценки зачастую основываются на эвристических методах анализа, что привносит свою долю субъективизма.

Элемент субъективизма экспертной оценки может быть существенно снижен в случае, если в вузе внедрена система моделей [6]:

- Ключевых показателей эффективности (KPI) и сбалансированных показателей результативности (BSC);
- Функционально-стоимостного анализа (ABC);
- Совокупной стоимости владения (ТСО).

Поддерживать систему моделей довольно сложно и дорого, особенно, учитывая то, что перерасчёты должны проводиться периодически на протяжении процесса внедрения ИСУ. То есть, переоценка эффективности также является процессом.

Более специфичной методикой оценки эффективности информационно-коммуникационных технологий является методика совокупной стоимости владения ТСО. Совокупная стоимость владения (Total cost of ownership, ТСО) — это методика, предназначенная для определения затрат на информационные системы (и не только), рассчитывающихся на всех этапах жизненного цикла системы.

Упрощённая методика расчета ТСО позволяет понять структуру затрат на информационные технологии. Все затраты разделяются на прямые и косвенные затраты.

Прямые затраты — явные — составляют затраты, проходящие через бухгалтерию (заработная плата сотрудников, закупки оборудования и программного обеспечения, оплата услуг консалтинга и др.).

Непрямые затраты — неявные — выявляются сложнее. В них включаются затраты на устранение сбоев или проблем на компьютерах, простой рабочего времени, командировочные, затраты на предотвращение рисков и затраты на устранение их последствий, затраты на обучение персонала и другие подобные затраты.

Обычно неявные затраты превышают явные.

К сожалению, в настоящее время не существует простых и прозрачных методов оценки финансовых результатов, однако ТСО, относительно достоверно может отразить качество ИКТ проекта и специфику конкретного предприятия.

Также, не стоит забывать о разнородности факторов экономической эффективности, что усложняет оценку внедрения ИКТ проекта.

Однако, можно, выделить такой состав обобщенных, значимых направлений, называемых ключевыми факторами экономической эффективности [6]:

1. Минимизация упущенного дохода или формирование новых источников дохода;
2. Снижение текущих производственных (эксплуатационных) затрат;
3. Снижение административно-управленческих затрат;
4. Минимизация налоговых и других обязательных выплат;
5. Снижение потребности в капитальных затратах;
6. Увеличение оборачиваемости текущих активов.

В дальнейшем, на основе этих ключевых факторов, можно вычислить такие показатели эффективности как ROI, NPV, IRR, PP и другие.

Количественной оценке при внедрении ИКТ могут быть подвергнуты следующие показатели повышения эффективности [7]:

- повышение производительности труда персонала вследствие уменьшения потерь рабочего времени и непроизводительных затрат;
- установление оптимального уровня запаса материальных ресурсов;
- повышение качества продукции и услуг;
- снижение себестоимости продукции (стоимости обучения) за счёт сокращения численности управленческого персонала, оптимизации процессов планирования.

### **Методики расчёта показателей эффективности инвестиций в ИТ**

Для анализа и оценки эффективности инвестиций в проекты по внедрению ИКТ существуют различные методики.

В настоящее время наиболее используемыми за рубежом показателями и методиками,

применяемыми для определения «ценности» и эффективности внедряемых ИКТ, согласно результатам исследования, приведённым в [8], являются ROI и TCO (данные за 2003-й год). Методики ROI и TCO являются более конкретизированными, нежели эвристические BSC и EVA. Однако с течением времени тенденция сохранилась. В 2008-м году 62% технических менеджеров по-прежнему предпочли ROI, остальные 38% менеджеров предпочли TCO [1].

Как считает консультант Cornestone Solutions, Энтони Гианнино «когда вы думаете в рамках TCO – вы не видите информационные технологии в качестве определяющего фактора развития вашего бизнеса или вложений, которые могут увеличить ваши доходы». «ROI стал решением. TCO находится только на одной части уравнения», – говорит Уэйн Садин, СЮ в Loomis USA.

По опыту западных компаний, TCO хорошо работает для большей части таких инфраструктурных проектов как модернизация системы электронной почты. Однако для других проектов, результаты внедрения которых, открывают новые источники доходов или иные возможности экономического роста TCO не достаточно. И в таких случаях, лучше воспользоваться ROI, а TCO может использоваться в качестве дополнительной методики определения того, насколько сложные подходы использует компания относительно формирования и реализации ИКТ стратегии. Следует заметить, что нельзя сказать, что ROI лучше TCO, как нельзя утверждать и обратное. Ни та, ни другая методика не является универсальной и решение о выборе той или иной методики в качестве основной при анализе экономической эффективности должно приниматься опытным менеджером.

Дающей относительно точный результат, является методика Total Cost of Ownership (совокупная стоимость владения). Эта методика подходит для определения наименее затратных вариантов ИКТ-решений. Определение выгод от использования ИКТ должно также базироваться на упомянутом ранее процессном подходе, который рассматривает влияние

ИСУ на бизнес-процессы управления вузом и отвечает концепции агрегирования выгод от конкретных операций до совокупных выгод для всего вуза.

Расчет совокупной стоимости владения ИСУ является ключевым, в контексте обоснования выбора технических элементов и оборудования, ибо программное обеспечение является более сложным объектом для анализа и оценивается по другим методиками, таким как СОСОМО, или СОСОМОII.

Совокупные издержки на ИСУ можно представить в виде суммы двух слагаемых [9]:

$TCO = DC + IC$ , где  $TCO$  – совокупная стоимость владения,  $DC$  – прямые издержки,  $IC$  – косвенные издержки.

Прямые издержки могут быть определены заранее. Косвенные издержки не могут быть четко определены и учтены заранее.

Результаты исследований компаний Microsoft и Interpose показывают следующую структуру издержек в ИТ:

- пользовательские затраты – 45%;
- затраты на аппаратное и программное обеспечение – 21%;
- затраты на поддержку – 11%;
- простои – 10%;
- затраты на управление – 6%;
- затраты на разработку – 4%;
- затраты на телекоммуникации – 3%.

Более половины всех затрат относится к непрямым издержкам. К ним можно отнести простои в работе и пользовательские затраты, такие как обучение работе с программным обеспечением, а также различные ошибки по ходу работы.

С учётом выше сказанного, прямые затраты становится возможным определить по следующей формуле:

$$DC = HS + M + S + D + T;$$

где:  $HS$  – расходы на аппаратное и программное обеспечение;  $M$  – расходы на управление (сетевое и системное администрирование, проектирование);  $S$  – расходы на поддержку (служба технической поддержки, обучение, контракты на поддержку и сопровождение);  $D$  – расходы на разработку (постановка зада-

чи и разработка приложений, документации, тестирование и сопровождение); Т – расходы на телекоммуникации (каналы связи и их обслуживание).

Непрямые затраты определяются по формуле:

$$IC = EU + DT,$$

где: IC – непрямые затраты; EU – затраты, связанные с деятельностью пользователей ИСУ; DT – затраты на простои.

Таким образом, формула для расчёта совокупной стоимости владения ИСУ может принять следующий вид:

$$TCO = HS + M + S + D + T + EU + DT.$$

Особенностью TCO является то, что данная методика может применяться при снижении расходов на ИКТ. В данном случае типовой порядок этапов применения методики может быть представлен следующим образом [10]:

1. Определение прямых и предполагаемых косвенных затрат с разбивкой по отдельным статьям.
2. Расчет значения TCO.
3. Выделение наиболее значительных статей затрат и оценка возможностей снижения расходов на ИСУ.
4. Анализ инструментов по снижению затрат на ИСУ и выбор наиболее эффективных для конкретного случая.
5. Применение выбранных инструментов для снижения итогового показателя TCO.

Инструменты по снижению TCO в общем случае делятся на две группы: технологические и процедурные [10].

К технологическим инструментам относятся:

- приобретение ПО, которое обладает технологическими свойствами, позволяющими существенно снизить объем затрат на его внедрение и последующее использование;
- ориентация на определенные сетевые технологии и архитектуры;
- использование стандартных баз данных;
- применение средств удаленного управления рабочими местами;

- оснащение рабочих мест только необходимыми программными и техническими средствами;
- использование специально адаптированных для конкретной системы компонентов ПО, не нарушающих целостности архитектуры системы;
- применение технологий, снижающих время простоя (источники бесперебойного питания, системы сетевой установки ПО и пр.);
- использование решений для автоматизированного резервного копирования и восстановления и т.д.

Среди процедурных инструментов можно выделить:

- создание на начальных стадиях IT-проекта рабочей группы, которая должна пройти максимально полное обучение и в дальнейшем выполнять значительную часть работ по внедрению системы, обучению пользователей и последующему сопровождению;
- проведение конкурсов при приобретении IT-решений;
- использование референтных моделей, заложенных в интегрированном ПО;
- использование международных и внутренних стандартов по IT, а также методик внедрения ведущих компаний;
- внедрение корпоративной политики стандартизации программного и аппаратного обеспечения;
- создание централизованной службы помощи, располагающей базой знаний по возможным проблемам;
- разработка плана действий в экстренных ситуациях (например, в случае сбоя, хакерской или вирусной атак).

Для того, чтобы оценить экономический эффект от внедрения ИСУ, основываясь на процессном подходе, можно агрегировать эффекты по отдельным управленческим функциям: планирование, организация, контроль, учёт и анализ.

### Список литературы

1. Ключев А.К., Новые модели управления вузом: шаг вперед или два назад? / А.К. Ключев // Университетское управление. – 2004. №5-6. – С.53-61.
2. Арсеньев Ю.Н. Организационное поведение: учеб. Пособие для вузов / Ю.Н. Арсеньев, С.И.Шелобаев, Т.Ю.Давыдова. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2005. – 399 с.
3. Подолякин О. В. Оценка эффективности инвестиций в информационную систему управления вузом – Дисс. ... канд. экон. наук. – Вологда, 2008. – 167 с.
4. Филиппенко И., Выбор ПО для автоматизации управления / [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.logolex.com.ua/articles/22/175/>
5. Черненко М.В. Экономический эффект от внедрения систем управления предприятием [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.cfin.ru/management/practice/supremum2002/19.shtml>
6. Кадушин А., Михайлова Н. Оценить нельзя верить [Электронный ресурс] – Режим доступа [http://www.iteam.ru/publications/it/section\\_53/article\\_2159/](http://www.iteam.ru/publications/it/section_53/article_2159/)
7. Сизов А.В. Принципы и методы оценки эффективности инвестиций в информационные технологии: дис. на соиск. уч. ст. к.э.н.: 08.00.05 / А.В. Сизов – М., 2003. – 193с.
8. Measuring IT value [Электронный ресурс] / T.Miner. – Электрон. Дан. – Режим доступа: <http://www.advisal.com/docs/w5007-Measuring-IT-value.pdf>. – Загл. с экрана.
9. Measurement [Электронный ресурс] / Gartner, Inc. – Электрон. Дан. – [USA]. Режим доступа: [http://www.gartner.com/4\\_decision\\_tools/modeling\\_tools/costcat.pdf](http://www.gartner.com/4_decision_tools/modeling_tools/costcat.pdf) – Загл. с экрана.
10. ТСО, или как управлять IT-затратами [Электронный ресурс] / Интернет-портал для управленцев. – Электрон. дан. – Киев – Режим доступа: <http://www.management.com.ua/ims/ims023.html>. – Загл. с экрана.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛОЕВ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА РЕКАХ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

**Москвин Юрий Павлович**

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,  
Государственный гидрологический институт  
25.00.27  
yrmosk@gmail.com

**Аннотация.** Данные многолетних экспедиционных наблюдений за снежным покровом, совместно с результатами авиационных гаммасъемок позволили оценить неравномерность распределения запасов воды в снежном покрове по территории полуострова Ямал. Используя данные наблюдений сетевых метеостанций, выявлена временная изменчивость высот снежного покрова на рассматриваемой территории, а также построены карты изменчивости распределения снежного покрова. Гидрологические и водно-тепlobалансовые исследования позволили оценить коэффициенты весеннего стока, с учетом которых построена карта слоев стока весеннего половодья на полуострове Ямал.

**Ключевые слова:** Закономерности распределения снега, коэффициенты стока, карты слоев половодья.

## DETERMINATION OF SPRING FLOOD LAYERS IN RIVERS OF THE YAMAL PENINSULA

**Moskvin Iurii Pavlovich**

Ph.D. of Geographical Sciences, Senior Research Fellow  
National Institute of Hydrology

**Abstract.** Long-term expeditionary snow cover observation data coupled with results of aerial gamma-ray surveys enabled assessing nonuniformity in distribution of water storage in the snow cover over the Yamal peninsula. Temporal variability of snow cover depth over the study area was revealed with the use of observation data from meteorological network, and maps of variability in snow cover distribution were constructed. Hydrological and heat-water balance studies enabled determination of spring runoff coefficients which were taken into account in mapping spring flood layers of the Yamal peninsula.

**Key words:** Regularities of snow cover distribution, runoff coefficients, maps of flood layers.

**В** период весеннего половодья на реках Крайнего Севера Западной Сибири стекает 75-90% общего объема годового стока. Столь большая доля весеннего стока рек не только повышает требования к расчету гидрологических характеристик весеннего половодья, но и определяет первоочередность изучения процессов формирования стока в весенний период. Большие объемы весеннего стока обусловлены, прежде всего, длительностью холодного периода года, в течение которого происходит аккумуляция выпадающих атмосферных осадков. Таким образом, расчет максимальных запасов воды в снежном покрове является первостепенной задачей при расчетах характеристик максимального стока весеннего половодья рассматриваемого района.

Расчет максимальных запасов воды в снежном покрове на водосборах рек рассматриваемого региона встречает ряд трудностей, связанных не только с отсутствием сведений о закономерностях распределения снега на различных ландшафтах Крайнего Севера, но и с методическими недостатками снегомерных наблюдений, проводимых метеорологическими станциями в этом районе. К этим недостаткам следует отнести: нерепрезентативность для материковой части полуостровов наблюдений на снегомерных маршрутах, вследствие их прибрежного расположения (Карское море, Обская и Тазовская губа), а также размещение указанных снегомерных маршрутов на плоских водораздельных пространствах, не позволяющих учитывать накопление снега в овражной сети и речных долинах.

Зимний период в арктической части Западной Сибири характеризуется сильными ветрами, что создает исключительно благоприятные условия для снегопереноса по площади и накопления снега в речной и овражной сети [1]. Для рассматриваемого района площадь, занятая врезами гидрографической сети, составляет 6-15% площади водосборов. В весенний период в отдельных оврагах глубина снежного покрова достигает 6-7 метров. В соответствии с требованиями “Указаний по производству снегомерных наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах” [2], максимальные запасы воды в снежном покрове, по данным ландшафтно-маршрутных снегоъемок, рассчитываются как средневзвешенные с учетом площадей, занимаемых основными элементами ландшафта. Вопреки рекомендациям [2], по имеющимся у нас данным, ни одна метеостанция в данном районе наблюдений в оврагах и долинах рек не ведет.

Таким образом, решение проблемы определения максимальных влагозапасов в снежном покрове на водосборах полуостровов Ямал, Гыданский и Тазовский требует решения трех задач: 1) разработки методики производства наблюдений за снегом в оврагах при 6-7 метровой высоте и плотности, достигающей 0,5-0,6 г/см<sup>3</sup>, 2) обоснования методов исправления данных многолетних наблюдений метеостанций на величину недоучета снегопереноса и снегонакопления в долинах рек и оврагах, 3) разработки методов экстраполяции данных прибрежных снегоъемок на материковую часть.

Экспедиционные исследования, проведенные в течение 10-ти лет ГГИ в северной и южной частях полуострова Ямал, позволили разработать методику выполнения максимальных снегоъемок и расчета запасов воды в снеге в условиях овражной местности Крайнего Севера Западной Сибири [1]. Сравнение полученных результатов расчета с данными максимальных снегоъемок сетевых метеостанций, выполненное за период экспедиционных наблюдений, показало, что недоучет влагозапасов сетевыми метеостанциями в снеге овражной

сети составляет от 22 до 27% от их величины на водораздельных пространствах.

Количественный учет максимальных влагозапасов в снежном покрове на речных водосборах, при отсутствии данных наблюдений на материковой части района, возможен только при проведении экспедиционных снегоъемок совместно с авиационными гамма-съёмками, выполненными на больших территориях. Указанные работы проводились ГГИ на полуострове Ямал в 1989-1990 г.г. [1]. Общая протяженность авиационных гамма-съёмок ежегодно составляла порядка 1350 км, что вполне достаточно для изучения процессов снегопереноса. Основной структурной единицей сети снегоъемки является маршрут, представляющий собой по возможности прямой участок, начинающийся и оканчивающийся хорошо заметными естественными ориентирами. На каждом маршруте, в зависимости от его длины, определялось от 30 до 160 осредненных точек. Поскольку маршруты гамма-съёмок выбирались визуально по ландшафтным признакам, получаемые данные нуждались в проверке на однородность залегания снежного покрова двух равных частей каждого маршрута по средним значениям и дисперсиям. Если маршрут оказывался неоднородным, то для дальнейшего использования каждая его часть рассматривалась как самостоятельный участок, обладающий собственными характеристиками.

Полученные по отдельным маршрутам данные о запасах воды в снежном покрове были приведены к многолетнему периоду. Приведение выполнено по данным наблюдений метеорологических станций, по зависимости  $S_i = f(S)$ , где  $S_i$  – максимальные запасы воды в снеге за конкретный год,  $S$  – среднее многолетние значения. Наиболее продолжительные ряды наблюдений за снежным покровом (с 1937 по настоящее время) имеют метеостанции Яр-Сале, Салехард, Новый Порт, Се-Яха и ст. им. Попова. Оценка репрезентативности указанного периода проводилась с использованием разностных интегральных кривых. В результате было установлено, что указанный период равномерно охватывает как малоснеж-

ные, так и многоснежные годы наблюдений. Пропуски в рядах наблюдений и приведение коротких рядов снеговосъемок других станций осуществлялось методом множественной линейной корреляции.

Полученные характеристики максимальной высоты снежного покрова после восстановления пропусков и приведения к многолетнему периоду для станций, расположенных на полуострове Ямал, приведены в табл.1.

Таблица 1

**Характеристики максимальной высоты снежного покрова ( $H_{cp}$ ) по данным метеостанций полуострова Ямал**

Метеостанция	$H_{cp}$ , см	$C_v$	$C_s$
Имени Попова	47	0,36	0,24
Тамбей	40	0,28	0,54
Харасавей	31	0,29	0,26
Се-Яха	43	0,34	0,11
Каменный Мыс	61	0,31	0,43
Яр-Сале	34	0,29	0,34
Новый Порт	48	0,30	1,33
Тадибеяха	61	0,25	0,24

В результате выполненных расчетов для каждого из снегомерных участков были получены значения среднемноголетней максимальной высоты снежного покрова. Картирование максимальных высот снежного покрова позволяет отметить некоторую закономерность в их распределении на полуострове Ямал. Минимальная высота снега характерна для центральных частей полуострова (35-45см), относительное увеличение высот снежного покрова (до 50-60см) отмечается вдоль западного и восточного побережья Ямала. Некоторое увеличение высот снега прослеживается также и с юга на север (от 40-50 см на юге до 60-70 см на севере). Отмечается некоторый минимум южнее Байдарацкой губы, что является следствием влияния Уральских гор, препятствующих западному переносу.

Временная изменчивость максимальных высот снежного покрова практически для всех станций полуострова Ямал заключается в пределах  $C_v = 0,25-0,36$ . Поэтому для простоты решения практических задач была построена карта средних по маршрутам, максимальных многолетних (1% обеспеченности) высот снежного покрова при  $C_v = 0,30$  [1].

Для определения пространственной изменчивости максимальных высот снежного покрова были рассчитаны коэффициенты вариации высот снега на отдельных маршрутах, по данным которых построена карта (рис.1).

Полученная карта свидетельствует об увеличении характеристик изменчивости максимальных высот снежного покрова в центральных частях полуострова Ямал и их уменьшении в прибрежных зонах. Указанное обстоятельство вполне правомерно, поскольку изменчивость высот снежного покрова является следствием расчлененности рельефа местности. В центральных частях полуострова, где абсолютные отметки поверхности земли достигают значений 50-70 м БС, за счет эрозионной деятельности озерных котловин, водораздельных склонов, рельеф имеет большие перепады высот, чем в прибрежной зоне. Территория, примыкающая к Карскому морю и Обской губе, в сравнении с центральными частями полуострова, более ровная, имеет небольшие перепады высот и, как следствие, более ровное залегание снежного покрова.

Осредненные и приведенные к многолетним значениям запасов воды в снежном покрове данные результатов гамма-съемок послужили основой для построения карт среднемноголетнего слоя стока весеннего половодья.

Гидрологические и водно-теплобалансовые наблюдения, проведенные в течение ряда лет на полуострове Ямал, позволили получить данные о коэффициентах стока весеннего половодья.

Средние по водосборам коэффициенты стока по наиболее продолжительному ряду наблюдений имеют минимальное значение, равное 0,74 (1986 г.), т.е. затраты влаги на ис-

парение и изменение влагозапасов в почво-грунтах составили 26% (около 80 мм) от воды, поступившей на водосбор за период половодья. Максимальные значения коэффициентов стока в 50% случаев (четыре из восьми лет наблюдений) превышали 0,90. Располагая данными об испарении и изменении влагозапасов на исследуемых водосборах, были рассчитаны водные балансы водосборов за весенний период года. Полученные результаты полностью подтвердили полученные коэффициенты стока. Причем было установлено, что на испарение с водосборов расходуется не только влага, поступающая на поверхность при таянии снежного покрова, но и ежегодно отмечается некоторое иссушение оттаявшего к концу весеннего периода слоя почво-грунтов.

Учитывая выше сказанное, а также вводя некоторое относительно гарантированное превышение расчетных величин слоев весеннего половодья, можно принять в качестве расчетного максимальный наблюдаемый коэффициент стока, равный 0,96. Следует иметь в виду, что максимальные значения коэффициентов стока будут наблюдаться в годы с высокой дружностью весеннего половодья и наиболее коротким периодом весеннего стока, что связано с наименьшими потерями стока на испарение, то есть в годы формирования половодий высокой обеспеченности, расчетные значения которых используются при проектировании.

Продолжительность весеннего половодья достаточно надежно определяется методами регрессионного анализа. Это позволяет, на основе данных наблюдений метеорологических станций, определить величины ежегодных жидких осадков, выпадавших в течение весенних половодий за весь период наблюдений. Затем, используя результаты, полученные при изучении пространственной и временной изменчивости распределения снежного покрова, и принимая коэффициент стока равным 0,96, были рассчитаны слои стока и составлена карта среднееголетних слоев стока весенне-летнего половодья рек для территории полуострова Ямал (рис. 2).



Рис. 1. Коэффициенты вариации высоты снежного покрова.

Как следует из рисунка, распределение среднееголетних слоев стока весенне-летнего половодья рек полуострова Ямал имеет определенную закономерность. Наименьшие слои стока весенне-летнего половодья (190 мм) характерны для центральных частей полуострова. Относительное увеличение рассматриваемой характеристики (до 250 мм) отмечается в прибрежных районах.

Такое распределение слоев весенне-летнего половодья обусловлено характером выпадения твердых осадков и снегопереносом, что подтверждается данными гамма-съемок.

Полученные результаты значительно расходятся с аналогичными картами [3], где отмечается закономерное уменьшение слоев

стока с юга на север. Последнее объясняется, прежде всего, отсутствием режимных наблюдений на реках арктической зоны Западной Сибири и, как следствие – переносом гидрологических характеристик из центральных районов Западной Сибири на совершенно неизученные территории Крайнего Севера. Полученные карты (рис.1, 2) были использованы при разработке методов расчета максимальных расходов воды для полуострова Ямал [1].



Рис. 2. Среднемноголетние  
слои стока весенне-летнего  
половодья.

### Список литературы

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под редакцией С.М.Новикова. – СПб ВВМ. 2009. 536 с.
2. Указания по производству снегомерных наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах. Валдай. Гидрометеиздат, 1965.-58 с.
3. СНиП 2.01.14-83.

## ОСОБЕННОСТИ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ В РУСЛОВОЙ СЕТИ МАЛЫХ РЕК И ОВРАГОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА

**Москвин Юрий Павлович**

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,  
Государственный гидрологический институт

25.00.27

ypmosk@gmail.com

**Аннотация.** Данные многолетних экспедиционных наблюдений за снежным покровом, позволили количественно оценить неравномерность распределения запасов воды в снежном покрове на речных водосборах. Рассмотрены условия формирования весеннего стока на малых водосборах полуострова Ямал, а также особенности проведения гидрометрических работ. Построена карта слоев стока весеннего половодья на полуострове Ямал.

**Ключевые слова:** Закономерности распределения снега, коэффициенты стока, карты слоев половодья, особенности проведения гидрометрических работ и подсчета стока в снежном русле.

## CHARACTERISTICS OF SNOW ACCUMULATION IN CHANNEL NETWORK OF SMALL RIVERS AND RAVINES OF THE FAR NORTH OF WESTERN SIBERIA AND CONDITIONS OF MAXIMUM FLOW FORMATION

**Moskvin Iurii Pavlovich**

Ph.D. of Geographical Sciences, Senior Research Fellow  
National Institute of Hydrology

**Abstract.** Long-term expeditionary snow cover observation data coupled with results of aerial gamma-ray surveys enabled assessing nonuniformity in distribution of water storage in the snow cover of watersheds. Conditions of spring flow formation in small watersheds of the Yamal peninsula as well as specific features of performing hydrometrical work are analyzed. Spring flood maps of the Yamal peninsula are constructed.

**Key words:** Regularities of snow cover distribution, runoff coefficients, maps of flood layers, specific features of performing hydrometrical work and calculating runoff in a snow course.

Территория, занятая Ямалом, Гыданским и Тазовским полуостровами, представляет собой холмистую равнину с относительно большей густотой речной и овражной сети, имеющей достаточно глубокие (20-40 м) врезы речных долин и оврагов [1]. Зимний период в арктической части Западной Сибири характеризуется сильными ветрами, что создает исключительно благоприятные условия для снегопереноса по площади и накопления снега в речной и овражной сети. Для рассматриваемого района площадь, занятая врезами гидрографической сети, составляет 6-15% площади

водосборов. В весенний период в отдельных оврагах глубина снежного покрова достигает 6-7 метров, что при средних плотностях снега 0,5-0,6, делает невозможным инструментальное определение высот снежного покрова.

Экспедиционные исследования, проведенные в течение ряда лет ГГИ в северной и южной частях полуострова Ямал, позволили разработать методику выполнения максимальных снегосъемок в условиях овражной местности Крайнего Севера Западной Сибири. Общие правила проведения снегосъемок изложены в Указаниях [2]. Как показали наблюдения, на

рассматриваемой территории снегомерные маршруты следует располагать на трех, наиболее характерных для данной местности элементах ландшафта:

- плоских водораздельных пространствах,
- в широких (более 400 м) долинах рек,
- в оврагах и узких долинах рек (менее 400 м).

При значительной неравномерности снегозапасов на различных элементах ландшафта точность расчета средних для водосбора запасов воды в снеге зависит от правильности определения площадей каждого ландшафта. Анализ карт масштаба 1:25000 и результатов нивелировок различных типов оврагов и речных долин показал, что для рассматриваемого района карты искажают (увеличивают) истинную ширину оврагов и речных долин малых рек на 30-40%, а в отдельных случаях – до 100%. Поэтому определение ширины оврагов должно производиться либо по нивелировочным профилям, либо по материалам аэрофото съемки с использованием стереоскопа.

Определение ширины оврагов на их поперечных профилях обычно не вызывает особых трудностей, поскольку границы оврагов достаточно хорошо прослеживаются по резкому изменению уклонов поверхности. Однако в отдельных случаях бровки оврага (либо одна из бровок) слабо выражены. Для устранения указанной неопределенности принято было считать бровкой точку, в которой увеличение уклона поверхности склона достигает значенной 50‰.

Для производства наблюдений выбирались несколько оврагов различной ширины. На выбранных оврагах разбивались поперечники таким образом, чтобы охарактеризовать снегозапасы в них во всем диапазоне их поперечных размеров (от 0 до 400 м).

Начало и конец поперечников закреплялись временными реперами и вешками, профили поперечников детально нивелировались и увязывались с временными реперами. При проведении максимальных снегосъемок высота снега в оврагах не измерялась, выполнялась лишь нивелировка поверхности снежного покрова и реперов на поперечниках. Высота снеж-

ного покрова в отдельных точках на поперечнике определялась при камеральной обработке совмещенных профилей оврагов и поверхности снежного покрова.

Плотность снежного покрова в оврагах определялась не менее чем в 3-х точках, с различной высотой снега (для оврагов Ямала, с 2-х, 4-х и 6-ти метровым снегом).

В речных долинах, при значительной крутизне склонов, особенно на вогнутых берегах, весной образуются надувы снега, обычно от 10 до 25 м шириной с высотой снежного покрова до 4-7 м. При этом особенности ветрового снегопереноса состоят в том, что в ложе речной долины высота снежного покрова, как правило, меньше, чем на водораздельных пространствах, то есть, наблюдается не только снос снега с водораздельных пространств в речные долины, но и вынос снега из речных долин. Поэтому, чем шире речная долина, тем меньше в ней проявляются явление снегонакопления. Экспедиционными исследованиями установлено, что запасы воды в снежном покрове в долинах шириной более 400 м, с учетом присклоновых надувов, становятся равными указанной величине на открытых водораздельных пространствах. В более узких речных долинах, за счет присклоновых надувов, и, особенно, в оврагах, запасы воды в снеге значительно увеличиваются. Высота снежного покрова в оврагах зависит не только от их ширины, но и от общей снежности зимнего периода. В годы с большим количеством зимних осадков овраги шириной до 60-70 м заносятся снегом полностью, а овраги шириной до 20 м ежегодно заполняются снегом по бровки. Ориентация оси оврага, как показали наблюдения, на степень заполнения оврага снегом сказывается только в устьевых участках, на расстоянии 70-100 м от выхода в долину рек. Это обстоятельство в значительной мере упрощает разработку методов расчета снегозапасов.

Следует отметить, что южный (Новопортовский) гидрологический стационар ГГИ расположен в местности прибрежного типа. Здесь абсолютные отметки верховьев

оврагов изменяются от 25 до 40 м, подошв оврагов – от 8 до 12 м. Преобладающие грунты в рассматриваемом районе – пылеватые пески. Указанные особенности определяют морфологию оврагов, которые могут быть охарактеризованы как относительно узкие и не глубокие в верхних своих частях, однако имеющие значительную протяженность.

Северный (Бованенковский) стационар ГГИ расположен в местности холмисто-увалистого типа. Абсолютные отметки верховьев оврагов изменяются от 40 до 50 м, подошв оврагов – от 10 до 15 м. Грунты в этом районе – супеси и легкие суглинки. В связи с этим морфология оврагов значительно отличается от морфологии исследованных оврагов в южной части Ямала. Здесь, как правило, даже в верхних частях овраги достаточно широкие (100-200 м), имеют лопастную форму и довольно значительную глубину (20-25 м).

Морфологические параметры поперечников оврагов и долин малых рек описываются тремя основными характеристиками: шириной, глубиной и формой профиля оврага или долины. При определении указанных характеристик вызывает затруднение, прежде всего, чисто качественное определение формы оврага или долины малых рек. Кроме того, определение глубины оврагов на конкретном поперечнике требует выполнения нивелировки его профиля, поскольку использование для этих целей карт масштаба 1:25000, как уже отмечалось выше, дает значительные расхождения получаемых величин в сравнении с результатами нивелировок.

Для упрощения решения рассматриваемой задачи была исследована пространственная устойчивость отношений морфометрических характеристик врезов гидрографической сети. Исходной предпосылкой к подобному решению явились следующие соображения:

- современные эрозионные врезы гидрографической сети представляют собой достаточно устойчивый во времени результат взаимодействия поверхностных вод, многолетней мерзлоты, состава грунтов, растительного покрова и базиса эрозии.

- для отдельно взятого района, учитывая приблизительное равенство перечисленных факторов, должно соблюдаться подобие морфологических форм, то есть при одинаковых площадях водосборов размеры дренирующих их оврагов должны быть одинаковы.

Исходя из указанных соображений, следует ожидать наличия определенных закономерностей в соотношениях ширины, глубины и формы оврагов на конкретных поперечниках. Для проверки этого предположения строились зависимости вида  $H = f(B)$ , где  $H$  – максимальная глубина оврагов и речных долин,  $B$  – их ширина. Полученные результаты подтвердили исходные предположения о наличии закономерностей в соотношениях ширины и глубины оврагов. Следует отметить, что указанная зависимость отражает соответствие морфологических форм гидрографических врезов для различных местностей, где расположены южный и северный стационары ГГИ, несмотря на упомянутое различие в высотных отметках водосборов, грунтов и слоях стока. Устойчивость подобных связей по территории Ямала подтверждается ранее рассмотренной характеристикой оврагов, где указывалось, что овраги в районе северного стационара, ввиду значительных перепадов высот, имеют глубокие врезы, однако здесь же наблюдаются и большая ширина оврагов в самых верхних их частях. Выборочная проверка, выполненная по картам и аэрофотоматериалам на других частях полуострова Ямал, также подтверждает полученную зависимость. Это обстоятельство позволяет использовать для анализа распределения снежного покрова в оврагах единую морфологическую характеристику – ширину оврага на выбираемых поперечниках.

Экспедиционные исследования процессов снегонакопления, выполненные в течение ряда лет (1983-1991 гг.) в различных частях полуострова Ямал, позволили получить зависимость коэффициента заполнения оврагов снегом ( $K_{сн}$ ) от отношения средней высоты снежного покрова на водораздельных пространствах ( $h_{сн}$ , м) к ширине оврагов ( $B$ , м). Указанный

коэффициент ( $K_{\text{сн}}$ ) представляет собой соотношение площади сечения снежного покрова к площади сечения самого оврага на конкретном поперечнике ( $K_{\text{сн}} = F_{\text{сн}}/F_{\text{ов}}$ , где  $F_{\text{сн}}$  – площадь снежного покрова в поперечном сечении оврага,  $F_{\text{ов}}$  – площадь поперечного сечения оврага). При отсутствии снега в овраге  $K_{\text{сн}} = 0$ , если же овраг занесен снегом до линии, соединяющей его бровки, то  $K_{\text{сн}} = 1$ .

Полученная зависимость имеет вид:

$$K_{\text{сн}} = 59 h_{\text{сн}} / B \leq 1 \quad (1)$$

Средняя высота снега на конкретном поперечнике оврага ( $H_{\text{сн}}$ , м), полученная с учетом обобщения соотношений морфологических форм оврагов и формулы (1), принимает вид:

$$H_{\text{сн}} = 184,4 h_{\text{сн}} / B + 0,38 \quad (2)$$

Как установлено данными наблюдений за различные годы, плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) снежного покрова в оврагах зависит от его высоты ( $H$ , м), и может быть определена по зависимости:

$$\rho = 0,0337 H + 0,34 \quad (3)$$

Таким образом, запасы воды в снеге на конкретном поперечнике оврага ( $S_{\text{ов}}$ , мм), можно рассчитать по формулам:

для южной половины Ямала

$$S_{\text{ов}} = 1127300 (h/B)^2 + 62200 (h/B) + S_{\text{вд}}, \quad (4)$$

для северной половины Ямала

$$S_{\text{ов}} = 1127300 (h/B)^2 + 65800 (h/B) + S_{\text{вд}}, \quad (5)$$

где,  $S_{\text{вд}}$  – запасы воды в снеге на водоразделе, мм.

С учетом выше указанного, при наличии данных о ширине оврагов можно проводить расчет средней высоты снега и средних запасов воды в снежном покрове для конкретного поперечника оврага или долины реки, в зависимости от запасов воды в снеге на водоразде-

льных пространствах, определяемых сетевыми метеорологическими станциями. При выполнении расчетов максимальных влагозапасов в снеге на водосборах конкретных рек используются материалы аэрофотосъемок, по которым выделяется гидрографическая сеть с шириной врезов до 400 м. Полученная сеть по всей длине разбивается поперечниками через 250 м. Затем по приведенным зависимостям (4) и (5) определяются запасы воды в снежном покрове на каждом поперечнике, после чего подсчитываются общие запасы воды на водосборах рек как средневзвешенные, с учетом овражности указанных водосборов. Сравнение результатов расчета с данными максимальных снегосъемок сетевых метеостанций, выполненное за период экспедиционных наблюдений, показало, что недоучет влагозапасов сетевыми метеостанциями в снеге овражной сети составляет от 22 до 27% от их величины на водораздельных пространствах.

В связи с изложенными особенностями снегонакопления в овражной сети и долинах малых рек районов Крайнего Севера, следует особо рассмотреть вопросы гидрологического обоснования проектов строительства линейных сооружений в этом регионе. Во избежание подтопления и разрушения инженерных сооружений, пересекающих овраги и долины ручьев, следует предусматривать пропуск талых вод. Максимальный уровень на реках, при отсутствии наблюдений, определяется, как правило, по рассчитанному максимальному расходу воды заданной обеспеченности, используя зависимости  $Q = f(H)$  для конкретного створа. Однако, для малых рек и оврагов в рассматриваемом районе такой подход к определению максимальных уровней неприемлем поскольку в начале весеннего снеготаяния сток в оврагах и на малых реках начинается поверх снежного покрова по оси ложбины в снежном русле. В течение 2-4 суток после начала стока вода промывает себе снежное русло, которое постепенно понижается в толще снега, пока достигает дна оврага (реки). В связи с этим максимальные уровни наблюдаются в начале весеннего периода, а максимальные расходы

– после размыва ручьем снежной толщи, при этом высотная отметка уровня воды соответствующего максимальному расходу значительно ниже уровня начального периода стока.

Как показали наблюдения, мезорельеф поверхности снега в оврагах и долинах малых рек имеет достаточно сложный характер, зачастую по длине оврага (реки) наблюдаются воронки, заструги, снежные обрывы и т.д. Поэтому определение нижней отметки поверхности снежного покрова носит в достаточной степени неопределенный характер. В связи с вышесказанным аппроксимация эмпирических зависимостей, полученных далее по результатам наблюдений, выполнялась по огибающим наивысших точек, то есть, при равных условиях снежности и ширины оврагов, расчет проводился по наивысшим из минимальных отметок возможных профилей снежного покрова. Такой прием позволяет определять наивысшие уровни весенних вод, с некоторым гарантированным превышением относительно результатов измерений отдельного года и всецело оправдан, учитывая неопределенность ежегодного формирования мезорельефа поверхности снежного покрова в оврагах и руслах малых рек.

В результате анализа имеющихся материалов за плоскость отсчета минимальных высот снежного покрова на конкретном поперечнике принималась отметка русловых бровок ручьев в оврагах, а где постоянные русла ручьев отсутствуют – нижняя точка профиля оврагов. Нижняя точка профиля оврага достаточно хорошо отыскивается на поперечниках при площади водосборов оврагов до 1,5-2,0 км<sup>2</sup>. Именно эта площадь обеспечивает существование постоянного водотока, который начинает вырабатывать собственное русло. По мере увеличения площади водосбора ручья, как правило, имеют сложный профиль долины с пойменными участками, русловыми бровками и хорошо выраженным руслом.

По материалам наблюдений получена зависимость минимальной высоты снежного покрова на поперечниках ( $h_{\text{сн. мин}}$ ) от вышеуказанного коэффициента  $K_{\text{сн}}$ . По причинам,

указанным ранее, зависимость проведена как огибающая наивысших точек. Совместное решение уравнений, аппроксимирующих полученную зависимость и уравнение (1), позволило получить формулу (6) для расчета нижней отметки поверхности снежного покрова (фактически являющейся отметкой максимального уровня воды на дату начала весеннего стока), в зависимости от ширины конкретных оврагов ( $B$ ) и общей снежности зимнего периода, выраженной через среднюю высоту снежного покрова на водораздельных пространствах ( $h_{\text{сн}}$ ):

$$h = 27,4 (h_{\text{сн}}/B)^{0,36} \quad (6)$$

Полученное уравнение может быть использовано для расчета максимальных уровней воды весеннего половодья в оврагах и речных долинах шириной до 400 м.

Отдельный интерес представляет собой организация проведения гидрометрических работ и подсчет стока на малых реках и ручьях, в рассмотренных условиях полного или частичного заполнения снегом долин малых рек и ручьев.

Для малых рек и ручьев в рассматриваемом регионе характерен пилообразный гидрограф стока весеннего половодья со значительными внутрисуточными колебаниями расходов воды. Такой тип гидрографа весеннего половодья объясняется:

- режимом внутрисуточного хода водоотдачи из снежного покрова, характерного для открытых, незащищенных лесом пространств,
- малым временем добегания талых вод,
- незначительной аккумулялирующей способностью самих водосборов, расположенных в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты.

Показатель амплитуды внутрисуточной изменчивости стока ( $a_{\text{вс}} = (Q_{\text{макс}} - Q_{\text{миним}}) / Q_{\text{сут}}$ ) зависит от площади водосбора реки, а также от погодных условий и, как правило, составляет на реках с площадью водосбора ( $A$ ) до 200 км<sup>2</sup> – 0,15-0,35 (максимально 0,6-0,9), а для малых

рек ( $A = 10-15 \text{ км}^2$ ) – 0,45-0,65 (максимально 1,1-1,2).

Экспедиционные исследования процесса формирования весеннего стока показали, что в начале водоотдачи происходит накопление талых вод в толще насыщающегося снежного покрова в руслах ручьев и рек. По мере наполнения русла талыми водами начинается их постепенный сток. Начало стока происходит по пониженной части снежного русла. Вследствие высокой плотности снежного покрова в весенний период в течение первых 5-8 дней после начала стока происходит размыв снежного дна и увеличение ширины потока. После того, как речные воды “прорежут” снежную толщу до поверхности ледяного покрова, дальнейшее увеличение площади поперечного сечения водного потока происходит за счет размыва снежных берегов. Таяние и полный вынос снега из врезок русел рек, как правило, наблюдается в течение 15-25 дней, далее процесс интенсивного размыва ложа реки резко замедляется, но не прекращается, поскольку продолжается таяние ледяного покрова.

Механизм разрушения ледяного покрова зависит от местоположения конкретного участка реки и условий формирования стока в данном году. Разрушение и всплытие ледяного покрова может происходить только на плесовых участках, там, где подо льдом сохраняется талая вода. Однако и здесь разрушение ледяного покрова отмечается в годы с повышенной весенней водностью, в маловодные годы ледяной покров длительное время сохраняется под слоем наносов и тает, практически не всплывая.

Время наступления минимумов и максимумов суточного стока зависит от площади водосбора реки (табл.1) и обычно изменяется от суток к суткам в пределах 2-4 часов.

Максимальные расходы воды весеннего половодья на малых и средних реках, как правило, наблюдаются через 4-5 дней после начала стока. Спад половодья в течение первых пяти дней происходит приблизительно с интенсивностью, близкой к интенсивности

Таблица 1

**Среднее время (поясное) наступления экстремальных значений мгновенных расходов воды в течение суток**

$A, \text{ км}^2$	1	10	30	60	100	200	400
Время наступления максимальных расходов воды, час	18	20	21	22	23	01	03
Время наступления минимальных расходов воды, час	06	08	09	10	11	13	15

подъема, а затем на протяжении в среднем 15 суток отмечается медленное уменьшение расходов воды. Последнее объясняется регулярным подпитыванием рек за счет таяния снега в овражной сети после схода снежного покрова на водоразделах.

Рассмотренные особенности режима стока в период весеннего половодья определяют существенные сложности в производстве гидрометрических работ и подсчете среднесуточных расходов воды.

Значительное изменение морфометрических и гидравлических характеристик речных потоков при размыве снега и льда в руслах рек весной не позволяет применять традиционные подходы к определению среднесуточных расходов воды. Согласно Наставлениям [3,4] определение среднесуточных и мгновенных расходов воды основано на использовании кривых  $Q = f(H)$ . При этом основными критериями надежности и правомерности использования этих кривых являются условия равномерности и степени охвата данными измерений  $Q$  и  $H$  во всем диапазоне их изменения и статистической надежности названных связей. В то же время, как уже было отмечено, особенности природных условий стока малых рек не позволяют построить однозначные связи  $Q = f(H)$  для весеннего периода. Это заставляет искать

альтернативные пути измерения и подсчета весеннего стока за конкретные годы.

Для надежного учета стока рек в период весеннего половодья программа гидрометрических работ должна предусматривать проведение непрерывной регистрации уровней воды самописцами с момента начала снеготаяния. Измерение расходов должно проводиться два раза в сутки во время наступления экстремумов суточного хода стока.

Указанные сроки для каждой реки получают по результатам обработки лент самописцев. В качестве ориентировочных сведений могут быть использованы данные табл. 1.

Как отмечено выше, сроки наступления максимальных и минимальных расходов могут сдвигаться в зависимости от погодных условий в пределах, как правило, не превышающих 2-3 часов. Поэтому для подсчета среднесуточных расходов воды по данным об уровнях и измеренных расходах строятся зависимости  $Q = f(H)$ . Пример построения такой зависимости показан на рис. 1.

Точки, соответствующие измеренным расходам воды, соединяются последовательно прямыми линиями. В случае несоответствия времени измерения расходов воды и времени наступления минимума или максимума уровня выполняется линейная экстраполяция прямой за соответствующий период до экстремального суточного уровня, зарегистрированного самописцем.

Например, на рис. 1, расходы №10, 19 были измерены до наступления экстремальных расходов воды, а расход №15 – после прохождения экстремума. Основываясь на указанном подходе, действительные суточные максимумы стока получены путем экстраполяции линий подъема и спада стока до значений наблюдаемых уровней воды. Далее полученные зависимости  $Q = f(H)$  используются для определения расходов воды по данным обработки лент самописцев с дискретностью, обеспечивающей надежный подсчет их среднесуточных значений.

После полного выноса снега из русла реки устойчивость кривой  $Q = f(H)$  обычно повы-

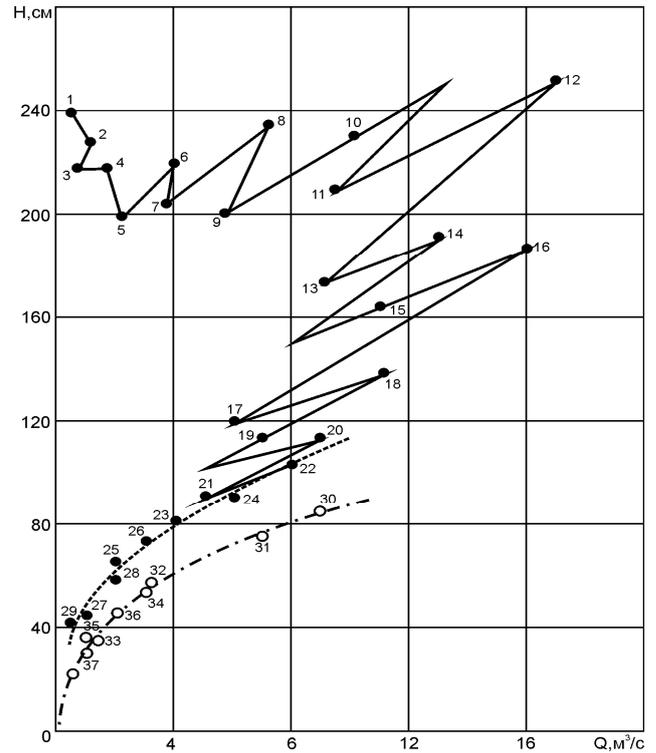


Рис. 1. Зависимость  $Q = f(H)$ . Река Яропензя, Новопортовский стационар.

шается, поскольку сток воды происходит по ледяному покрову. Однако в дальнейшем согласованность этой связи определяется скоростью таяния ледяного покрова. Как правило, указанная кривая (см. расходы №22-29 на рис. 1) может быть использована для подсчета стока. В случае разрушения ледяного покрова после временной кривой, соответствующей ледяному ложу, устанавливается кривая свободного русла. Если разрушения ледяного покрова не наблюдается, а лед тает на месте, переход от временной кривой к кривой свободного русла происходит постепенно. Как правило, лед в русле реки во второй половине периода весеннего половодья покрыт слоем наносов толщиной обычно 10-30 см. Нередко это вызывает определенные затруднения для установления факта наличия или отсутствия льда под слоем наносов. Указанная неопределенность может быть устранена при анализе кривой  $Q = f(H)$  свободного русла, полученной на данном гидростворе в предшествующие годы и временной кривой, соответствующей

щей ледяному ложу в данный год – с момента слияния указанных кривых лед в ложе русла полностью растаял.

Постоянный анализ на графике  $Q = f(H)$  взаимного расположения измеренных расхо-

дов и кривой свободного русла за предшествующие годы позволяет также установить время перехода от периода учащенных (два раза в сутки) измерений расходов воды к обычной частоте измерений.

### Список литературы

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под редакцией С.М.Новикова. – СПб ВВМ. 2009. 536 с.
2. Указания по производству снегомерных наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах. Валдай. Гидрометеоиздат, 1965, – 58 с.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6 ч. I и ч. II. Л., Гидрометеоиздат 1967. 398 с
4. Руководящий документ /Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 6, ч. 1. Л., Гидрометеоиздат, 1989. – 90 с.

## РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ОТТАИВАНИЯ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТАЛОГО СЛОЯ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ НА ПОЛИГОНАЛЬНЫХ БОЛОТАХ

**Москвин Юрий Павлович**

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,  
Государственный гидрологический институт  
25.00.27  
yrmosk@gmail.com

**Аннотация.** Приводится формула для расчета глубины оттаивания торфяной залежи.

Получены величины и формулы для расчета входящих в нее параметров. Рассмотрены вопросы учета пространственной изменчивости влагосодержания торфяной залежи. Проведено сравнение расчетных и наблюдаемых величин оттаивания торфяной залежи полигональных болот.

**Ключевые слова:** Полигональные болота, сезонное оттаивание многолетней мерзлоты, изменчивость влажности деятельного слоя полигональных болот.

## CALCULATION OF THAWING DEPTH AND MOISTURE CONTENT OF THE THAWED LAYER OF PEAT DEPOSIT IN POLYGONAL BOGS

**Moskvin Iurii Pavlovich**

Ph.D. of Geographical Sciences, Senior Research Fellow  
National Institute of Hydrology

**Abstract.** Formula for calculating peat deposit thawing depth is given.

Values and formulae for calculating parameters included in this formula are obtained. Problems of accounting spatial variability of peat deposit moisture content are considered. Comparison is made of calculated and observed values of thawing peat deposit in polygonal bogs.

**Key words:** Polygonal bogs, seasonal permafrost thawing, variability of polygonal bog active layer moisture content.

Проектирование и строительство промышленных объектов, дорог и других сооружений требует знания режима сезонного оттаивания деятельного слоя многолетнемерзлых грунтов. Основными факторами, определяющими режим оттаивания, являются поступление тепла к поверхности почво-грунтов и тепловые свойства этих грунтов, которые, в свою очередь, во многом зависят от их влажности. Существующие в настоящее время методы расчета глубины оттаивания почво-грунтов подробно рассмотрены и проанализированы применительно к торфяной залежи бугристых и полигональных болот в монографии [1]. Большинство авторов при решении системы уравнений теплопро-

водности краевым условием задают уравнение баланса тепла на границе промерзания и оттаивания:

$$\lambda_t \partial t_t(\tau)/\partial z - \lambda_m \partial t_m(\tau)/\partial z = i W_m \sigma \rho dH_{\text{отт}}/d\tau, (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности талого (индекс т) и мерзлого (индекс м) грунта, Вт/м.град;  $\partial t(\tau)/\partial z$  – распределение температуры в талом и мерзлом грунте, град/см;  $\sigma$  – удельная теплота плавления льда, дж;  $i$  – льдистость, в долях единицы;  $W_m$  – объемная влажность мерзлого слоя торфа, %;  $\rho$  – плотность льда, г/см<sup>3</sup>;  $dH_{\text{отт}}/d\tau$  – интенсивность оттаивания ( $H_{\text{отт}}$  – глубина оттаивания, см;  $\tau$  – время оттаивания, сут).

Обычно с достаточной для практических расчетов точностью закон распределения температур по глубине заменяют линейным и реальный температурный градиент  $\partial t_T(\tau)/\partial z$  принимают таким же, как для стационарного распределения температуры ( $\partial t_T(\tau)/\partial z \approx t_n/H_{\text{отт}}$ ). Поэтому расчет притока тепла ( $q_T$ ) к границе протаивания рассчитывается по уравнению:

$$q_T = \lambda_T t_n / H_{\text{отт}} \quad (2)$$

Решая уравнение (1) через глубину оттаивания торфяной залежи для расчетного интервала времени, равного одним суткам, с учетом (2) запишем:

$$\Delta H_{\text{отт}} = (\lambda_T t_n / H_{\text{отт}} - \lambda_M \Delta t_M / \Delta Z) / i \rho W_M \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности талого слоя зависит от его объемной влажности и в меньшей степени от температуры торфяной залежи. Средняя температура талого слоя торфяной залежи за теплый период по данным наблюдений изменяется от 0 до 10°C. При средней влажности торфяной залежи 30-60% влияние температуры на точность определения коэффициента теплопроводности не превысит 10% [2], и, следовательно, влиянием температуры при расчете  $\lambda_T$  в первом приближении можно пренебречь.

Зависимость коэффициента теплопроводности талого слоя полигональных болот от объемной влажности, полученная на основе исследований ГГИ, имеет следующий вид:

$$\lambda_T = 4,05 \cdot 10^{-4} W_T + 0,452 \quad (4)$$

где  $W_T$  – объемная влажность талого слоя торфяной залежи, %.

Коэффициент теплопроводности мерзлого слоя ( $\lambda_M$ ) получен на основании лабораторных исследований образцов торфа, отобранных на полигональных болотах. Зависимость  $\lambda_M$  от  $W_M$  имеет вид:

$$\lambda_M = 0,08 \exp(0,0388 W_M) \quad (5)$$

Градиент температуры в мерзлом слое полигональных болот, величина мало изменяющаяся во времени и поэтому может быть принят постоянным и равным, по данным наблюдений, 2 град/м. Таким образом, отток тепла в мерзлую залежь оценивается в среднем за теплый период 3,0 Вт/(м<sup>2</sup> град).

Льдистость торфяной залежи полигональных болот, то есть отношение веса льда к весу общего количества воды в торфе, зависит от температуры торфяной залежи и ее влажности. Поскольку таяние торфяной залежи происходит при температурах, близких к 0°C, общее количество льда в единице объема ( $iW_M$ ) будет определяться лишь влажностью торфяной залежи. Влажность мерзлой торфяной залежи после таяния снежного покрова, кроме самого верхнего (5 см) горизонта, составляет  $80 \pm 3\%$ . Поэтому количество льда в единице объема при температуре, близкой к 0°C, и влажности полного насыщения ( $80 \pm 3\%$ ) по данным лабораторных определений льдистости равно 0,64. Верхний 5 см очесный слой на полигонах, как правило, имеет весьма незначительную влажность и протаивает при сходе снежного покрова, а на мочажинах указанная влажность мерзлой торфяной залежи ( $80 \pm 3\%$ ) наблюдается от самой поверхности.

Удельная теплота плавления льда ( $\sigma$ ) и его плотность ( $\rho$ ) величины постоянные и при расчете принимаются соответственно равными 335 Дж/г и 0,92 г/см<sup>3</sup>.

Методы расчета температуры верхнего 5-ти см слоя для полигональных болот подробно рассмотрены в монографии [1].

Наибольшие трудности встречает расчет влажности талого слоя торфяной залежи.

В отличие от минеральных грунтов, твердая составляющая торфяной залежи не превышает 1-7%, остальную часть занимает вода и воздух. В связи с этим, как указывалось ранее, целесообразно рассматривать не весовую, а объемную влажность торфяной залежи, то есть количество воды в определенном объеме ненарушенного торфяного образца.

Влажность торфяной залежи полигональных болот, являющаяся наиболее изменчивой

характеристикой водного режима, определяется уровнем болотных вод, толщиной талого слоя, плотностью торфа и очеса.

Расчет влагосодержания торфяной залежи на полигональных болотах встречает ряд трудностей, связанных в основном с пространственной изменчивостью высот микрорельефа поверхности полигона и микрорельефа поверхности мерзлоты, зона развития которых составляет 30-40 см. При близком залегании мерзлоты к дневной поверхности (45-60 см в конце теплого периода) и развитием микрорельефа болота наблюдается весьма пестрая картина распределения влаги по площади полигона.

Наблюдения за влажностью торфяной залежи в зоне полигональных болот проводились в полигонально-валиково-мочажинном и полигонально-трещиноватом микроландшафтах. В деятельном горизонте торфяной залежи полигональных болот можно выделить три различающихся между собой слоя: от поверхности до глубины 5-10 см – очёсный, с малой степенью разложения; с 10 до 20 см – переходный, со средней степенью разложения; и с 20 см до подошвы сезонно талого слоя – нижний, состоящий из средне и сильно разложившегося торфа.

С целью изучения пространственной изменчивости микрорельефа полигональных болот, а также пространственной и временной изменчивости микрорельефа поверхности мерзлоты выполнялись многолетние наблюдения за оттаиванием торфяной залежи на закрепленных профилях совместно с нивелировкой микрорельефа поверхности.

Анализ полученных материалов показал, что профили поверхности мерзлоты повторяют профили поверхности полигонов. Это обстоятельство позволяет анализировать положение уровней болотных вод относительно поверхности болота и поверхности оттаивающей мерзлоты, используя совмещенные кривые обеспеченности этих поверхностей (рис. 1).

( $F_1$  – вода в микропонижениях поверхности полигонов,  $F_2$  – вода в зоне аэрации,  $F_3$  – вода в зоне полного насыщения,  $F_4$  – вода, образовавшаяся при таянии мерзлоты).

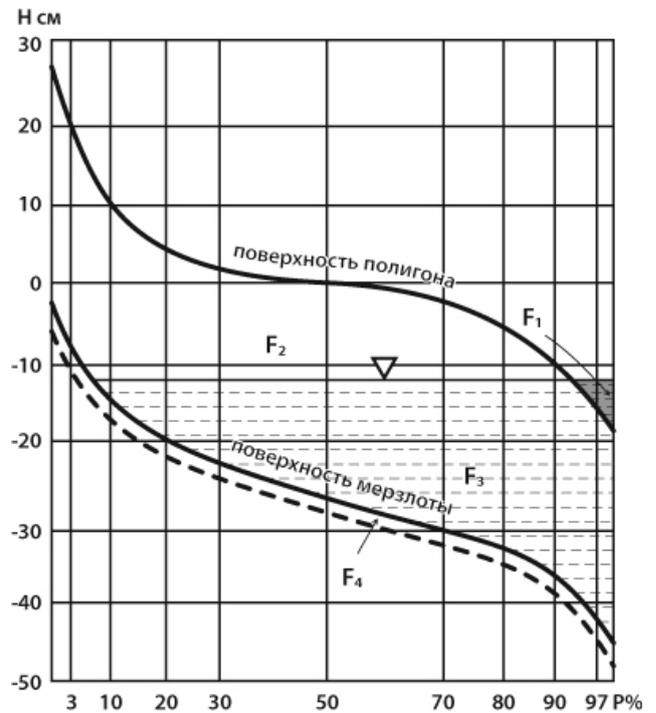


Рис. 1. Совмещенные кривые обеспеченности поверхностей полигона и мерзлоты.

Результаты нивелировки поверхностей микрорельефа полигональных болот показали, что статистическое распределение высот микрорельефа поверхности полигонов может быть охарактеризовано следующими мерами рассеивания:

Для южной части полуострова Ямал:

полигон с мочажинной:  $\sigma = 16$  см,  $C_s = 0$

полигон без мочажинной:  $\sigma = 12$  см,  $C_s = 0$

Для северной части полуострова Ямала:

полигон с мочажинной и полигон без мочажинной:  $\sigma = 5$  см,  $C_s = 0$

В отличие от кривых обеспеченности микрорельефа поверхности полигона, практически не изменяющихся во времени, кривые обеспеченности поверхности мерзлоты по мере оттаивания торфяной залежи закономерно изменяются. Анализ материалов наблюдений позволил выявить закономерности их изменения и записать их в виде:

Для южной части полуострова Ямал:

полигон с мочажинной:  $C_v = 24,2/H_{\text{отт}} + 3,5$ ,  
 $C_s = -1,2$  (6)

полигон без мочажины:  $C_v = 12,6/H_{\text{отт}} + 1,9$ ,  
 $C_s = -0,1$  (7)

Для северной части полуострова Ямал:

полигон с мочажиной и полигон без мочажины:  $C_v = 10/H_{\text{отт}}$ ,  $C_s = -1,0$  (8)

где  $H_{\text{отт}}$  – глубина оттаивания торфяной залежи бугров на конкретные сутки, см.

Влагосодержание талого слоя торфяной залежи на бугре ( $W_{\text{общ}}$ ) определяется по зависимости:

$$W_{\text{общ}} = W_{\text{св}} + W_{\text{за}} + W_{\text{пн}} + W_{\text{т}} \quad (9)$$

где  $W_{\text{св}}$  – вода в микропонижениях поверхности полигонов,  $W_{\text{за}}$  – вода в зоне аэрации,  $W_{\text{пн}}$  – вода в зоне полного насыщения,  $W_{\text{т}}$  – вода, образовавшаяся при таянии мерзлоты.

Вода на поверхности полигона, которая скапливается в наиболее пониженных частях микрорельефа, обычно наблюдается лишь в весенний период при минимальной глубине оттаивания.

Влагосодержание зоны аэрации ( $W_{\text{за}}$ , мм) определяется по зависимостям следующего вида:

Для южной части полуострова Ямал

$$W_{\text{за}} = 1,10 Z^{0,825}, \text{ (полигон)} \quad (10)$$

$$W_{\text{за}} = 0,97 Z^{0,90}, \text{ (топь)} \quad (11)$$

Для северной части полуострова Ямала

$$W_{\text{за}} = 0,80 Z^{0,90} \text{ (полигон)}, \quad (12)$$

где  $Z$  – уровень болотных вод, см.

В бездождные периоды происходит снижение уровня болотных вод на полигонах до поверхности многолетнемерзлого слоя и, как следствие, исчезновение в талом слое гравитационных вод, при этом за счет испарения, происходит иссушение талого слоя торфяной залежи. Наблюдения, проведенные при от-

сутствии гравитационных вод, свидетельствуют об уменьшении объемной влажности зоны аэрации на полигонах на 6-8%, в мочажинах – на 11%, в сравнении с влажностью зоны аэрации рассчитанной по формулам 10-12. Однако степень иссушения деятельного слоя торфяной залежи полигональных болот не достигает значений наименьшей влагоемкости, составляющей для полигональных болот в среднем 55% от объёма.

Анализ послойных определений влажности полного насыщения в талом и мерзлом слое показывает, что ниже верхнего 10-ти см очесного слоя значения влажности полного насыщения имеют небольшую амплитуду изменений с глубиной (4-6%) и на полигонах составляют: для талой торфяной залежи на полуострове Ямал 80-84%, а для мерзлой торфяной залежи – 72-76%. На мочажинах как для юга, так и для севера полуострова Ямал влажность полного насыщения составляет 84% для талой залежи и 76% для мерзлой залежи. Влажность полного насыщения очесного горизонта оценивается в 80-90%.

Следует отметить, что на севере Ямала максимальная мощность торфяной залежи полигональных болот составляет всего 20-25см. Подстилающие минеральные грунты имеют существенно меньшую влажность и большую теплопроводность по сравнению с торфяной залежью. Поэтому оттаивание почво-грунтов (торф + минеральный грунт) на болотах севера в однородных микроландшафтах больше, чем на юге, несмотря на меньшее количество тепла, приходящее на границу раздела атмосфера-грунт.

Используя полученные зависимости, были рассчитаны глубины оттаивания на различных элементах полигональных болот. В качестве иллюстрации в табл.1 приведены результаты расчета глубины оттаивания полигона в полигонально-мочажинном микроландшафте за декадные интервалы времени.

Таблица 1

**Результаты расчета глубины оттаивания для мохово-кустарничково-лишайникового полигона на юге Ямала за 1990 г.**

Месяц	Декада	Z, см	W, %	T <sub>в</sub> , °C	H <sub>отг</sub> , см	
					Расчет.	Набл.
июнь	2	-10	76	8,1	16	15
	3	-20	68	5,8	19	20
июль	1	-35	64	14,9	24	28
	2	-56	60	22,4	40	36
	3	-57	59	17,5	44	39
август	1	-55	60	12,8	45	41
	2	-42	62	8,0	47	43

Как следует из таблицы 1, максимальная невязка рассчитанных и измеренных величин за весь теплый период не превышает 5 см, то есть в среднем ошибка расчета максималь-

ных глубин оттаивания полигональных болот составляет 7-10%, что позволяет использовать предложенный метод для практических расчетов.

### Список литературы

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под редакцией С.М.Новикова. – СПб ВВМ. 2009. 536 с.
2. Павлова К.К. Тепловые свойства деятельного слоя болот. – Труды ГГИ, 1969.- Вып.177. – С.119-155.

## РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС И ИСПАРЕНИЕ С ПОЛИГОНАЛЬНЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

**Москвин Юрий Павлович**

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,  
Государственный гидрологический институт  
25.00.27  
yrmosk@gmail.com

**Аннотация.** На основании данных многолетних экспедиционных наблюдений, разработаны формулы для расчета радиационного баланса и испарения с полигональных болот. Приведены результаты наблюдений и дана оценка применимости различных методов определения испарения в зоне распространения многолетней мерзлоты. Выполнен анализ изменчивости указанных величин для различных микроландшафтов полигональных болот на Крайнем Севере Западной Сибири.

**Ключевые слова:** Полигональные болота, многолетняя мерзлота, водный и тепловой режим болот, испарение, радиационный баланс.

## RADIATION BALANCE AND EVAPORATION FROM POLYGONAL BOGS OF WESTERN SIBERIA

**Moskvin Iurii Pavlovich**

Ph.D. of Geographical Sciences, Senior Research Fellow  
National Institute of Hydrology

**Abstract.** Formulae for calculating radiation balance and evaporation from polygonal bogs were developed based on long-term expeditionary observation data. Results of observations and feasibility assessment for various methods of calculating evaporation in permafrost zone are given. Variability of the abovementioned values for different polygonal bog microtopes of the far north of Western Siberia is analyzed.

**Key words:** Polygonal bogs, permafrost, water and thermal regime of bogs, evaporation, radiation balance.

Радиационный баланс является основой энергетических ресурсов деятельного слоя почво-грунтов. Большая часть радиационного баланса затрачивается на испарение – основную расходную составляющую как теплового, так и водного баланса болот. Поэтому определение радиационного баланса и испарения представляет большой интерес при решении целого ряда научных и практических задач.

Настоящая работа выполнена по результатам комплексных водно-тепlobалансовых исследований Государственного гидрологического института проведенных в 1982-91г. г. на полуострове Ямал в южной (бассейн р. Пяседей-Яха) и северной (бассейн р. Пухуце-Яха) его частях [1].

Результаты наблюдений за радиационным балансом зоны полигональных болот представлены в таблице 1.

Суммы радиационного баланса за теплый период года по данным наблюдений изменялись в относительно широких пределах: на севере Ямала от 49 до 70 кДж/см<sup>2</sup>, на юге – от 71 до 101 кДж/см<sup>2</sup>.

Выводы о пространственной изменчивости радиационного баланса, в силу пестроты подстилающей поверхности, нуждаются в уточнении. По предварительной оценке, величины радиационного баланса повышенных элементов мезорельефа на полигонально-мочажинных и полигонально-трещиноватых комплексах практически равны, а для поймен-

Таблица 1

Радиационный баланс, кДж/см<sup>2</sup>

Год	июнь	июль	август	сентябрь	Σ сезон
южный стационар					
1982	32,4 (23)	33,9	12,5	5,7 (26)	84
1983	24/9 (21)	35,6	17,6	5,1	83
1984	25,5 (21)	33,1	16,9	4,7	80
1985	39,3	32,0	13,8	5,2	90
1986	29,0	29,1	14,3	3,1 (20)	76
1987	13,8(13)	40,1	13,5	4,0 (21)	71
1988	36,8	34,5	15,7	5,0	92
1989	40,0	39,2	18,5	3,7 (22)	101
1990	40,5	40,4	14,8	2,8 (14)	99
северный стационар					
1987	4,7(5)	35,4	11,7	2,6 (20)	54
1988	21,2 (20)	32,9	14,0	1,7 (14)	70
1989	18,6 (20)	30,0	14,3	1,0 (15)	64
1990	18,1 (20)	35,4	13,6	2,4 (15)	70
1991	7,3 (5)	10,5	11,2	3,1	49

Примечание: в скобках указано количество дней наблюдений.

ных травяно-моховых микроландшафтов на 20-25% больше.

Анализ сезонного хода радиационного баланса показывает, что в течение теплого периода происходят значительные его изменения. На юге Ямала наибольшие значения радиационного баланса наблюдаются в последней декаде июня при средней интенсивности 1,4 кДж/(см<sup>2</sup>сут) и отдельных суточных максимумах до 2,0-2,2 кДж/(см<sup>2</sup>сут). На севере Ямала наибольшей интенсивности в 1,5 кДж/(см<sup>2</sup>сут) при суточных максимумах 2,1-2,3 кДж/(см<sup>2</sup>сут) величины радиационного баланса достигают в первой декаде июля. В дальнейшем отмечается плавное уменьшение радиационного баланса, вплоть до отрицательных значений в конце сентября. Распределение месячных величин

радиационного баланса в долях от его суммы за теплый период, по данным наблюдений следующее:

Таблица 2

**Распределение месячных величин радиационного баланса в долях от его суммы за теплый период**

Месяц	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Юг Ямала	0,36	0,40	0,17	0,06
Север Ямала	0,24	0,52	0,21	0,03

Полученные данные наблюдений позволили разработать методику расчета декадных величин радиационного баланса полигональных болот при отсутствии наблюдений.

Уравнение радиационного баланса, представляющего собой сумму коротковолновой и длинноволновой радиации, обычно записывается в следующем виде:

$$B = Q(1 - A) - I_{эф}, \quad (1)$$

где  $B$  – радиационный баланс, Дж/(см<sup>2</sup>сут),  $Q$  – суммарная солнечная радиация, Дж/(см<sup>2</sup>сут),  $A$  – альbedo в долях единицы,  $I_{эф}$  – эффективное излучение, Дж/(см<sup>2</sup>сут).

Расчет составляющих радиационного баланса встречает ряд трудностей, и, как правило, выполняется по зависимостям вида  $B = f(Q)$ . Однако, учитывая, что величина эффективного излучения определяется разностью температур воздуха и подстилающей поверхности болот, соотношение которых, в свою очередь, зависит от продолжительности светлого и темного времени суток, по данным наблюдений получены зависимости отношения  $B/Q$  как функции от светлого времени суток ( $T_{св}$ ), которые аппроксимируются следующими уравнениями:

для южной части полуострова Ямал

$$B/Q = 0,035T_{св} - 0,22 \quad (2)$$

для северной части полуострова Ямал

$$B/Q = 0,034T_{св} - 0,28 \quad (3)$$

Средние ошибки в определении радиационного баланса при расчете его с использованием наблюденных величин суммарной солнечной радиации составляют 3-5% за сутки и 1-2% за декаду.

Следует отметить, что единственный пункт наблюдений за суммарной солнечной радиацией находится в г. Салехард. Поэтому для определения суточных величин суммарной солнечной радиации на полуострове Ямал, использовалась методика, предложенная ГГО [2], в которой рассчитываются коэффициенты отношения сумм суммарной радиации при безоблачном небе в зависимости от средних значений балла общего количества облаков и

балла облаков нижнего яруса. Указанные значения отношений суммарной радиации при облачном и безоблачном небе рассчитаны по данным многолетних наблюдений ГГИ, выполненных на полуострове Ямал [1]. Средние ошибки в определении декадных значений радиационного баланса по данным наблюдений за облачностью составляют 6%, максимальные 26%.

Сложность определения испарения с болот зоны многолетней мерзлоты связана с наличием многолетней мерзлоты и значительной пестротой влажности поверхностного слоя почво-грунтов.

На основе материалов многолетних комплексных исследований (актинометрические, теплобалансовые, воднобалансовые и градиентные наблюдения) проведено сравнение различных методов определения величин испарения, на болотах зоны многолетней мерзлоты [2]. Результаты этого исследования показали, что использование испарителей ГГИ-Б1000 на мерзлых полигонах и буграх нарушает тепловой режим торфяной залежи и способствует более интенсивному, чем на болоте, протаиванию самого монолита. Это приводит к некоторому несоответствию составляющих теплового баланса торфяного монолита в испарителе и болота.

Метод теплового баланса, совместно с методом турбулентной диффузии, рекомендуемый Руководством [3], является наиболее приемлемым для определения испарения с болот зоны многолетней мерзлоты, поскольку позволяет определить испарение за любой промежуток времени и не связан с существенными нарушениями естественного покрова болот. Однако при исследовании режима испарения с полигональных болот встречаются некоторые трудности, связанные в основном с измерениями метеорологических характеристик в приземном слое в условиях большой пестроты болотных микроландшафтов, а также с частым чередованием болот (торфяная залежь) и обводненных тундровых урочищ, зачастую также имеющих полигональную структуру поверхности. Формирование профилей влажности и

температуры воздуха в приземном слое воздуха происходит на достаточно больших площадях и, при существенной пестроте подстилающей поверхности, испарение, рассчитанное методом теплового баланса, будет являться результирующей величиной, где доля испарения с болотного микроландшафта, занимающего наибольшую площадь, превалирует, но в некоторой степени искажена испарением с других элементов ландшафтов. Методика проведения теплосбалансовых наблюдений на болотах зоны многолетней мерзлоты предусматривала организацию ежечасных “серийных” наблюдений в отдельные сутки [1]. Полученное таким образом испарение за отдельные сутки по методике, предложенной Романовым В.В. [4], увязывалось с основным определяющим фактором – радиационным балансом:

$$E = \alpha B + C, \quad (4)$$

где  $E$  – испарение, мм;  $\alpha$  – коэффициент, выведенный на основе анализа эмпирических связей  $E = f(B)$  и зависящий от влагообеспеченности подстилающей поверхности и фазы развития растений. Свободный член уравнения ( $C$ ) определяет испарение за счет других источников тепла.

Обобщенные данные наблюдений за испарением с полигональных болот Ямала, в виде сезонных сумм представлены в табл. 3.

полигональных болот. Роль адвективного теплопереноса в процессе испарения практически ничтожна. Затраты тепла на испарение с полигональных болот составляют в среднем 57% от радиационного баланса.

Распределение месячных сумм испарения в долях от его суммы за теплый период, по данным наблюдений, показано в табл.4.

Таблица 4

**Распределение месячных сумм испарения в долях от его суммы за теплый период**

Месяц	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Юг Ямала	0,36	0,41	0,18	0,05
Север Ямала	0,24	0,52	0,21	0,03

При этом наибольшая интенсивность испарения наблюдается в третьей декаде июня и составляет в среднем 2,8-3,6 мм/сут при суточных максимумах до 4,4 мм/сут.

С учетом испарения за холодный период, рассчитанного по формуле Кузьмина П.П. [5], среднее годовое испарение с полигональных болот на юге Ямала оценивается в 220 мм, на севере Ямала – в 185 мм.

Для изучения пространственной изменчивости испарения в зоне полигональных болот использовался метод испарителей. Сравнение

Таблица 3

**Суммарное испарение за теплые периоды лет наблюдений (мм)**

Годы	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	среднее
Юг Ямала	188	186	180	202	168	159	205	226	220		194
Север Ямала						126	161	148	160	113	142

Анализ материалов наблюдений показывает на определяющую роль радиационного баланса в процессе испарения с поверхности

данных параллельных наблюдений за испарением теплосбалансовым и весовым методами показало на их высокую сходимость. Так,

для месячных величин испарение, полученное методом испарителей на юге Ямала на 2%, на севере – на 8% больше рассчитанного по тепловому балансу.

На различных болотных микроландшафтах Ямала площади пониженных форм мезорельефа составляют от 30% (в полигонально-трещиноватых микроландшафтах) до 90% (в травяных и мохово-травяных микроландшафтах). Доля испарения с пониженных элементов мезорельефа составляет на юге Ямала – 71%; на севере Ямала – 87% от испарения в целом с полигональных болот.

По предварительным данным, травяная растительность увеличивает испарение в среднем на 26%, а лишайниковая уменьшает более чем в 2 раза по сравнению с мохово-кустарничковой.

По результатам многолетних серийных наблюдений в зоне полигональных болот были получены устойчивые зависимости испарения от радиационного баланса. В частности, для юга Ямала подобная зависимость описывается формулой:

$$E = 2,23 B - 0,03, \quad (5)$$

где  $E$  – испарение, мм/сут;  $B$  – радиационный баланс, кДж/см<sup>2</sup>сут.

Аналогичная формула для севера Ямала:

$$E = 2,31 B - 0,08. \quad (6)$$

Наблюдение за испарением в различных элементах мезорельефа методом испарителей позволили получить расчётные зависимости для определения испарения с различных микроландшафтов в зоне полигональных болот.

Упомянутые зависимости отличаются только значениями коэффициента  $\alpha$ , величины которого приведены в таблице 5.

Таблица 5  
**Значения коэффициента  $\alpha$  в формуле (4) для различных микроландшафтов в зоне полигональных болот**

Микроландшафт	$\alpha$ , мм см <sup>2</sup> /кДж
Юг Ямала	
Полигонально-трещиноватый	1,76
Полигонально-мочажинный	2,23
Полигонально-бугристо-топяной	2,19
Мохово-травяные (талые)	2,37
Север Ямала	
Полигонально-трещиноватый	2,31
Полигонально-бугристо-топяной	2,49
Полигонально-валиково-топяной (пойма)	2,60
Травяные, мохово-травяные (талые)	2,66

Среднее годовое испарение с Южно-Ямального ландшафта составляет 180 мм. Согласно наблюдениям ГГИ, среднегодовое количество осадков для этой зоны 435 мм, норма стока 280 мм, следовательно, норма испарения в водном балансе рассматриваемой территории составляет 155 мм. Таким образом, невязка среднегодовых значений элементов водного баланса равна 25 мм или менее 6% приходной части уравнения.

**Список литературы**

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под редакцией С.М.Новикова. – СПб ВВМ. 2009. 536 с.
2. Романов В.В. Гидрофизика болот. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 359
3. Руководство по теплобалансовым наблюдениям. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 149 с.
4. Москвин Ю.П. Водно-тепловой режим бугристых болот Западной Сибири и его расчет. – Автореферат на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. – Л.: 1985. – 16 с.
5. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 178 с.

## Требования к оформлению рукописей статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно–практического журнала "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе "Антиплагиат".

**За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.**

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно–практический журнал "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

### Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением ".doc", или ".rtf", шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускается.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Список литературы составляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

### Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

### Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, СМΥК.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0–11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные – 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, СМΥК.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф–редактору научно–практического журнала "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" ( e–mail: [redaktor@nauteh-journal.ru](mailto:redaktor@nauteh-journal.ru) ).