

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, Президент Московского технологического университета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Кудж С.А. Ректор Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: rector@mirea.ru

Большаков А.К. Директор Института инновационных технологий и государственного управления Московского технологического университета, к.э.н., доцент, e-mail: bolshakov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., Московский технологический университет, e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь журнала, к.х.н., доцент, Московский технологический университет, e-mail: esipova@mirea.ru

Жуков Д.О. Заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: zhukov_do@mirea.ru

Кимель А.В. Доцент Университета Радбауд, г. Наймеген (Нидерланды), к.ф.-м.н., e-mail: a.kimel@science.ru.nl

Кондратенко В.С. Заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: kondratenko_vs@mgupri.ru

Кузнецов В.В. Директор Физико-технологического института Московского технологического университета, к.т.н., доцент, e-mail: kuznetsov@mirea.ru

Куликов Г.В. Директор Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: kulikov@mirea.ru

Мыльникова А.Н. Директор Института экономики и права Московского технологического университета, к.э.н., e-mail: mylnikova@mirea.ru

Перно Ф. Профессор, проректор по научной работе, Центральная Школа г. Лилль, Франция, e-mail: philippe.pernod@ec-lille.fr

Романов М.П. Директор Института кибернетики Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: m_romanov@mirea.ru

Савиных В.П. Президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, e-mail: president@miigaik.ru

Скотт Дж. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания, e-mail: jamesscott@acm.org

Цветков В.Я. Советник ректората Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: cvj2@mail.ru

РЕДАКЦИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент, e-mail: esipova@mirea.ru

Семерня Л.Г. Технический редактор, e-mail: semernya@mirea.ru

Середина Г.Д. Зав. редакцией, к.т.н., e-mail: seredina@mirea.ru

Цветков В.Я. Профессор, д.т.н., e-mail: cvj2@mail.ru

Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88); e-mail: seredina@mirea.ru

EDITORIAL BOARD

Alexander S. Sigov – Editor-in-Chief of the Journal, President of Moscow Technological University, Academician of RAS, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor. E-mail: sigov@mirea.ru

Stanislav A. Kudzh – Rector of Moscow Technological University, D.Sc. (Engineering), Professor. E-mail: rector@mirea.ru

Alexander K. Bolshakov – Director of the Institute of Innovative Technologies and Public Administration of Moscow Technological University, Ph.D. (Economics), Associate Professor. E-mail: bolshakov@mirea.ru

Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.), Moscow Technological University. E-mail: buslaeva@mirea.ru

Olga V. Esipova – Executive Editor, Ph.D. (Chem.), Associate Professor, Moscow Technological University. E-mail: esipova@mirea.ru

Dmitry O. Zhukov – Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems of Moscow Technological University, D.Sc. (Engineering), Professor. E-mail: zhukov_do@mirea.ru

Alexey V. Kimel – Associate Professor, Ph.D. (Phys.-Math.), Radboud University, Nijmegen, Netherlands. E-mail: a.kimel@science.ru.nl

Vladimir S. Kondratenko – Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies of Moscow Technological University, D.Sc. (Engineering), Professor. E-mail: kondratenko_vs@mgupi.ru

Vladimir V. Kuznetsov – Director of the Physical-Technological Institute of Moscow Technological University, Ph.D. (Engineering), Associate Professor. E-mail: kuznetsov@mirea.ru

Gennady V. Kulikov – Director of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems of Moscow Technological University, D.Sc. (Engineering), Professor. E-mail: kulikov@mirea.ru

Anastasiya N. Myl'nikova – Director of the Institute of Economics and Law of Moscow Technological University, Ph.D. (Economics). E-mail: mylnikova@mirea.ru

Philippe Pernod – Professor, Dean of Research, Ecole Centrale de Lille, France. E-mail: phillipe.pernod@ec-lille.

Mikhail P. Romanov – Director of the Institute of Cybernetics of Moscow Technological University, D.Sc. (Engineering), Professor. E-mail: m_romanov@mirea.ru

Viktor P. Savinykh – President of Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Member-Correspondent of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, Twice Hero of the Soviet Union. E-mail: president@miigaik.ru

James F. Scott – Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, UK. E-mail: jamesscott@acm.org

Viktor Y. Tsvetkov – Advisor of Moscow Technological University, D.Sc. (Engineering), Professor. E-mail: cvj2@mail.ru

EDITORIAL

Alexander S. Sigov – D.Sc. (Phys.-Math.), Professor. E-mail: sigov@mirea.ru

Tatyana M. Buslaeva – Professor, D.Sc. (Chem.). E-mail: buslaeva@mirea.ru

Olga V. Esipova – Executive Editor, Ph.D. (Chem.), Associate Professor. E-mail: esipova@mirea.ru

Larisa G. Semernya – Technical Editor. E-mail: semernya@mirea.ru

Galina D. Seredina – Managing Editor, Ph.D. (Engineering). E-mail: seredina@mirea.ru

Viktor Y. Tsvetkov – Professor, D.Sc. (Engineering). E-mail: cvj2@mail.ru

Address:

86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia (office L-119)

Phone: +7(495)246-05-55 (#288); e-mail: seredina@mirea.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Голованова Н.Б., Рогова В.А.**
Реализация практико-ориентированного подхода в подготовке специалистов по радиотехнике и системам связи 5
- Холопов В.А., Каширская Е.Н., Гусев М.В.**
Оптимизация конфигурации промышленных Ethernet-сетей на этапе проектирования АСУП 20

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Каданцев В.Н., Гольцов А.Н.**
Коллективные возбуждения в альфа-спиральной молекуле белка 32
- Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Яроцкая И.В.**
Расчет упругонапряженной гетероструктуры $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP$ с квантовыми ямами для эффективных лазерных излучателей 46
- Юрасов А.Н., Яшин М.М.**
Теория эффективной среды как инструмент анализа оптических свойств нанокompозитов 56

ЭКОНОМИКА НАУКОЕМКИХ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВ

- Marin Marinov, Georgy Angelov**
Streamlining the management of corporate accounts receivable 67
- Надточий Ю.Б., Будович Л.С.**
Интеллектуальный капитал организации: сущность, структура, подходы к оценке 82

CONTENTS

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Golovanova N.B., Rogova V.A.

Implementation of the practically-oriented approach in the specialists training on radio engineering and communication systems 5

Kholopov V.A., Kashirskaya E.N., Gusev M.V.

Optimization of configuration of industrial Ethernet networks during design of the automated production management system 20

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

Kadantsev V.N., Goltsov A.N.

Collective excitations in alpha-helical protein molecule 32

Svetogorov V.N., Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A., Ladugin M.A., Yarotskaya I.V.

Calculation of elastically stressed quantum wells heterostructure $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ for efficient diode lasers 46

Yurasov A.N., Yashin M.M.

The effective medium theory as a tool for analyzing the optical properties of nanocomposites 56

ECONOMY OF KNOWLEDGE-INTENSIVE AND HI-TECH ENTERPRISES AND PRODUCTIONS

Marin Marinov, Georgy Angelov

Streamlining the management of corporate accounts receivable 67

Nadtochiy Yu.B., Budovich L.S.

Intellectual capital of the organization: the essence, structure, approaches to evaluation 82

УДК 378.14

**РЕАЛИЗАЦИЯ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА
В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАДИОТЕХНИКЕ
И СИСТЕМАМ СВЯЗИ**

**Н.Б. Голованова[@],
В.А. Рогова**

*Московский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: Golovanova@mirea.ru*

Статья посвящена рассмотрению форм, методов и механизмов реализации практико-ориентированного подхода к подготовке молодых кадров по инженерно-техническим направлениям и специальностям. Данный подход рассматривается как одно из ключевых условий обеспечения требуемого работодателями качества их подготовки. Использование сведений о трудоустройстве молодых специалистов позволило сделать вывод, что потребность в специалистах, в силу целого ряда причин, так и остается неудовлетворенной. На примере данных, характеризующих основные мероприятия, реализуемые в рамках практико-ориентированного подхода к подготовке специалистов по радиотехнике и системам связи, в статье дается комплексное представление о фактическом состоянии практической подготовки будущих выпускников вузов. Вместе с тем обеспечение рассматриваемого подхода только усилиями образовательной организации не позволяет получить нужного эффекта. Основным фактором эффективной его реализации является активное участие в этом процессе профильных предприятий. Однако, несмотря на очевидную потребность в кадрах, предприятия не очень охотно идут на подобного рода взаимодействие, не выполняя порой даже обязательств, предусмотренных договорами о целевой подготовке. В статье описывается опыт МИРЭА, который через институт базовых кафедр решает значительную часть вопросов по организации и интенсификации практической подготовки обучающихся. При условии эффективной реализации практико-ориентированный подход позволит обеспечить сбалансированность деятельности образовательной организации и интересов работодателей.

Ключевые слова: качество подготовки кадров, трудоустройство, практико-ориентированный подход, профильные предприятия и организации, взаимодействие со стратегическими партнерами.

**IMPLEMENTATION OF THE PRACTICALLY-ORIENTED
APPROACH IN THE SPECIALISTS TRAINING ON RADIO
ENGINEERING AND COMMUNICATION SYSTEMS**

**N.B. Golovanova[@],
V.A. Rogova**

*Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author e-mail: Golovanova@mirea.ru*

Using the employment data of young professionals allowed concluding that, despite the need for specialists, for a number of reasons including the dissatisfaction of employers with the junior specialists training this need remains unfulfilled. Based on the data describing the main activities implemented within the scope of the practice-oriented approach in the training of specialists in radio engineering and communication systems, the article gives a comprehensive idea of the actual status of practical training for future graduates of higher educational institutions. At the same time, the provision of practice orientation only through the efforts of the educational organization does not allow obtaining the desired effect. The main factor in the effective implementation of a practice-oriented approach is the active participation of profile enterprises in this process. However, despite the obvious need for personnel, enterprises are not very eager to engage in this kind of interaction, sometimes not even fulfilling the obligations stipulated in treaties on targeted training. The article describes the experience of MIREA, which solves a significant part of the problems associated with the organization and intensification of the practical training of students with the use of the basic departments. An effective implementation of the practice-oriented approach will ensure the balance of the activities of the educational organization and the interests of employers.

Keywords: quality of training, employment, practice-oriented approach, profile enterprises and organizations, interaction with strategic partners.

Радиотехнические системы, появившиеся в двадцатом столетии и получившие в последующем бурное развитие, сегодня широко используются практически во всех сферах жизнедеятельности, выполняя широкий круг задач, связанных с передачей и извлечением информации. Одновременно с ростом значимости радиотехнических систем возрастает их сложность, обусловленная необходимостью учета при проектировании многих факторов разнообразного характера. Растет удельная стоимость радиотехнических устройств как составных элементов сложных технических систем.

Одним из факторов развития радиотехники и систем связи, их проектирования и поддержания на должном уровне эксплуатационных характеристик является наличие кадров высокой квалификации, ключевая роль в подготовке которых принадлежит сфере профессионального, в том числе высшего, образования. Однако, по мнению многих отечественных специалистов, сегодня российская экономика не обеспечена в требуемом количестве и качестве кадрами, соответствующими современным требованиям, прежде всего, по инженерно-техническим специальностям. Причем эта проблема характерна практически для всех видов и сфер инженерно-технической деятельности. И данный факт называется в числе основных причин медленного перехода к экономике инновационного типа.

О существующей проблеме нехватки молодых инженерно-технических специалистов свидетельствуют и международные оценки. Так, одной из составляющих глобального индекса инноваций, который в настоящее время признается интегральной характеристикой уровня экономического развития, является высшее образование. За последние три года Российская Федерация улучшила свои позиции в глобальном индексе инноваций по субиндексу ресурсов инноваций (куда непосредственно входит образование), поднявшись с 52-ой позиции на 43-ю. Уровень развития высшего образования в России международными экспертами отнесен к числу сильных сторон инновационного развития. Однако в части образования наша страна входит в тройку мировых лидеров только по

показателю численности женщин с высшим образованием. В то время как по численности выпускников образовательных организаций высшего образования по научным и инженерным специальностям (в которых особенно нуждается российская экономика) в 2017 г. Россия заняла 13-е место, опустившись на две позиции по сравнению с 2016 г. [1].

Действительно, если обратиться к данным российской статистики высшего образования, то становится очевидным, что основной выпуск в абсолютном и относительном выражении приходится на выпускников по группе специальностей «Экономика и управление» (32.2% общего выпуска 2016 г.). Количество же специалистов с высшим образованием для видов деятельности, определяющих технический прогресс и возможность опережающего развития высокотехнологического комплекса, явно уступает социально-экономическим и гуманитарным направлениям подготовки. Как следует из данных, приведенных в табл. 1, увеличение выпуска, например, по группе специальностей «Приборостроение и оптотехника», «Электронная техника, радиотехника и связь» в относительном выражении выглядит весьма внушительно, составив за один год 18.8%. Однако в абсолютном выражении – это всего лишь 1 908 человек, и в общем выпуске организаций высшего образования доля выпускников рассматриваемых групп в 2016 г. уменьшилась по сравнению с 2015 г. с 1.7% до 1.6%. При этом удельный вес выпускников по группе «Экономика и управление» составил 56.6% от общего выпуска [2, с. 342–343].

Таблица 1. Выпуск бакалавров образовательными организациями высшего образования по отдельным группам специальностей¹

Группы специальностей	Год				Темп изменения, %
	2015		2016		
	всего, чел.	% к итогу	всего, чел.	% к итогу	
Всего	589 754	100.0	762 577	100.0	129.3
Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника	15 977	2.7	21 816	2.9	136.5
Приборостроение и оптотехника	2 600	0.44	3 105	0.41	119.4
Электронная техника, радиотехника и связь	7 583	1.3	8 986	1.2	118.5
Автоматика и управление	11 028	1.9	13 371	1.8	121.2

Справедливости ради надо сказать, что в ближайшие годы следует ожидать изменения структуры выпуска за счет увеличения доли выпускников по инженерно-техническим специальностям, которые произойдут как результат целенаправленной политики органов управления в сфере высшего образования и усилий самих образовательных организаций по привлечению абитуриентов на инженерно-технические направления и специальности подготовки. В частности, к настоящему моменту уже четко обозначилась тенденция сокращения численности поступающих на направления и специальности группы «Экономика и управление», доля которой в приеме 2016 г. составила 17.8% (в 2015 г. – 19.9%). При этом численность студентов, поступивших на направления и специальности инженерно-технической направленности, растет и в абсолютном, и в относительном выражении. В частности, по группе «Электронная техника, радиотехника и связь» численность

¹Рассчитано по данным статистического бюллетеня «Образование в России» – 2017 [2, с. 342–343].

принятых в государственные образовательные организации в 2016 г. составила 18 771 человек. Она незначительно, на 1.1%, но превысила набор 2015 г. Увеличилась также доля поступивших на данную группу специальностей в общей численности приема, которая в 2016 г. составила 1.81% по сравнению с 1.77% в 2015 г. Основная часть поступивших (77%) обучается за счет средств бюджета, что свидетельствует о достаточно объемном государственном заказе на подготовку специалистов по данной группе специальностей [2, с. 327].

Однако наметившиеся положительные тенденции в выпуске специалистов с высшим образованием для востребованных экономикой отраслей и видов деятельности не могут еще служить подтверждением того, что проблема обеспечения квалифицированными кадрами решается успешно. Проблема не только в количестве подготовленных специалистов, но и в качестве их подготовки.

В соответствии со стандартом ISO 9000:2000 под качеством понимается степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования. Если носителем качества является выпускник образовательной организации высшего образования, то, используя данное определение, будем считать, что качество подготовки кадров представляет соответствие совокупности характеристик выпускника вуза требованиям, предъявляемым к выпускнику заинтересованными сторонами. Если говорить об экономике, то носителем требований является работодатель, а критерием качества выпускника в этом случае будет востребованность выпускника рынком труда, восприятие молодого специалиста работодателем. Вузы должны готовить таких молодых специалистов, которые будут удовлетворять потребности не некоего «усредненного работодателя», а с учетом особенностей регионального и территориального рынка труда. В свою очередь, эти особенности связаны со структурой региональных отраслевых рынков, уровнем экономического развития регионов и территорий, особенностями организационно-правовых форм предприятий и другими факторами.

Изменение требований, предъявляемых к выпускникам вузов, уменьшает информационную ценность показателя выпуска специалистов. Ключевое значение с учетом новых требований приобрел показатель трудоустройства², который вошел в систему показателей, используемых для оценки деятельности образовательных организаций, и стал предметом ежегодного мониторинга. Основываясь на данных о трудоустройстве выпускников, можно составить представление о качестве подготовки кадров по инженерно-техническим специальностям и сделать выводы о существующих проблемах.

По данным специально организованного Росстатом обследования (выпуск 2010–2015 гг.), выпускники инженерно-технических специальностей имеют высокие показате-

²Вопрос об использовании показателя трудоустройства является достаточно спорным и дискуссионным. Действительно, если бы трудоустройство зависело только от уровня подготовки молодого специалиста, тогда без сомнения можно было бы принять его как наиболее адекватный для оценки деятельности вуза с точки зрения реализации его экономической функции. Но в действительности трудоустройство зависит от множества факторов, часть из которых не зависит от выпускника высшего учебного заведения. К числу таких факторов относится ситуация на рынке труда (насколько сбалансирован рынок труда на текущий момент), состояние трудовой миграции в определенном регионе, намерения работодателя и реализуемая им кадровая политика и др. Немаловажное значение имеют и ожидания выпускника, связанные с предлагаемой работодателем заработной платой, наличием возможностей карьерного роста и пр. Как бы то ни было, трудоустройство, связанное с показателями выпуска молодых специалистов, на сегодняшний день является практически единственным показателем, на основании которого можно судить о том, насколько экономика обеспечивается молодыми кадрами и насколько они соответствуют требованиям работодателей.

тели трудоустройства, превышающие среднероссийский уровень, который в 2016 г. составил 90.5% (рис. 1). По группе специальностей «Электронная техника, радиотехника и связь» трудоустройство по данным обследования составило 94.2%, что позволяет положительно оценить результаты деятельности образовательных организаций. Отрадным является тот факт, что выпускники данной группы специальностей по трудоустройству значительно опережают выпускников многих других групп, занимая девятую позицию из 27 (по числу укрупненных групп специальностей), и тем самым входя в ТОП-10 по показателю трудоустройства выпускников [3].



Рис. 1. Трудоустройство выпускников 2010–2015 годов (в процентах от выпуска).

Ситуация выглядит уже не столь благополучной при рассмотрении трудоустройства по специальности, полученной в вузе (см. рис. 1). Здесь по всем группам специальностей показатели ниже общего уровня трудоустройства, особенно по группе «Приборостроение и оптотехника». По группе «Электронная техника, радиотехника и связь» трудоустройство по специальности превышает среднероссийский уровень, составивший в 2016 г. 68.7%, и выпускники данной группы специальностей входят в число наиболее востребованных рынком труда. Обращает на себя внимание тот факт, что по текущей занятости показатели трудоустройства по всем группам специальностей (из рассматриваемых), кроме группы «Химическая технология», несколько повысились, что, несомненно, следует рассматривать как положительный факт.

Анализ трудоустройства выпускников вузов по данным выборочного обследования Росстата позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на наличие у работодателей потребности в инженерно-технических кадрах, эта потребность, очевидно, остается неудовлетворенной. На это указывает наличие нетрудоустроенных выпускников или трудоустроенных не по специальности. Одной из основных причин сложившейся ситуации считается недостаточно высокое качество подготовки молодых специалистов (хотя на трудоустройство могут влиять, и, несомненно, влияют, факторы личностного характера).

Качество как экономическая категория является сложным понятием. Уровень качества объекта зависит от множества факторов. То же самое можно сказать и о качестве

подготовки кадров, которое является многомерным понятием, включающим и качество абитуриентов, и качество организации учебного процесса, и качество профессорско-преподавательского состава, и уровень имеющейся у образовательной организации материально-технической базы и пр. Поэтому, конечно, чтобы серьезно повысить качество подготовки кадров с точки зрения их востребованности работодателями, необходим комплексный подход, обеспечивающий изменение всех составляющих качества.

В контексте рассматриваемого вопроса важно то, что среди причин нетрудоустройства и трудоустройства не по специальности, барьеров, возникающих у молодых специалистов, а также проблем, выделенных работодателями, одно из первых по значимости мест занимает «отсутствие практических навыков, опыта практической деятельности». А достаточно высокий процент тех молодых специалистов, которых «доучивают» и «переучивают» после трудоустройства, свидетельствует о том, что уровень практической подготовки выпускников не вполне устраивает работодателей.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о недостаточности практической подготовки обучающихся и необходимости рассмотрения форм, методов и механизмов, используемых в процессе образования (как единого процесса обучения и воспитания), и возможностях интенсификации их использования как факторов повышения качества подготовки молодых специалистов.

В целях решения поставленной задачи, используя данные, собранные в Московском технологическом университете (МИРЭА), рассмотрим сущность практико-ориентированного подхода, основные направления его реализации и проблемы интенсификации практической подготовки студентов, обучающихся по направлениям и специальностям, связанным с радиотехникой и системами связи. МИРЭА имеет большой опыт образовательной деятельности в области радиотехники и систем связи, подготовка специалистов для которой начала вестись практически с момента образования МИРЭА. За все время функционирования Университет подготовил немало квалифицированных выпускников, которые успешно занимаются исследовательской, проектной, конструкторской и другими видами деятельности.

Результаты исследования

Современному рынку труда нужны практико-ориентированные специалисты, имеющие не только хорошие теоретические знания, но – что немаловажно – опыт их применения на практике, опыт выполнения работ, связанных с профессией. По данным мониторинга 2017 г., трудоустройство выпускников МИРЭА по радиотехнике и системам связи составило 79.1%, что выше аналогичного среднероссийского показателя по данной группе специальностей, о чем свидетельствуют данные рис. 2.

Если обратиться к оценкам работодателей и основных партнеров по подготовке специалистов по УГНПС 11.00.00, то уровень теоретических знаний выпускников устраивает их значительно больше, чем практические навыки. По данным опроса основных стратегических партнеров, 47% (самый высокий показатель) респондентов выделили сла-

³По данным выборочного обследования Росстата, среди трудоустроившихся молодых специалистов на «доучивание» и «переучивание» в первые три месяца после трудоустройства были направлены 27.2% получивших высшее образование по программам специалитета и магистратуры и 29.9% получивших высшее образование по программам бакалавриата.

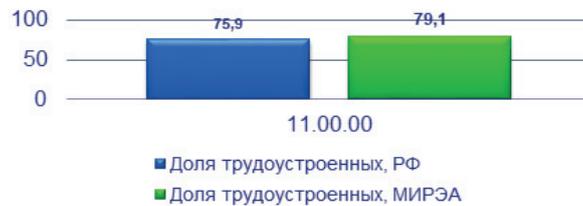


Рис. 2. Трудоустройство выпускников по группе специальностей «Электронная техника, радиотехника и связь» (по данным мониторинга трудоустройства 2017 г. МОН РФ).

бую практическую подготовку молодого специалиста в качестве основной проблемы и препятствия трудоустройства. Таким образом, фактор готовности молодого специалиста к практической деятельности, наличие практики решения задач в области будущей профессиональной деятельности в настоящее время играет едва ли не первостепенную роль для работодателя и является значимым индикатором качества его подготовки к профессиональной деятельности.

О необходимости усиления практической подготовки и повышения практической направленности учебного процесса свидетельствует переход в высшем образовании к стандартам 3⁺⁺, главной особенностью которых является именно их направленность на будущую трудовую деятельность. Не случайно приложением к образовательному стандарту является профессиональный стандарт, и в нем появляется такое новое понятие, как обобщенная трудовая функция. Из этого следует, что «качество» выпускника ставится всё в большую зависимость от того, насколько хорошо он будет знаком с современным производством и как он пройдет начальный этап профессиональной адаптации во время обучения.

Необходимо подчеркнуть, что предъявляемые к вузам требования, о которых идет речь, не являются чем-то новым. О том, что выпускники должны быть востребованы работодателями, говорится уже не первый год. Однако вузовская система подготовки по-прежнему остается в рамках традиционных форм и методов организации учебного процесса, смещая центр тяжести в сторону академического, а не прикладного образования. Даже введение прикладного бакалавриата, отличающегося большим объемом учебного времени, отводимого для прохождения практики, существенно ситуацию не изменило: потребности компаний и предприятий реального сектора в части компетенций выпускников все время опережают достигнутый вузами уровень подготовки.

Таким образом, организация образовательной деятельности и подготовки кадров в современных вузах должна опираться на требования, которые предъявляет к выпускникам нынешняя социальная и профессиональная практика. А основным содержанием этих требований является высокий уровень практической подготовки, позволяющий молодому специалисту сократить период профессиональной и трудовой адаптации и как можно быстрее полноценно включиться в трудовой процесс.

Достижение требуемого (или близкого к таковому) уровня практической подготовки при реализации образовательных программ может быть обеспечено путем смещения приоритетов в сторону практико-ориентированного обучения. Несмотря на отсутствие сформированной теоретической базы данного вида образовательной практики и отсутствие общепринятых определений даже в части терминологического аппарата, очевидно,

что такого рода обучение должно ориентироваться на конкретную практику, а не на учебники, и должно осуществляться в тесном сотрудничестве образовательных и производственных организаций.

Обзор существующих исследований [4] позволяет говорить о целесообразности реализации практико-ориентированного подхода с разной степенью практико-ориентированности:

- низкая степень практико-ориентированности (наиболее узкий подход) – достигается в случае, если формирование профессионального опыта студентов происходит лишь в процессе учебной, производственной и преддипломной практики;

- средняя степень практико-ориентированности – предполагает использование потенциала всех видов практик, а также контекстного (профессионально направленного) изучения профильных и непрофильных дисциплин;

- высокая степень практико-ориентированности (наиболее широкий подход) – использование разнообразных способов и возможностей «погружения» обучающегося в профессиональную среду с целью приобретения опыта практической деятельности.

Очевидно, наиболее полно потенциал практико-ориентированного подхода может быть реализован в рамках целевой подготовки обучающихся. В этом случае есть уже конкретное предприятие или организация, заключающее договор о целевой подготовке, что позволяет на всех этапах обучения в процессе взаимодействия вуз – предприятие учитывать конкретные требования предприятия-заказчика. Кроме того, уже на этапе поступления в вуз (в случае целевого приема) или на начальном этапе обучения (целевое обучение) есть возможность подбора профессионально мотивированных студентов, что создает лучшую основу для последующей практической подготовки.

В Московском технологическом университете (далее – МИРЭА) активно ведется целевая подготовка специалистов по радиотехнике и системам связи, осуществляемая Институтом радиотехнических систем (ИРТС). В 2017 г. из 202 мест, установленных контрольными цифрами приема по программам бакалавриата и специалитета, целевая квота составила 87 человек, то есть 43% от общего количества контрольных цифр приема.

К сожалению, потенциал целевой подготовки для решения проблемы кадрового обеспечения, и в том числе, проблемы качественной практической подготовки, используется далеко не полностью. Значимость проблемы столь высока и очевидна, что стала предметом специально проведенного по данному вопросу 14 октября 2016 г. селекторного совещания «О повышении эффективности целевого обучения и целевого приема». Как было подчеркнуто на совещании, проблема эффективности целевой подготовки носит комплексный характер.

- Во-первых, выделяемая целевая квота используется далеко не полностью и «выбирается в среднем по стране лишь приблизительно на две трети» [5]. По данному показателю ситуация в МИРЭА в 2017 г. обстоит значительно лучше: например, по направлениям и специальностям 11 УГНПС целевая квота была выбрана на 81.6%, в чем немалая заслуга всех участников приемной кампании.

- Во-вторых, весьма проблемным в использовании данной формы взаимодействия с предприятиями является сохраняющийся на протяжении многих лет более низкий средний балл зачисленных по целевой квоте относительно зачисленных на бюджетную фор-

му обучения. Следовательно, уже на начальном этапе вузы получают более «слабых» студентов, немалая часть которых в течение обучения отчисляется, а дошедшие до завершения образовательного процесса имеют невысокие показатели успеваемости и вряд ли будут представлять интерес для требовательных работодателей.

- В-третьих, далеко не все предприятия, заключившие договор о целевой подготовке, выполняют взятые на себя обязательства, в частности, по трудоустройству выпускников. Например, среди выпускников-целевиков ИРТС 2017 г. только немногим более половины (56%) обучающихся проходили производственную (преддипломную) практику в тех организациях, которые заключили договор о целевом приеме, хотя прохождение практики в организации-заказчике предусмотрено договором. Такая ситуация, несомненно, свидетельствует о неэффективности целевой подготовки, хотя в данном случае причина неэффективности не лежит на стороне образовательной организации.

Каковы бы ни были возможности усиления практической подготовки через механизмы целевой подготовки, основная часть обучающихся (не «целевиков») также должна быть охвачена соответствующими формами и мероприятиями, развивающими их практические навыки.

При отсутствии регламентации технологии практико-ориентированного обучения каждая образовательная организация формирует свой подход с учетом особенностей образовательной организации и уровня развития взаимодействия с профильными предприятиями и организациями. Одним из возможных вариантов является система практико-ориентированного обучения, реализуемая в МИРЭА (рис. 3).

Как следует из рис. 3, система включает три типа структурных составляющих:

- обязательные составляющие – те формы и способы организации практической подготовки, которые предусмотрены образовательным стандартом: практика, в некоторой степени выполнение выпускной квалификационной работы;
 - инициативные составляющие – те формы, способы реализации практико-ориентированного подхода, использование которых инициировано самой образовательной организацией: специально организованные мероприятия: -экскурсии - встречи с работодателями
- Базовые кафедры
Практико-ориентированность
ППС
Учебно-лабораторная база



Рис. 3. Основные элементы системы практико-ориентированного обучения в МИРЭА.

предприятиями, дают возможность развивать навыки практической деятельности, участвуя в профессиональных конкурсах и пр.;

- инфраструктурные элементы как обеспечивающие эффективное использование и функционирование первых двух составляющих: наличие специалистов-практиков в профессорско-преподавательском составе, развитие практических компетенций штатных преподавателей, учебно-лабораторная и производственная база, базовые кафедры.

Очевидно, что наибольший охват обучающихся практической подготовкой дает практика как одна из составляющих образовательной программы. Еще Жан-Жак Руссо говорил, что час работы научит больше, чем день объяснения. Определение практики, данное в законе «Об образовании в Российской Федерации» [6, с. 5], прямо указывает на целевую функцию практики и на то, что в процессе прохождения практики студент должен *выполнять определенные виды работ*.

Именно практика, прежде всего производственная, направлена на приобретение практических навыков и обеспечивает практическую подготовку обучающихся и знакомство с реальными условиями будущей профессиональной деятельности. Правильно организованная практика может и должна играть роль начального периода профессиональной адаптации будущего молодого специалиста, что в последующем упростит его «вхождение» в трудовую деятельность. С этой точки зрения наибольший эффект будет достигнут в том случае, когда обучающийся проходит практику в профильной организации (хотя образовательный стандарт не исключает возможности прохождения практики в образовательной организации). Учитывая типы задач профессиональной деятельности, установленные образовательным стандартом, образовательная организация должна провести определенную организационную работу по подбору предприятий для прохождения практики. Например, стандартом ФГОС 3++ по направлению 11.03.01 «Радиотехника» предусмотрены такие типы задач профессиональной деятельности, как научно-исследовательский, технологический, организационно-управленческий и проектный, что предполагает возможность направления обучающихся как на производственные предприятия, так и в проектные или научно-исследовательские институты.

Анализ данных об организации практики для студентов, обучающихся в МИРЭА по специальностям и направлениям групп «Электронная техника, радиотехника и связь», свидетельствует о том, что большая часть обучающихся учебную (по получению первичных профессиональных навыков) и производственную практику проходит на предприятиях (рис. 4). Низкая доля студентов, проходивших преддипломную практику на предприятиях, в определенной степени связана с тем, что многие из обучающихся выполняют выпускные квалификационные работы исследовательской направленности. В этом случае основной практический материал был собран в процессе производственной практики, и в период непосредственной подготовки ВКР идет уже обработка собранного материала.

Решение вопросов организации и проведения практики в значительной степени зависит от позиции руководства профильных предприятий и организаций, их заинтересованности в дальнейшем привлечении молодых специалистов на работу. Не случайно для обеспечения стабильности в реализации этой части образовательной программы ключевое значение имеет установление партнерских отношений с предприятиями и организациями, предполагающих осуществление взаимодействия по целому ряду направлений

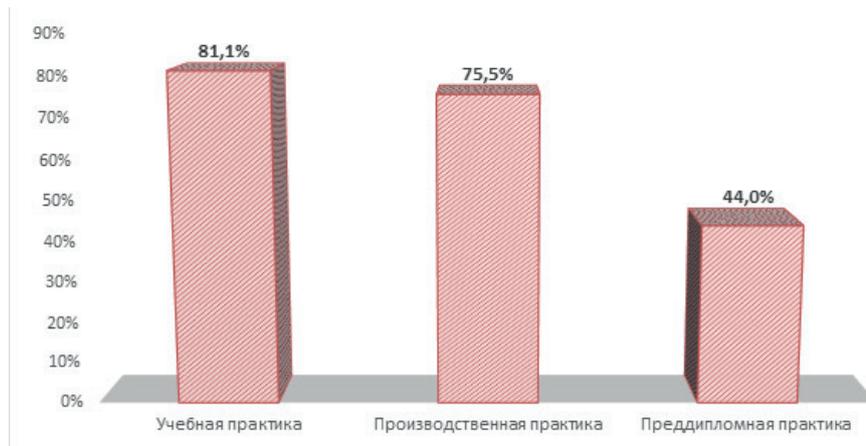


Рис. 4. Доля обучающихся по специальностям и направлениям «Электронная техника, радиотехника и связь», прошедших практику в 2016/17 учебном году на профильных предприятиях (в процентах от численности обучающихся, направленных на практику).

деятельности, и в том числе, по организации практики. С этой позиции модель реализации практико-ориентированного подхода к обучению «Университет – базовая кафедра – предприятие», реализуемая в МИРЭА, позволяет с наибольшей эффективностью и полезностью для образовательной деятельности реализовать основные преимущества партнерских отношений с предприятиями.

Данная модель взаимодействия образовательной организации с профильным предприятием доказала свою эффективность, являясь учебно-производственной и исследовательской площадкой, где готовят специалистов определенной направленности. Однако до сих пор с точки зрения действующих законодательных норм модель взаимодействия вуза с предприятием через базовую кафедру реализуется в варианте, когда базовая кафедра создается в образовательной организации и является ее структурным подразделением. Второй возможный вариант – базовая кафедра создается на самом предприятии – является более предпочтительным. В настоящее время он практически не реализуется, так как в этом случае возникает необходимость проведения дополнительных процедур лицензирования⁴.

К настоящему моменту в структуре учебных институтов МИРЭА функционирует 45 базовых кафедр, которые образованы во взаимодействии с профильными предприятиями, из них 12 базовых кафедр задействованы в образовательном процессе по специальностям и направлениям группы «Электронная техника, радиотехника и связь». По МИРЭА это один из самых высоких показателей интенсивности партнерства с профильными предприятиями, что позволяет обеспечивать широкое присутствие базовых кафедр в учебном процессе и способствует повышению практико-ориентированности всей подготовки специалистов.

Имея самый высокий в МИРЭА относительный показатель наличия базовых кафедр⁵, Институт радиотехнических систем широко использует базовые кафедры для ор-

⁴Министерство образования и науки РФ разработало пакет поправок в Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» в части создания и деятельности структурных подразделений образовательных организаций, в том числе, и базовых кафедр. Утверждение предложенных поправок позволит создавать структурные подразделения вузов непосредственно в шаговой доступности от производств и тех мест, где идут научные исследования. Всё это позволит привлекать к учебному процессу специалистов-практиков и сделать подготовку специалистов практичной и эффективной.

⁵Относительный показатель наличия базовых кафедр определяется численностью обучающихся в расчете на одну базовую кафедру.

ганизации и проведения практики. Как следует из данных, приведенных на рис. 5, 44% из направленных на практику по получению первичных профессиональных навыков обучающихся прошли эту практику на базовых кафедрах, а по производственной практике данный показатель составил 89.2%. Столь широкое привлечение студентов для прохождения производственной практики на профильных предприятиях, которые представляют базовые кафедры, способствует приобретению опыта практической деятельности, непосредственному ознакомлению с современным производством и его организацией, используемым оборудованием, основными производственными процессами.



Рис. 5. Численность студентов, прошедших практику на базовых кафедрах (2016/17 учебный год).

Усиление практико-ориентированности в определенной степени может быть достигнуто в процессе выполнения выпускных квалификационных работ, прежде всего, практической направленности. Во-первых, в данном случае, сбор материала для работы осуществляется на предприятии; во-вторых, появляется возможность выполнять работу не по надуманной теме, а по заказу предприятия, когда есть необходимость решить конкретную практическую задачу. Однако, пока интерес предприятий в этом направлении весьма скромнен. В 2017 г. по направлениям и специальностям 11 УГНПС выполнено всего 19 ВКР по заказу работодателей (около 10% от выполненных выпускных работ).

Опыт осуществления образовательной деятельности и взаимодействия с профильными предприятиями показывает, что важное значение в усилении практико-ориентированности и практической подготовки играют различные мероприятия ознакомительной, профориентационной и прикладной направленности, инициируемые образовательной организацией. Вовлечение обучающихся в подобного рода мероприятия позволяет существенно снизить уровень «профессиональной неопределенности».

Наиболее популярным среди такого рода мероприятий являются экскурсии на профильные предприятия, так называемые «промышленные экскурсии» [7]. В системе взаимодействия образовательных организаций и предприятий экскурсии на профильные предприятия способствуют повышению имиджа предприятия, повышению интереса молодых специалистов к производству и последующему их привлечению на производство, популяризации ряда профессий, наконец, это реклама. Посещение предприятия – это возможность для студента повысить качество формируемых профессиональных компетенций, погружение в реальную производственную среду, возможность временной занятости или последующего трудоустройства.

Экскурсии как способ усиления практико-ориентированности обучения весьма активно используются в ИРТС. В среднем за учебный год около 200 студентов принимают участие в экскурсиях на профильные предприятия, в числе которых АО «Корпорация Комета», АО «Вымпел», АО Концерн «Вега» и др.

Рассматривая экскурсии как один из инструментов реализации практико-ориентированного подхода, хочется упомянуть весьма интересное предложение, согласно которому выделяется как минимум три целевые функции экскурсий на предприятия в зависимости от периода обучения. В частности, на начальном этапе обучения экскурсия должна носить ознакомительный характер и зародить (далеко не все абитуриенты считают свой выбор направления подготовки или специальности осознанным) или усилить интерес к выбранной специальности. Далее, начав изучать дисциплины профессиональной направленности, студенты имеют возможность, уже опираясь на определенные теоретические знания, взглянуть осмысленно на свой профессиональный выбор. Наконец, на завершающем этапе обучения подобные экскурсии способствуют повышению профессиональной подготовленности выпускников [7]. Естественно, что в каждом случае следует использовать разные экскурсионные программы, хотя с точки зрения результативности данного мероприятия дифференцированный подход к его реализации представляется вполне оправданным и целесообразным.

Важным условием реализации практико-ориентированного подхода при подготовке специалистов является практическая подготовка профессорско-преподавательского состава, актуальность их знаний современного производства. В данном случае наиболее результативными следует признать:

- в части штатного преподавательского состава – проведение стажировок и повышение квалификации на профильных предприятиях, а также привлечение в штат работников, имеющих стаж практической работы с небольшим сроком давности;
- в части персонала, привлекаемого на условиях внешнего совместительства – привлечение работников-практиков, работающих на профильных предприятиях⁶.

В части практико-ориентированности педагогического состава ИРТС в настоящее время занимает достаточно скромные позиции в МИРЭА: доля штатных преподавателей, недавно работавших на профильных предприятиях, составляет 6.9% в составе ППС, а среди внешних совместителей лишь 13% являются сотрудниками профильных предприятий. «Слабым» звеном является повышение квалификации по профилю деятельности. В течение последнего учебного года только 10.7% от общей численности штатных преподавателей ИРТС получили дополнительное образование по профилю своей деятельности (хотя это является требованием профессионального стандарта педагога).

Несомненно, позитивное влияние на формирование и развитие навыков практической деятельности оказывают различные конкурсные мероприятия профессиональной направленности. Однако они будут иметь ценность в том случае, если будут проводиться совместно с профильными организациями и предприятиями, которые должны будут

⁶Формально привлечение специалистов-практиков как обязательное требование к условиям реализации образовательной программы зафиксировано в образовательных стандартах и установлено в процентах к численности педагогических кадров, участвующих в реализации образовательной программы. В условиях повышения требований к практической подготовке выпускников вузов увеличение численности специалистов-практиков, участвующих в образовательном процессе, следует рассматривать как положительную тенденцию.

подготовить конкурсные задания и оценить как практики результаты их выполнения. К сожалению, пока такие мероприятия являются зоной активности в основном самой образовательной организации при весьма слабом интересе предприятий, что не позволяет говорить об их эффективности.

Результативная реализация практико-ориентированного подхода, способствующая подготовке кадров, востребованных рынком труда, неизменно предполагает участие в этом процессе не только образовательной организации, но и производственных предприятий. К сожалению, часто заявляемая потребность в молодых специалистах во многих случаях не подкрепляется соответствующей активностью представителей профильного предприятия, что ограничивает возможности усиления практико-ориентированности обучения. Без тесного взаимодействия вуза и предприятия практико-ориентированность останется формальной, и данный подход к подготовке кадров не даст ожидаемого эффекта.

В заключение хочется сказать, что в условиях объективно существующих трудностей организации практической подготовки студентов необходимо использовать все возможные средства для ее реализации, иначе добиться высокого качества подготовки специалистов нам не удастся.

Литература:

1. The Global Innovation Index 2017. Tenth edition. <https://www.globalinnovationindex.org/gii-2017-report>.
2. Образование в России – 2017. Статистический бюллетень. М.: Московский технологический университет, 2017. 444 с.
3. Федеральное статистическое выборочное наблюдение трудоустройства выпускников, получивших среднее профессиональное и высшее образование / Федеральная служба государственной статистики, 2016. Режим доступа http://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/trstatistical_bulletinud/itog_trudoustr/index.html.
4. Карюкина О.Ю. Практико-ориентированный подход в подготовке специалистов. 16.11.2014. Режим доступа: <https://nsportal.ru/npo-spo/obrazovanie-i-pedagogika/library/2014/11/16/praktiko-orientirovannyu-podkhod-v-podgotovke>
5. <http://m.government.ru/all/24896/>.
6. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации». М.: Проспект, 2013. 160 с.
7. Никулина Ю.Н. Повышение конкурентоспособности молодых специалистов за счет введения элементов промышленного туризма в образовательные программы вузов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т. 15. С. 1621–1625. URL: <http://e-koncept.ru/2016/96243.htm>.

References:

1. The Global Innovation Index 2017. Tenth edition. <https://www.globalinnovationindex.org/gii-2017-report>.
2. Education in Russia – 2017. Statistical bulletin. M.: Moscow Technological University, 2017. 444 p. (in Russ.)
3. Federal statistical selective observation of employment of graduates who received

secondary vocational and higher education / Federal Service of State Statistics, 2016. Access mode http://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/trstatistical_bulletinud/itog_trdoustr/index.html. (in Russ.)

4. Karyukina O.Yu. Practical-oriented approach in training specialists. 16.11.2014. Access mode <https://nsportal.ru/npo-spo/obrazovanie-i-pedagogika/library/2014/11/16/praktiko-orientirovanny-podkhod-v-podgotovke>. (in Russ.)

5. <http://m.government.ru/all/24896/>.

6. The Federal law «On Education in the Russian Federation». Moscow: Prospekt Publ., 2013. 160 p. (in Russ.)

7. Nikulina Yu.N. Increase the competitiveness of young professionals by introducing elements of industrial tourism in educational programs of universities // Scientific and methodical electronic journal «Concept». 2016. V. 15. P. 1621–1625. URL: <http://e-koncept.ru/2016/96243.htm> (in Russ.)

Об авторах:

Голованова Наталья Борисовна, доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и инновационного предпринимательства Института экономики и права ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Рогова Вера Александровна, аспирант кафедры экономики и инновационного предпринимательства Института экономики и права ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Nataliya B. Golovanova, Professor, D.Sc. (Economics), Professor of the Chair of Economics and Innovative Entrepreneurship, Institute of Economics and Law, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Vera A. Rogova, Postgraduate Student of the Chair of Economics and Innovative Entrepreneurship, Institute of Economics and Law, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 621.9:004.7+62-52

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ETHERNET-СЕТЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСУП

**В.А. Холопов[@],
Е.Н. Каширская,
М.В. Гусев**

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: holopov@gmail.com

В работе рассматривается оптимизация конфигурации промышленной сети на основе ее моделирования. Представлено описание проектирования промышленной сети по этапам, включающее алгоритмические и математические модели. Разработан алгоритм проектирования, сопоставлены метрики промышленной сети с факторами, влияющими на них, а также разработана целевая функция оптимизации. Предложено решение задачи комбинаторной оптимизации конфигурации промышленных Ethernet-сетей с помощью метода имитации отжига по Больцмановской схеме, который упорядочивает случайный поиск глобального минимума целевой функции. Этот метод оптимизации является перспективным решением, позволяющим повысить эффективность разработки проекта промышленной сети АСУП. Результатами использования метода являются: уменьшение числа ошибок на этапе создания рабочего проекта, структуризация процесса проектирования, четкая формализация требований, экономия времени квалифицированных сотрудников при составлении топологии, спецификаций и других проектных документов, снижение стоимости системы.

Ключевые слова: автоматизация производства, промышленная сеть, автоматизированная система управления, автоматизированная система управления проектами, автоматизированная система управления производством (АСУП), математические модели, алгоритмические модели, метод отжига, целевая функция, комбинаторная оптимизация.

OPTIMIZATION OF CONFIGURATION OF INDUSTRIAL ETHERNET NETWORKS DURING DESIGN OF THE AUTOMATED PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEM

**V.A. Kholopov[@],
E.N. Kashirskaya,
M.V. Gusev**

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: holopov@gmail.com

The paper considers optimization of industrial network configuration based on industrial network simulation. A description of step-by-step industrial network design including algorithmic and mathematical models is given. An algorithm for designing the APCS (Automated Process Control System) industrial network is developed, the metrics of the industrial network are compared with the factors affecting them, and the optimization objective function is developed. A solution of the problem of combinatorial optimization of the industrial Ethernet networks is proposed. Boltzmann scheme annealing method is used as an optimization method that regulates a random search for a global minimum of the objective function. The developed optimization method is a promising solution allowing to increase the efficiency of the APCS industrial network project design. The results of using the method are: reduction of the number of errors at the working project creation stage; design process structuring; clear requirements formalization; saving man hours of qualified employees in drawing up topologies, specifications and other project documents; reduction of the system cost.

Keywords: automation of production, industrial network, automated control system, automated process control system (APCS), automated production management system, mathematic model, algorithmic model, simulated annealing method, cost function, combinatorial optimization.

Современное цифровое машиностроительное производство подразумевает высокую степень автоматизации и технологического оборудования, и технологического процесса, и производства в целом [1]. Для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства требуется обеспечение более высокого уровня организации, функционирования и технологии использования информационно-программных средств [2–5], чем имеющийся в настоящее время. Сложность и комплексность задач автоматизации современного производства требует разработки и внедрения новой архитектуры системы управления исполнительного уровня цифрового производства [1], которая сочетает в себе использование системы SCADA для мониторинга состояния производственного оборудования [6–8] и системы выполнения производственных задач [9, 10].

Для функционирования исполнительного уровня цифрового производства в описываемой архитектуре необходимо обеспечить работу промышленной сети на качественно новом уровне, что может быть достигнуто путем применения оптимизационных методов ее проектирования.

В данной работе рассматривается метод оптимизации конфигурации промышленных Ethernet-сетей, который состоит из восьми этапов:

- разработка математической модели промышленной сети;
- решение задачи соединения и размещения оборудования;
- расчет максимальной загрузки на связях между оборудованием;
- постановка оптимизационной задачи;
- выбор оборудования;
- решение оптимизационной задачи;
- представление метода в виде программного продукта;
- апробация метода на реальном производстве.

Проектирование промышленной сети является сложным многоэтапным процессом, включающим в себя следующие обязательные части:

- формализацию требований к системе;
- соединение и размещение оборудования (выбор топологий);
- выбор технологий резервирования;
- расчет максимальной загрузки;
- выбор оборудования.

При проектировании автоматизированной системы управления производством (АСУП) необходимо гарантированно учесть параметры, требующиеся для передачи информации между подсистемами АСУП [9], центральной частью которой является промышленная сеть. При ее проектировании, кроме гарантированного учета требуемых параметров сети, необходимо минимизировать влияние человеческого фактора и, по возможности, уменьшить стоимость этой сети.

С точки зрения морфологии, структура системы – это устойчивая упорядоченность ее элементов и связей; конфигурация системы есть совокупность функциональных частей системы обработки информации и связей между ними, обусловленная основными техническими характеристиками этих функциональных частей, а также требованиями решаемых задач. Конфигурация и структура определяют строение системы.

Как правило, к каждой системе предъявляется уникальный ряд требований. Однако есть и общие требования, предъявляемые к сети и системе в целом [11]: высокие рабочие характеристики; быстрая реакция; высокая надежность; высокая производительность; модульная сетевая организация, информационная доступность в любой точке системы; легкость наращивания и изменения программно-технических данных; гибкость структуры. Эти качественные требования должны быть выражены в виде количественных характеристик – метрик [12] промышленной сети и факторов, влияющих на них.

Анализ указанных требований к промышленным сетям АСУП дает возможность сопоставить метрики и факторы, влияющие на их значения (таблица).

Метрики промышленной сети и факторы, влияющие на них

Метрика	Влияющие факторы
Максимально допустимые задержки (Delay)	Длина кабеля Время обработки пакета коммутационным оборудованием Занятая емкость (Utilization), бит/с Размер пакета, байт Скорость интерфейса, бит/с Скорость распространения сигнала, с
Максимально допустимые изменения задержки (Delay Jitter)	Время обработки пакета коммутационным оборудованием, с Время обработки пакета конечным устройством Точность синхронизации времени между устройствами
Емкость каналов связи	Скорости интерфейса коммутатора, бит/с
Доступность сети	MTBF\ (MTBF+MTTR)
Максимальные потери пакетов на канале	Время конвергенции протоколов резервирования Ожидаемая загрузка

Обеспечение соответствия требованиям к промышленной сети АСУП предприятия достигается путем введения ограничений на характеристики промышленной сети, для расчета которых используется соответствующая математическая модель. Работоспособность сети обеспечивается за счет введения ограничений на параметры оборудования.

Эти ограничения определяют допустимое множество, из которого может быть выбрана каждая единица оборудования.

Чтобы описать конфигурации промышленной сети АСУП, необходимо определить следующие объекты, свойства которых представлены в виде векторов [13].

Конечное устройство – объект сети, подключенный как конечное устройство к коммутатору промышленной сети: $\bar{e} = [e_1, e_2, \dots, e_c]^T$.

Множество конечных устройств образует множество E : $E = \{\bar{e}\}$.

Коммутационные устройства – это устройства, к которым могут быть подключены конечные устройства и другие коммутационные устройства: $\bar{c} = [c_1, c_2, \dots, c_c]^T$.

Множество коммутационных устройств образует множество C : $C = \{\bar{c}\}$.

Связь – соединение между двумя любыми устройствами, обладающее набором таких свойств, как тип, скорость, длина соединения: $\bar{l} = [l_1, l_2, \dots, l_l]^T$.

Множество связей образует множество L : $L = \{\bar{l}\}$.

Узел сети (УС) – конечное или коммутационное устройство, то есть любое устройство, участвующее в отправке и получении потоков данных. Узел сети h образует множество узлов сети H : $h \in H$.

Сеть – это граф N [14]: $N = (H, V)$, где $V \subset H^2$ – бинарное отношение на множестве H , характеризующее физическое соединение между устройствами.

Набор метрик – набор значений параметров сети, формирующих технические требования для построения промышленной сети АСУП. В математическом виде набор метрик представлен виде вектора $\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, а технические требования в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} y_1^- \leq y_1 \leq y_1^+ \\ \dots \\ y_n^- \leq y_n \leq y_n^+ \end{cases}$$

где y_n^- и y_n^+ – ограничения фактора снизу и сверху, соответственно.

Технология резервирования – это технология, позволяющая при наличии между двумя устройствами резервного маршрута переключать поток данных между ними на резервный маршрут в случае недоступности основного [12]: $r = [r_1, r_2, \dots, r_r]^T$, где r_i – элементы маршрута.

Базовая топология – это отображение множества конечных устройств τ_i на сеть:

$$\tau_i : 2^E \rightarrow \{N_i\},$$

где $i = 1 : n_\tau$;

$n_\tau = |T|$ – количество заданных базовых топологий;

$T = \{\tau_i\}$ – множество базовых топологий;

2^E – множество всех подмножеств E ;

E – совокупность подмножеств;

$\{N_i\}$ – множество всех сетей.

Отображение $\varphi: H \rightarrow C$ ставит в соответствие коммутационному устройству конкретную модель коммутатора.

Теперь определим алгоритм, который будет лежать в основе метода оптимизации конфигурации промышленных Ethernet-сетей при их проектировании. Этот алгоритм

описывает выполнение двух основных процессов: выбор топологии сети и выбор параметров оборудования. Структурный синтез промышленной сети выполняется путем выбора топологии среди множества базовых. При этом базовая топология представляет собой правило, по которому строится топология реальной сети. Множество базовых топологий может быть расширено новыми.

Для каждой базовой топологии будет решена задача выбора оборудования и соединительных линий. Оборудование и соединительные линии выбираются среди множества реально существующих экземпляров, которое может быть изменено.

В качестве общего алгоритма проектирования промышленной сети АСУП нами выбран следующий:

Шаг 1. Для каждой топологии из множества базовых топологий выполнить шаги 2–4.

Шаг 2. Создать реальную топологию на основании базовой.

Шаг 3. Рассчитать максимальную загрузку сети.

Шаг 4. Найти оптимальные значения $\varphi = \varphi^*$:

$$\begin{cases} \varphi_i^* = f_0(\varphi) \rightarrow \min \\ y_j^- \leq y_j(\varphi) \leq y_j^+, j = \overline{1:n_y} \end{cases}$$

$$C_i = f_0(\varphi_i^*)$$

Шаг 5. Выбрать φ_k^*, N_k :

$$C_k = \min(C_1, \dots, C_{n_\tau}),$$

$$k = \overline{1:n_\tau}.$$

После определения алгоритма проектирования и метрики промышленных сетей возникает задача соединения и размещения оборудования, которая решается внутри одного здания. Модель здания представляет собой совокупность параллельных плоскостей, каждая из которых соответствует этажу здания. Внутри здания могут быть определены области для размещения коммутационного оборудования. Местоположение объектов внутри здания задается декартовыми координатами на этаже и номером этажа.

Входными данными этого этапа явятся несколько отображений, которые ставят в соответствие каждому устройству его положение в пространстве и порядковый номер. Подзадача соединения оборудования решается с применением метода одиночных связей, опирающегося на иерархическую кластеризацию [15]. На основе модификации метода сформирован следующий алгоритм размещения оборудования:

Шаг 1. Каждой точке присваивается свой кластер, каждый из которых содержит один элемент. Расстояние между кластерами равно расстоянию между точками.

Шаг 2. Находится ближайшая пара кластеров, которая объединяется в один при условии, что расстояние между ними менее 100 м и общее количество кластеров больше двух. Расстоянием между кластерами считается расстояние между ближайшими точками.

Шаг 3. Вычисляются расстояния между новым кластером и каждым из существующих.

Шаг 4. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока количество кластеров не перестанет уменьшаться.

В случае использования трехмерной модели к декартовым координатам точки на этаже добавляем высоту этажа. Тогда задача размещения решается следующим образом:

Шаг 1. Для каждого кластера определяется центр масс.

Шаг 2. Соответствующий коммутатор каждого кластера помещается в ближайшую серверную относительно определенного центра масс.

Шаг 3. Центральные коммутаторы помещаются в серверную, ближайшую к центру масс всех устройств.

По итогам размещения получаем отображение, которое ставит в соответствие каждой связи длину, равную евклидову расстоянию между точками в пространстве.

После решения описанных выше задач наступает **этап расчета максимальной загрузки**. Данный этап имеет ключевое значение при выборе оборудования и каналов связи. Когда все устройства сети участвуют в обмене данными, то каждое состояние сети S_k соответствует максимальному сочетанию пар в полном графе с вершинами, символизирующими конечные устройства. Это может быть выполнено в соответствии со следующим алгоритмом:

Шаг 1. Для каждого остовного дерева графа T выполнить шаги 2–4. Перебрать остовные деревья можно путем последовательного удаления сочетаний цикломатического числа ребер $V(x) = m - n + p$, где m – количество ребер; n – количество вершин; p – количество связных частей графа.

Шаг 2. Для каждого состояния сети S_k выполнить шаг 3.

Шаг 3. Рассчитать максимальную загрузку всех ребер остовного дерева, для чего последовательно рассмотреть пути между парами взаимодействующих устройств в ориентированном графе, прибавляя каждому ребру соответствующее значение максимального потока данных каждого конечного устройства. Найти значение максимального потока данных на коммутаторе, равного входящей степени вершины.

Шаг 4. Для каждого ребра остовного дерева назначить вес, равный максимальному среди весов для каждого состояния этого дерева.

Шаг 5. Для каждого ребра графа T назначить максимальных вес из весов всех остовных деревьев.

Таким образом, по итогам выполнения алгоритма для каждой из базовых топологий получим набор взвешенных графов. Далее необходимо для каждой конфигурации подобрать оборудование и выбрать оптимальную конфигурацию из полученного множества, то есть возникает задача комбинаторной оптимизации. Выбор оборудования происходит среди объектов множества F , $F \subset C$. Множество F включает в себя устройства, соответствующие требованиям производства, таким, как класс защищенности, рабочие температуры, допустимая влажность и т. д. С математической точки зрения, задачей рассматриваемого этапа является поиск такого φ , которое обеспечит выполнение следующих ограничений:

$$\begin{cases} C(\varphi) \rightarrow \min - \text{стоимость сети} \\ A(\varphi) \geq A^- - \text{доступность сети} \\ D(\varphi) \geq D^+ - \text{максимальные задержки} \\ J(\varphi) \geq J^+ - \text{максимальный джиттер} \\ L(\varphi) \geq L^+ - \text{максимальные потери} \end{cases}$$

Оператор $\varphi: H \rightarrow F$, φ ставит в соответствие коммутационному устройству H конкретную модель коммутатора F , соответствующую требованиям производства.

С целью решения оптимизационной задачи нами разработана целевая функция, которая определяет критерии оптимального выбора. Главным из таких критериев является стоимость, то есть следует выполнить поиск такой конфигурации сети, при которой, не жертвуя параметрами качества сети, будет оптимизирована стоимость оборудования.

В математическом виде целевая функция примет следующий вид:

$$C = \sum_j C_2^{(j)}$$

где $C_2^{(j)}$ – стоимость коммутатора.

В математической модели комбинаторной оптимизации будем использовать следующие метрики промышленной сети.

Односторонняя задержка зависит от задержки распространения сигнала (*propagation delay*), задержки передачи пакета в сеть (*serialization delay*), задержки очередности на интерфейсе (*queuing delay*) [16]. Для произвольного участка сети формула расчета задержки будет выглядеть следующим образом:

$$D = \sum_i \left[\frac{8 \times PS}{l_1^{(i)}} + \frac{8 \times PS}{l_1^{(i)} - U_1} + l_2^{(i)} \times l_3^{(i)} \right]$$

где PS – размер пакета, байт;

l_1 – максимальный поток данных, который может быть обработан на интерфейсе, бит/с;

U_1 – текущий поток данных на канале связи, бит/с;

l_2 – скорость распространения сигнала, с;

l_3 – длина кабеля, м.

Доступность промышленной сети рассчитывается по формуле:

$$A_{net} = \frac{MTBF_{net}}{MTBF_{net} + CT_N},$$

где $MTBF_{net}$ – среднее время между сбоями промышленной сети;

CT_N – время конвергенции протокола резервирования при заданной конфигурации сети.

Джиттер возникает из-за очередей на интерфейсах коммутационного оборудования. Для кольцевой топологии максимальный джиттер определяется по формуле [16]:

$$J_r = CT_N + n_h \times pd_N$$

где n_h – количество устройств в кольцевой топологии;

pd_N – вносимая каждым коммутационным устройством сети дополнительная задержка ко времени конвергенции протокола резервирования.

Для топологии «зарезервированная звезда» максимальный джиттер будет рассчитываться по формуле [16]:

$$J_s = \max(CT_N^{(i)}), i = \overline{1:n_{rl}},$$

где n_{rl} – количество зарезервированных связей.

Максимальные потери на канале составляет разница между отправленным количеством пакетов и полученным количеством пакетов. Как правило, эта разница выражается в процентном соотношении.

$$L_k = \frac{\sum_i L_{ci}(CT_N, l_{4j}^{(i)}, C_{li})}{\sum_i CT_N \times \sum_i l_{4j}^{(i)}}$$

$$L_{ci}(CT_N, l_{4j}^{(i)}, C_{li}) = \begin{cases} 0 & \text{при } C_{li} > CT_N \times \sum_j l_{4j}^{(i)} \\ CT_N \times \sum_j l_{4j}^{(i)} - C_{li} & \text{при } C_{li} \leq CT_N \times \sum_j l_{4j}^{(i)} \end{cases}$$

где $j = \overline{1:n_l}$, здесь n_l – количество смежных с вышедшим из строя коммутаторов;

$i = \overline{1:n_j}$, здесь n_j – количество инцидентных связей для смежных вышедшему из строя коммутаторов;

C_{li} – размер буфера i -ого коммутатора, бит.

Ожидаемую загрузку l_4 инцидентных связей вышедшего из строя коммутатора считаем равной нулю.

Приведенная формула представляет собой отношение количества пакетов, суммарный размер которых превышает размер буфера коммутатора, к сумме всех передаваемых пакетов за время конвергенции CT_N .

$$L = \max(L_k), k = \overline{1:n_c},$$

где n_c – количество коммутационных устройств.

Решение поставленной оптимизационной задачи не может быть получено простым перебором в силу огромного множества различных комбинаций параметров промышленной сети.

Для выбора метода оптимизации были проанализированы различные техники оптимизации. Наиболее перспективным оказался метод отжига – разновидность метода Монте-Карло, использующий упорядоченный случайный поиск на основе аналогии с процессом образования в веществе кристаллической структуры с минимальной энергией при охлаждении [17]. Аналогом энергии в данном исследовании является стоимость оборудования $E = f(x)$, а аналогом температуры T – вектор параметров системы.

При поиске минимума целевой функции $f(x)$ – стоимости оборудования рассчитываемой характеристикой является вероятность $h(\Delta E, T)$ перехода системы из текущего состояния к следующему, где ΔE – изменение стоимости системы при переходе к новому состоянию.

В качестве функции $h(\Delta E, T)$ будем использовать $h(\Delta E, T) = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$, что соответствует характеру изменения суммарной стоимости оборудования при уменьшении количества его единиц.

Представим применение метода отжига следующим алгоритмом:

1. Произвольный выбор начального состояния $x_0 \in S$, где x – состояние системы, S – пространство состояний.
2. Определение текущего значения $E = f(x_0)$
3. Итерационный процесс определения глобального минимума целевой функции по методу отжига.

Оптимизируемая система представляет собой граф с n вершинами, каждой из которых может быть поставлена в соответствие модель коммутатора. Отображение элементов графа на определенный коммутатор представим в виде n -мерного вектора $x = [x_0 \dots x_{n-1}]$, в котором каждый элемент является идентификатором модели соответствующего узла сети. Все возможные значения x образуют пространство состояний S .

Суммарная стоимость всех коммутаторов сети определяется по формуле:

$$E = \sum_{i=0}^{n-1} C_i$$

Согласно Больцмановской схеме, изменение параметров задается формулой [17]:

$$T(k) = \frac{T_0}{\ln(1+k)}, k > 0$$

где T_0 – начальный вектор параметров;

k – номер шага итерационного процесса.

Далее выбирается семейство нормальных распределений $G(x, T)$ с математическим ожиданием x и дисперсией T , задаваемое плотностью:

$$g(x, T) = (2\pi T)^{-\frac{D}{2}} \times \sum_{i=0}^{n-1} e^{-\frac{|x_i-x|^2}{2T}},$$

где D – размерность пространства состояний.

Данное распределение является частью Больцмановской схемы, для которой доказано, что при достаточно больших T_0 и общем количестве шагов k глобальный минимум может быть гарантированно найден.

Заключение

Предложенный метод оптимизации проектирования промышленной сети позволяет многократно ускорить процесс разработки проекта сети и предоставить проектировщику системы готовое техническое решение. Метод представлен в виде программного продукта, который апробирован в производстве фрикционных углеродных дисков на ОАО АК «Рубин». Промышленная сеть на производстве предназначается для передачи управляющих программ, технологической документации, команд, обеспечивающих управление вспомогательным оборудованием. От систем ЧПУ и ПЛК на SCADA систему в режиме реального времени по сети передается также диагностическая информация. По результатам выполненной оптимизации стоимость проектирования системы снижена на 18%, трудозатраты – на 20 рабочих часов. Очевидные выгоды от использования метода:

- уменьшение числа ошибок на этапе создания рабочего проекта;
- структуризация процесса проектирования;
- четкая формализация требований;
- экономия времени квалифицированных сотрудников при составлении топологии, спецификаций и других проектных документов;
- снижение стоимости системы.

Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по заказу Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58016X0008).

Литература:

1. Romanov A., Romanov M., Kharchenko A., Kholopov V. Unified architecture of execution level hardware and software for discrete machinery manufacturing control systems // Proceed. of the 14th IEEE Student Conference on Research and Development: Advancing Technology for Humanity (SCoReD 2016). IEEE, 2016. P. 7810088.
2. Kurnasov E.V. Creation of plastic zones and their cross sections in NC CAD equipment // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 2. P. 191–193.
3. Kurnasov E.V. Design of housing components in NCCAD system // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 8. P. 841–847.
4. Кушнир А.П. Визуализация геометрической задачи ЧПУ // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 4(9) (т. 2). С. 127–139.
5. Кушнир А.П. Виртуальный контроль сборки изделия на стадии проектирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 5. С. 54–56.
6. Holopov V., Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // Proceed. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. IEEE. 2017. P. 863–868.
7. Курнасов Е.В. Метод ситуативного изменения поведения объектов АСУТП в пользовательских интерфейсах SCADA-систем // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 4. С. 20–28.
8. Kurnasov E.V. Object attachment of devices in SCADA systems // Russian Engineering Research. 2013. V. 33. № 3. P. 152–155.
9. Курнасов Е.В. Оценка эффективности автоматизированного технологического процесса с учетом его декомпозиции и синтеза подпроцессов // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 4. С. 31–35.
10. Курнасов Е.В. Оценка степени межуровневого взаимодействия информационных потоков производственного предприятия с MES-системой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 3. С. 3–5.
11. Офицеров А.И. Проектирование сетей передачи данных автоматизированных систем управления промышленных предприятий: дис. ... канд. тех. наук. Орел, 2010. 110 с.
12. Руководство по технологиям объединенных сетей: справ. по сетевым технологиям Cisco Systems Inc. пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2005. 76 с.

13. Золотарев А.А. Методы оптимизации распределительных процессов. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
14. Хаггарти Р. Дискретная математика для программистов. М.: Техносфера, 2012. 400 с.
15. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия. М.: Финансы и статистика, 1988. 345 с.
16. Sean R. Cisco Systems Inc. Designing for Cisco Internetwork Solutions (DESGN) Foundation. USA: Cisco Press, 2011. 576 p.
17. Лопатин А.С. Метод отжига. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2005. 149 с.

References:

1. Romanov A., Romanov M., Kharchenko A., Kholopov V. Unified architecture of execution level hardware and software for discrete machinery manufacturing control systems // Proceed. of the 14th IEEE Student Conference on Research and Development: Advancing Technology for Humanity (SCOReD 2016). IEEE, 2016. P. 7810088.
2. Kurnasov E.V. Creation of plastic zones and their cross sections in NC CAD equipment // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. N. 2. P. 191–193.
3. Kurnasov E.V. Design of housing components in NCCAD system // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. N. 8. P. 841–847.
4. Kushnir A.P. Visualization of geometrical problems CNC // Vestnik MGTU MIREA (Bulletin of MSTU MIREA). 2015. № 4(9) (vol. 2). P. 127–139. (in Russ.).
5. Kushnir A.P. Virtual control of the product assembly at the design stage // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii (Assembling in Mechanical Engineering, Instrument Making). 2009. № 5. P. 54–56. (in Russ.).
6. Holopov V., Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // Proceed. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. IEEE. 2017. P. 863–868.
7. Kurnasov E.V. Situational change method of the APCS objects behavior in the user SCADA systems interfaces // Automation and modern technology. 2014. № 4. P. 20–28. (in Russ.).
8. Kurnasov E.V. Object attachment of devices in SCADA systems // Russian Engineering Research. 2013. V. 33. N. 3. P. 152–155.
9. Kurnasov E.V. The effectiveness valuation of the automatic process, by taking into account its decomposition and subprocesses synthesis // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii (Automation. Modern technology). 2016. № 4. P. 31–35. (in Russ.).
10. Kurnasov E.V. Estimation of the degree of interlevel interaction of information streams of manufacturing enterprise with system MES // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii (Assembling in Mechanical Engineering, Instrument Making). 2012. № 3. P. 3–5. (in Russ.).
11. Ofitserov A.I. Designing data transmission networks of automated control systems for industrial enterprises: dissertation ... Ph.D (Eng). Orel, 2010. 110 p. (in Russ.).
12. A guide to integrated network technologies. Cisco Systems Inc. Trans. from English.

М.: O.D. Williams, 2005. 76 p. (in Russ.).

13. Zolotarev A.A. Methods of distribution processes optimization. Moscow: Infra-Engineering, 2014. 160 p. (in Russ.).

14. Haggarty R. Discrete mathematics for programmers. Moscow: Technosphere, 2012. 400 p. (in Russ.).

15. Zhambu M. Hierarchical cluster analysis and correspondence. Moscow: Finance and Statistics, 1988. 345 p. (in Russ.).

16. Sean R. Cisco Systems Inc. Designing for Cisco Internetwork Solutions (DESGN) Foundation. USA: Cisco Press, 2011. 576 p.

17. Lopatin A.S. Annealing method. Saint Petersburg: St. Petersburg State University, 2005. 149 p. (in Russ.).

Об авторах:

Холопов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Каширская Елизавета Натановна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Гусев Максим Викторович, аспирант кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vladimir A. Kholopov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Industrial Informatics Chair, Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Elizaveta N. Kashirskaya, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Industrial Informatics Chair, Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Maxim V. Gusev, Postgraduate Student of the Industrial Informatics Chair, Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

УДК 577.337; 538.931

**КОЛЛЕКТИВНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ
В АЛЬФА-СПИРАЛЬНОЙ МОЛЕКУЛЕ БЕЛКА**

**В.Н. Каданцев^{1,@},
А.Н. Гольцов²**

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

²Школа науки, техники и технологии, Абертэй Университет, Данди, Великобритания

@Автор для переписки, e-mail: appl.synergy@yandex.ru

Целью настоящей работы является выявление условий, при которых в результате взаимодействия колебаний молекул в альфа-спиральной молекуле белка формируются коллективные возбуждения вибронного типа. В макромолекуле белка выделяются две подсистемы: цепочка соединенных водородными связями пептидных групп и подсистема связанных через альфа-углеродный атом с пептидными группами радикалов, входящих в состав аминокислотных остатков. Молекулярные колебания в белках ответственны за такие белковые процессы, как ферментативная активность, перенос электронов и/или энергии, конформационные переходы и белковые взаимодействия. Вопрос о возможности существования длинноволновых квантовых когерентных состояний в биологических системах при физиологических температурах обсуждается в течение нескольких десятилетий. Герберт Фрелих предположил, что колебательные режимы в белковых молекулах могут упорядочиваться и конденсироваться в низкочастотный колебательный режим в процессе, аналогичном конденсации Бозе-Эйнштейна, и, следовательно, макроскопическая когерентность потенциально может наблюдаться в биологических системах. Недавними экспериментальными данными по длительному коллективному возбуждению белка в терагерцовой области частот установлено, что, поглощая излучение с частотой 0.4 терагерц, молекулы белка в кристалле изменяют свое электронное состояние, а вместе с ним и строение. В частности, сжимается одна из α -спиралей лизоцима. При этом сжатое состояние сохраняется в образце на протяжении миллисекунд. Анализ показывает, что время существования колебаний от микро- до миллисекунд объясняется только Фрелих-конденсацией, явлением, предсказанным почти полвека назад, но ни разу не подтвержденным экспериментально. Представления о коллективных возбуждениях в биомacroмолекулах широко используются и при исследовании одного из центральных вопросов биоэнергетики – выяснении причин высокой эффективности переноса энергии, электронов и протонов в пределах одной макромолекулы и между молекулами. В данной статье теоретически в квазиклассическом приближении исследуется динамика альфа-спиральной белковой структуры при наличии внешнего окружения. Показано, что в результате взаимодействия с окружением (внутриклеточной средой) в альфа-спиральных молекулах могут возбуждаться как акустические колебания (Фрелиховский режим), так и возбуждения типа уединенных волн – солитонов (Давыдовский режим).

Ключевые слова: альфа-спиральные белки, водородные связи, фононы, солитоны, коллективные возбуждения, флуктуации, конденсация Фрелиха.

COLLECTIVE EXCITATIONS IN ALPHA-HELICAL PROTEIN MOLECULE

V.N. Kadantsev^{1,@},
A.N. Goltsov²

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

²School of Science, Engineering and Technology, Abertay University, Dundee, UK

@Corresponding author e-mail: appl.synergy@yandex.ru

Continuous energy supply, a necessary condition for life, excites a state far from thermodynamic equilibrium, in particular coherent electric polar vibrations depending on water ordering in the cell. The collective, low-frequency vibrational excitations in protein macromolecules in the terahertz frequency region are suggested to orchestrate many protein processes such as enzymatic activity, electron/energy transport, conformation transitions and others. The most significant type of excitations is long-lived coherent vibronic modes and waves which are either spreading over large protein subdomains or being localised states. Two possible mechanisms of the formation of collective dynamic modes in the form of Fröhlich collective mode and Davydov soliton were previously suggested. We developed a unified quantum-mechanics approach to describe conditions of the formation of Fröhlich vibronic state and Davydov soliton in alpha-helical protein molecules interacting with the environment. We distinguish three subsystems in the model, i.e., (i) oscillating peptide groups (PGs), interacting with (ii) the subsystem of side residuals of proteins, which in turn interacts with the environment (surrounding water), which is responsible for dissipation and fluctuation processes and modelled by a system of harmonic oscillators. It was shown that the equation of motion for dynamic variables of PG chain (phonon variables) can be transformed to the nonlinear Schrodinger equation for order parameters, which determines energy “pumping” due to protein interaction with a reservoir. Solution of the order parameter equation was shown to admit bifurcation into the solution corresponding to the formation of weak damped collective vibronic mode with growing amplitude. It was also shown that the solution corresponding to Davydov soliton can exist at certain boundary conditions in this bifurcation region.

The suggested mechanism of emergent of macroscopic dissipative structures in the form of collective vibronic modes in proteins is discussed in connection with recent experimental data on long-lived collective protein excitation in the terahertz frequency region

Keywords: alpha-helical protein, alpha-helical protein, Fröhlich condensation, autolocalization states, hydrogen bonds, phonon, dynamical regimes, soliton.

Введение

Непрерывное, эффективное снабжение энергией различных подсистем живых организмов и ее преобразование – необходимые условия функционирования живых систем. Энергия требуется для функционирования мембран и органелл, ионного разделения, формирования разностей электрических потенциалов и т.д. Благодаря подводимой к биосистемам энергии, в них формируются и поддерживаются далекие от термодинамического равновесия состояния. Кроме того, энергия, накопленная в колебательных системах, может служить источником межмолекулярных взаимодействий в биосистемах.

Вопрос о возможности существования длинноволновых квантовых когерентных состояний в биологических системах при физиологических температурах обсуждается в течение нескольких десятилетий. Важная роль в биосистемах определенных коллективных колебаний, возбужденных гораздо выше порога теплового равновесия, исследовалась Гербертом Фрелихом [1, 2].

В 1968 г. Фрелих предложил гипотетическую модель, согласно которой не вся энергия, передаваемая белку, термализуется, а белок можно описать как группу связанных осцилляторов, помещенных в термостат, которые оказываются в одинаковых энергетических состояниях с минимальной энергией. Это явление, близкое по своей природе к Бозе-Эйнштейновской конденсации в квантовых системах, получило название конденсации Фрелиха. При конденсации Фрелиха все молекулы в системе оказываются в основном колебательном состоянии, что может привести к когерентности всех колебаний в системе: все части макроскопического объекта будут вести себя как одно целое – «гигантский диполь».

Электрическая полярность – это свойство большинства биологических молекул, которые являются электрическими диполями и/или многополюсниками, а их колебания генерируют электромагнитное поле (ЭМП). Так, микротрубочки цитоскелета эукариотических клеток являются электрическими полярными структурами. Установлено [3–7], что характер таких колебаний в значительной степени определяется окружением молекулы и, в первую очередь, водой, из-за ее высокого содержания в клетке (приблизительно 70%). В воде под действием ЭМП формируются структурированные области, протяженность которых может составлять до 80–100 нм. Такие «слои» формируются вокруг структур с гидрофильными поверхностями, включая микротрубочки и митохондрии. Они могут иметь макроскопические размеры и обладать упругими свойствами подобно гелю. Нарушение взаимодействий клеток ткани из-за изменений когерентности в полярных колебаниях, как предполагается, может приводить к нарушению энергетического метаболизма и патологическим состояниям, например, митохондриальной дисфункции (эффект Варбурга), что ведет к развитию опухолевых клеток (либо фибробластов, связанных с раковыми клетками) [2–7]. С другой стороны, представления о коллективных возбуждениях в биомакромолекулах широко используются при исследовании одного из центральных вопросов биоэнергетики – выяснении причин высокой эффективности переноса энергии, электронов и протонов в пределах одной макромолекулы и между молекулами [8–10]. Теория солитонного транспорта энергии и зарядов в α -спиральных белках развита в работах А.С. Давыдова [8].

В настоящей статье рассматриваются некоторые теоретические представления о коллективных возбуждениях в альфа-спиральной белковой макромолекуле, взаимодействующей с окружающей средой. В макромолекуле выделяются две подсистемы: цепочка связанных водородными связями пептидных групп и подсистема связанных через альфа-углеродный атом с пептидными группами радикалов, входящих в состав аминокислотных остатков.

Целью работы является установление условий, при которых в результате взаимодействия колебаний молекул, входящих в состав биомолекулярной цепочки водородосвязанных пептидных групп между собой, а также с радикалами и окружением (резервуаром), в альфа-спиральной молекуле белка формируются конденсированные колебательные

состояния и солитоны. Такие коллективные возбуждения фононного (вибронного) типа могут служить для транспорта энергии и переноса заряженных частиц (электронов) в биологических системах при наличии экситон-фононного и/или электрон-фононного взаимодействия соответственно.

Альфа-спиральная структура белка

Как известно, белковые молекулы – самые сложные из всех молекул, входящих в состав клеток – включают сотни тысяч различных атомов. Вследствие этого у белков появляются новые коллективные свойства, присущие всей макромолекуле в целом и ее окружению. В белковых молекулах могут возникать звуковые волны (фононы) и другие элементарные коллективные возбуждения.

Одной из вторичных структур белка, образующейся при свертывании полипептидной цепи в спираль благодаря образованию водородных связей между пептидными группами, является альфа-спираль (рис. 1а, б). Взаимодействия между пептидными группами носят регулярный характер, обуславливая периодичность вторичной структуры. Стабильность альфа-спирали обеспечивается водородными связями между NH-группой и C=O-группой четвертого по счету аминокислотного остатка. Группы атомов NHCO (пептидные группы) образуют три регулярных цепочки водородных связей, направленных вдоль оси спирали. Альфа-спираль имеет вид стержня, внутренняя часть которого состоит из туго закрученной основной цепи, а радикалы направлены наружу. Распределение электрических зарядов на атомах, входящих в состав пептидной группы, таково, что каждая из них обладает электрическим дипольным моментом, равным примерно 3.5 Д и направленным вдоль водородной связи (рис. 1в) [8].

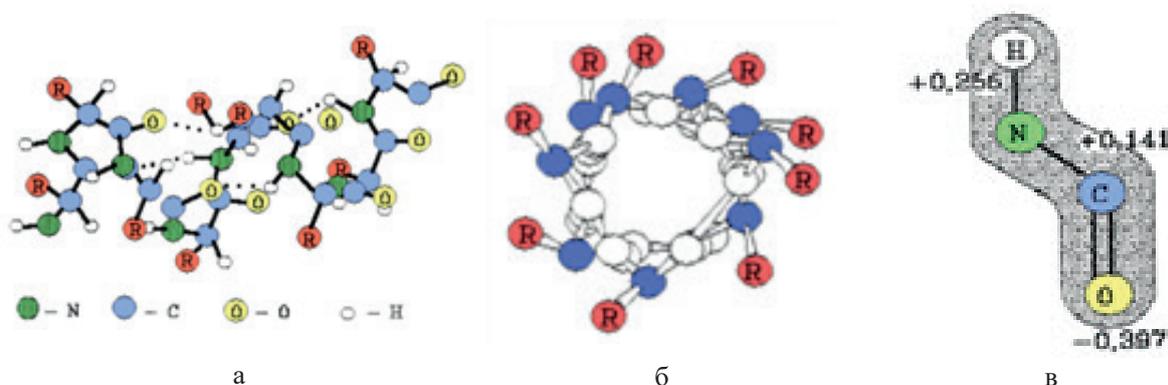


Рис. 1. Альфа-спиральная структура белка: а) модель правозакрученной альфа-спирали (точками обозначены водородные связи); б) альфа-спираль в поперечном разрезе (боковые цепи R располагаются снаружи спирали); в) распределение плотности электрического заряда около атомов пептидной группы (ПГ).

Фононы в одномерной квазипериодической цепочке водородосвязанных пептидных групп, взаимодействующих с радикалами

Рассмотрим одномерную цепочку связанных водородными связями пептидных групп (ПГ), допускающих внутреннее движение протона (Н) и остальной части атомов ПГ (NCO)



где троеточиями обозначены водородные связи.

Равновесные положения ПГ задаются вектором решетки $\mathbf{l} = l\mathbf{a}$ ($l = 0, 1, 2, \dots$), направленным вдоль оси z . Смещение атомов из равновесных положений в ПГ с вектором \mathbf{l} обозначим $\xi_{1,1}$ (для водорода Н) и $\xi_{1,2}$ (для остальных атомов, входящих в ПГ). В гармоническом приближении при учете взаимодействия атомов только соседних ПГ между собой и с ближайшим радикалом R потенциальная энергия выражается квадратичной формулой

$$U = \frac{1}{2} \sum_l [\chi_{1,2}(\xi_{1+1,1} - \xi_{1,2})^2 + \chi_{2,1}(\xi_{1,2} - \xi_{1,1})^2 + \chi_{0,1}(\xi_{1,1})^2 + \chi_{0,2}(\xi_{1,2})^2] \quad (2)$$

где $\chi_{1,2}, \chi_{2,1}, \chi_{0,1}$ и $\chi_{0,2}$ – приведенные жесткости водородной и валентной связей, а также жесткости взаимодействия протона и группы атомов NCO с подложкой, соответственно. В качестве граничных условий принимаем равенства

$$\xi_{1,\alpha} = \xi_{1+N\mathbf{a},\alpha}; \quad \alpha = 1, 2 \quad (3)$$

здесь N – число ПГ в цепочке водородных связей.

Квантовый оператор энергии цепочки водородосвязанных ПГ выразим через операторы рождения $b_{\mathbf{k},s}^+$ и уничтожения $b_{\mathbf{k},s}$ фононов, связанные с операторами смещения атомов из равновесных положений соотношением

$$\xi_{\alpha,1} = \sum_{\mathbf{k}} \left[\frac{\hbar}{2m_{\alpha}N\Omega_s(\mathbf{k})} \right]^{1/2} e^{i\mathbf{k}\mathbf{l}} (b_{\mathbf{k},s} + b_{-\mathbf{k},s}^+) \quad (4)$$

и удовлетворяющие перестановочным соотношениям

$$[b_{\mathbf{k},s}, b_{\mathbf{k}',s'}^+] = \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} \delta_{ss'}; \quad [b_{\mathbf{k},s}, b_{\mathbf{k}',s'}] = 0, \quad (5)$$

где δ – символ Кронекера;

\mathbf{k} – приведенный волновой вектор, принимающий N значений:

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi\eta}{Na^2} \cdot \mathbf{a}, \quad \eta = 0 \pm 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (6)$$

в первой зоне Бриллюэна. Индекс s указывает на принадлежность фононов к одной из двух (акустической ($s = 1$) или оптической ($s = 2$)) ветвей колебаний.

Оператор Гамильтона фононов цепочки ПГ в гармоническом приближении –

$$H_p = \sum_{\mathbf{k},s} \hbar\Omega_s(\mathbf{k}) (b_{\mathbf{k},s}^+ b_{\mathbf{k},s} + \frac{1}{2}). \quad (7)$$

Здесь две функции $\Omega_s(\mathbf{k})$ определяют частоты двух ветвей $s = 1, 2$ колебаний в цепочке водородосвязанных ПГ

$$\Omega_s^2(\mathbf{k}) = \left[A + (-1)^s \sqrt{A^2 - B(\mathbf{k})} \right] \quad (8)$$

где

$$A = [m_1 \chi_{0,2} + m_2 \chi_{0,1} + (m_1 + m_2) \cdot (\chi_{1,2} + \chi_{2,1})] / m_1 m_2$$

$$B = \left[(\chi_{0,1} + \chi_{0,2}) \cdot (\chi_{1,2} + \chi_{2,1}) + \chi_{0,1} \chi_{0,2} + 4 \chi_{1,2} \chi_{2,1} \cdot \sin^2 \frac{(\mathbf{k}, \mathbf{a})}{2} \right] / m_1 m_2$$

где m_1 – масса протона;

m_2 – масса NCO.

Дисперсионные кривые для исследуемой цепочки водородсвязанных ПГ при некоторых значениях констант жесткости показаны на рис. 2.

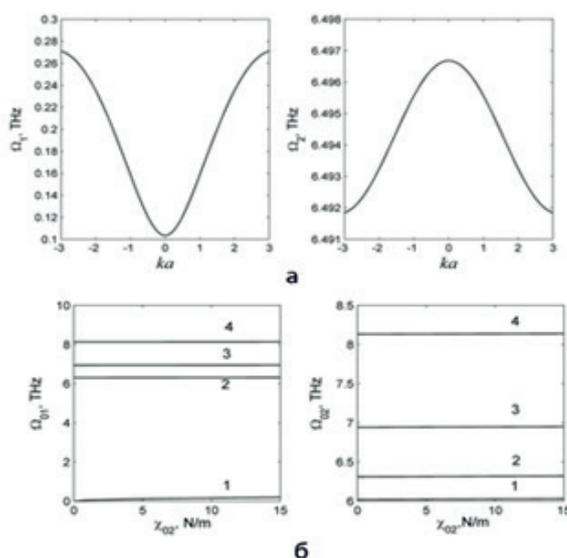


Рис. 2. Дисперсионные кривые для акустической и оптической ветвей колебаний в цепочке водородсвязанных пептидных групп, рассчитанные при следующих константах жесткости связей: $\chi_{1,2} = 13.0 \text{ Nm}^{-1}$; $\chi_{2,1} = 17.0 \text{ Nm}^{-1}$, $\chi_{0,1} = 5.0 \text{ Nm}^{-1}$, $\chi_{0,2} = 0 \text{ Nm}^{-1}$ [10] (а); зависимость частот $\Omega_s(\mathbf{k})$ $\Omega_{0s}(\mathbf{k}=0)$ от константы $\chi_{0,2}$: 0.0 Н/м (1); 3.0 Н/м (2); 10.0 Н/м (3); 25.0 Н/м (4) при фиксированных значениях других констант (б).

Аналогичным образом определим оператор энергии радикалов, входящих вместе с соответствующими ПГ в состав аминокислотных остатков, рассматривая их как систему N одинаковых осцилляторов с массой M и частотой собственных колебаний $\Omega_t(\mathbf{q})$

$$H_C = \sum_{\mathbf{q}, t} \hbar \Omega_t(\mathbf{q}) (c_{\mathbf{q}, t}^+ c_{\mathbf{q}, t} + \frac{1}{2}). \quad (9)$$

Здесь $c_{\mathbf{q}, t}^+$ и $c_{\mathbf{q}, t}$ – операторы рождения и уничтожения фононов в цепи радикалов, связанные со смещениями радикалов из равновесных положений ζ_1 , а $\Omega_t(\mathbf{q})$ – частоты фононов (типа t) в цепи радикалов.

Взаимодействие между фононами в цепочке ПГ и цепи радикалов альфа-спирального белка учтем, добавив к полной энергии невзаимодействующих цепочек ангармонический оператор

$$W = \sum_i V(\mathbf{l}) \zeta_{1,1}^i \zeta_{2,1}^i \quad (10)$$

где

$$\zeta_{1,1}^i = \sum_{\mathbf{q}} \left[\frac{\hbar}{2MN\Omega_i(\mathbf{q})} \right]^{1/2} e^{i\mathbf{q}\mathbf{l}} (c_{\mathbf{q},i} + c_{-\mathbf{q},i}^+). \quad (11)$$

Подставляя соотношения (4) и (11) в (10), получим оператор ангармонического возмущения в виде

$$W = \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} (V_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} c_{\mathbf{k}-\mathbf{k}'}^+ b_{\mathbf{k}}^+ b_{\mathbf{k}'} + \mathcal{E}C). \quad (12)$$

Здесь

$$V_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} = \left(\frac{\hbar^3}{8N^3 m_1 m_2 M \Omega_z(\mathbf{k}) \Omega_z(\mathbf{k}') \Omega_z(\mathbf{k} - \mathbf{k}')} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Матричные элементы оператора (13), отличные от нуля на функциях чисел заполнения, соответствуют процессам, которые происходят с сохранением энергии $\Omega_z(\mathbf{k} - \mathbf{k}') + \Omega_z(\mathbf{k}) = \Omega_z(\mathbf{k}')$ и импульса без учета процессов переброса.

Взаимодействие альфа-спирального белка с окружением (резервуаром)

Реалистическая модель динамики белковой макромолекулы должна учитывать взаимодействие ее с окружающей средой при отличной от нуля температуре и, в конечном счете, описывать диссипацию и флуктуации. Частицы окружающей среды действуют как резервуар, поддерживая необходимые для функционирования белка условия (в том числе и термодинамические). В нашей модели резервуар представляется набором большого числа гармонических осцилляторов, взаимодействующих с белковой макромолекулой. Большие системы, не состоящие из гармонических осцилляторов, обладают часто модами коллективных возбуждений, амплитуды которых ведут себя динамически подобно амплитудам осцилляторов. Предполагается, что осцилляторы резервуара имеют различные частоты $\omega_{\mathbf{p}}$. По аналогии с соотношениями (4) и (11), используем для описания динамики осцилляторов резервуара операторы рождения $B_{\mathbf{p},i}^+$ и уничтожения $B_{\mathbf{p},i}$ фононов с волновым вектором \mathbf{p} .

Оператор энергии резервуара включает суммарную энергию отдельных осцилляторов

$$H_B = \sum_{\mathbf{p}, i} \hbar \omega_{i'}(\mathbf{p}) (B_{\mathbf{p},i'}^+ B_{\mathbf{p},i'} + \frac{1}{2}) \quad (14)$$

и энергию W_B совместного действия осцилляторов резервуара на макромолекулу. Предполагается, что каждый из них вносит линейный вклад, взаимодействуя только с цепью радикалов альфа-спирального белка. Таким образом, мы считаем, что цепочка ПГ взаимодействует с окружением макромолекулы через радикалы R [3–7].

Оператор взаимодействия W_B получим в виде

$$W_B = \hbar \sum \left\{ \sigma_{t't'}(\mathbf{g}, \mathbf{p}) c_{\mathbf{g},t}^+ B_{\mathbf{p},t'} + \text{Э.С.} \right\} \quad (15)$$

Коэффициенты $\sigma_{t't'}(\mathbf{g}, \mathbf{p})$ определяют степень связи осцилляторов «резервуара» (типа t') с осцилляторами боковой цепи (типа t').

В дальнейшем с целью упрощения записи будем опускать индексы, определяющие тип фононов. В тех случаях, когда в формулах встречаются индексы s , t и t' , они означают только принадлежность данного параметра к цепочке ПГ, радикалов или резервуару соответственно. Оператор (15) может описывать широкий класс механизмов затухания, связанных с коллективными возбуждениями [10].

Уравнение Ланжевена для обобщенных координат макромолекулы

В данной работе рассматриваются теоретические представления о коллективных возбуждениях в альфа-спиральной белковой макромолекуле, взаимодействующей с окружающей средой при отличной от нуля температуре и с учетом диссипации и флуктуаций.

Как известно, все фундаментальные (микроскопические) уравнения движения частиц инвариантны по отношению к обращению времени, т.е. движение полностью обратимо. В исходных уравнениях не может фигурировать сила трения, которая нарушает указанную инвариантность. Однако при некоторых допущениях уравнения Ланжевена могут быть получены из уравнений Гейзенберга для системы, взаимодействующей с резервуаром, представляемым в виде набора осцилляторов [7, 8].

Оператор энергии системы представим в виде

$$H_S = H_p + H_B + H_{PB}, \quad (16)$$

$$\text{где } H_p = \sum_{\mathbf{k}} \varepsilon_{\mathbf{k}} b_{\mathbf{k}}^+ b_{\mathbf{k}} - \frac{N^2}{\hbar} \sum_{\mathbf{g}, \mathbf{k}, \mathbf{k}'} \frac{V_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}', \mathbf{g}}^*}{\Omega_t(\mathbf{g})} b_{\mathbf{k}}^+ b_{\mathbf{k}' - \mathbf{g}}^+ b_{\mathbf{k} - \mathbf{g}} b_{\mathbf{k}} \quad (17)$$

– оператор энергии протеина (белка), выраженный только через переменные цепочки водородных связей, а

$$\varepsilon_{\mathbf{k}} = \hbar \Omega_s(\mathbf{k}) - \frac{2N^3 |V|^2}{\hbar \Omega_t} . \quad (18)$$

Оператор Гамильтона для резервуара H_B имеет вид

$$H_B = \sum_{\mathbf{p}} \varepsilon_{\mathbf{p}} B_{\mathbf{p}}^+ B_{\mathbf{p}}, \quad (19)$$

где

$$\varepsilon_{\mathbf{p}} = \hbar \omega(\mathbf{p}) - \frac{\hbar N |\sigma|^2}{\Omega_t} \quad (20)$$

Энергия взаимодействия альфа-спирального белка с резервуаром H_{PB} после исключения переменных, относящихся к боковой цепи, определяется выражением

$$H_{PB} = -\sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}} \{G(\mathbf{k}, \mathbf{p}) b_{\mathbf{k}}^+ b_{\mathbf{k}-\mathbf{p}} B_{\mathbf{p}} + \text{ЭС}\} \quad (21)$$

где $G(\mathbf{k}, \mathbf{p}) = \frac{\sigma(\mathbf{k}, \mathbf{p}) V N}{\Omega_{\tau}}$. (22)

Уравнения движения для динамических переменных цепочки ПГ и резервуара получим с помощью уравнений Гейзенберга для операторов $A = A\{b_{\mathbf{k}}, b_{\mathbf{k}}^+, B_{\mathbf{p}}, B_{\mathbf{p}}^+\}$ и оператора Гамильтона (16) с учетом соотношений (17)–(22) в виде

$$i\hbar \dot{b}_{\mathbf{k}} = \varepsilon_{\mathbf{k}} b_{\mathbf{k}} - \frac{N^2}{\hbar} \sum_{\mathbf{g}, \mathbf{k}'} \frac{V_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}, \mathbf{g}}^*}{\Omega_{\tau}(\mathbf{g})} b_{\mathbf{k}'-\mathbf{g}}^+ b_{\mathbf{k}-\mathbf{g}} b_{\mathbf{k}'} - \sum_{\mathbf{p}} G(\mathbf{k}, \mathbf{p}) b_{\mathbf{k}-\mathbf{p}} B_{\mathbf{p}} \quad (23)$$

$$\text{и } i\hbar \dot{B}_{\mathbf{p}} = \varepsilon_{\mathbf{p}} B_{\mathbf{p}} - \sum_{\mathbf{k}} G^*(\mathbf{k}, \mathbf{p}) b_{\mathbf{k}-\mathbf{p}} b_{\mathbf{k}}^+. \quad (24)$$

Далее задача состоит в том, чтобы с помощью полученных уравнений вывести уравнения для мод, нарастающих до макроскопических значений и определяющих динамику системы в окрестности точки (точек) неустойчивости. Кроме того, необходимо определить диссипацию внутри системы и флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием белковой макромолекулы с внешним окружением, благодаря которым система может преодолевать порог неустойчивости и переходить в новые динамические состояния (режимы).

В нашей модели резервуар представляется набором большого числа гармонических осцилляторов, взаимодействующих с белковой макромолекулой. Предполагается, что рассматриваются взаимодействующие системы квантово-механических осцилляторов и осцилляторы резервуара имеют различные частоты $\omega_{\mathbf{p}}$. Однако даже при исследовании роли флуктуаций интересующая нас система может рассматриваться как классическая. В частности, это можно обосновать тем, что число фононов в сильно возбужденных модах, определяющих динамическое поведение белковой макромолекулы, а также число возбужденных осцилляторов «резервуара» (в каждой моде) при физиологических температурах значительно больше единицы. Это позволяет считать в дальнейшем фононные амплитуды c -числами. Для того, чтобы подчеркнуть это обстоятельство, заменим операторы $b_{\mathbf{k}}, b_{\mathbf{k}}^+, B_{\mathbf{p}}, B_{\mathbf{p}}^+$ в уравнениях (23)–(24) на c -числа $\beta_{\mathbf{k}}, \beta_{\mathbf{k}}^*, B_{\mathbf{p}}, B_{\mathbf{p}}^*$, соответственно. При этом амплитуды $\beta_{\mathbf{k}}(t)$ можно рассматривать как обобщенные координаты с соответствующими обобщенными импульсами $i\hbar \beta_{\mathbf{k}}^*$. Кроме того, будем полагать, что коэффициенты, определяющие интенсивности взаимодействия фононов различных подсистем, слабо зависят от импульсов фононов. С учетом сделанных замечаний уравнения (23)–(24) могут быть проинтегрированы как классические. В результате получено уравнение Ланжевена для фононных амплитуд:

$$\frac{\partial \beta_{\mathbf{k}}(t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} (\varepsilon_{\mathbf{k}} + e_{\mathbf{k}}) \beta_{\mathbf{k}} + \frac{iN^2 |V_{\mathbf{k}}|^2}{\hbar^2 \Omega_{\tau}} \sum_{\mathbf{g}, \mathbf{k}'} \beta_{\mathbf{k}-\mathbf{g}}(t) \beta_{\mathbf{k}'-\mathbf{g}}(t) \beta_{\mathbf{k}}^*(t) - \frac{1}{2} \lambda_{\mathbf{k}} \beta_{\mathbf{k}} + iF_{\mathbf{k}}(t) \quad (25)$$

здесь N – число ПГ в цепочке водородных связей;

а $\Omega_t(\mathbf{q})$ – частоты фононов (типа t) в цепи радикалов.

Кроме того:

$$\varepsilon_{\mathbf{k}} = \hbar\Omega_s(\mathbf{k}) - \frac{2N^3 |V|^2}{\hbar\Omega_t}, \quad (26)$$

где V характеризует энергию резервуара, включая суммарную энергию отдельных осцилляторов и энергию совместного действия осцилляторов резервуара на макромолекулу; величина $F_{\mathbf{k}}(t)$ определяет действие случайной силы.

Окружение биологических молекул в общем случае может представлять собой систему резервуаров, имеющих различные температуры. Для простоты изложения рассмотрен вариант с одним резервуаром, при том, что развиваемый подход можно обобщить на случай с несколькими резервуарами.

Коллективные возбуждения в альфа-спиральной молекуле белка, взаимодействующей с окружением

Исследованы возможные динамические режимы альфа-спирального белка (цепочки водородосвязанных ПГ) при различных параметрах внешней среды. В длинноволновом приближении исследованы уравнения для незатухающих мод, нарастающих до макроскопических значений и определяющих динамику системы в окрестности точки неустойчивости.

Уравнение для фононных мод в континуальном пределе имеет вид

$$i\hbar \frac{\partial \beta_s(z,t)}{\partial t} + \hbar a^2 I_s \frac{\partial^2 \beta_s(z,t)}{\partial z^2} - E_s \beta_s(z,t) + Q_s |\beta_s(z,t)|^2 \beta_s(z,t) = F_s(z,t), \quad (27)$$

где

$$E_s = \varepsilon_{0s} - e_{0s} - \frac{i\hbar\gamma_s}{2} = E_{s0} - \frac{i\hbar\gamma_s}{2} \text{ и } Q_s = \frac{N^2 |V_s|^2}{\Omega_t}$$

Решение этого уравнения может быть представлено в виде

$$\beta_s(z,t) = \Phi_s(\rho) \exp \left\{ i(q_s z - \omega_s t) - \frac{\gamma_s}{2} t \right\} \quad (28)$$

здесь $\rho = z - z_0 - V_s t$;

V_s – скорость перемещения возбуждения вдоль цепочки пептидных групп;

$\Phi_s(\rho)$ – вещественная амплитуда должна удовлетворять условию нормировки:

$$\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_s^2(\rho) d\rho = N_0$$

При условии малого затухания, когда флуктуации также малы, ими можно пренебречь, и уравнение для фононных мод принимает следующий вид:

$$\left[\Xi_s + \hbar a^2 I_s \frac{\partial^2}{\partial z^2} + Q_s |\Phi_s(\rho)|^2 \right] \Phi_s(\rho) = 0, \quad (29)$$

где Ξ_s – спектральный параметр, связанный с энергией фонона соотношением

$$\hbar \omega_s = \Xi_s + E_s + \hbar q^2 a^2 I_s \quad (30)$$

Это уравнение представляет собой нелинейное уравнение Шредингера и имеет решение в виде уединенной волны (солитона) (рис. 3):

$$\Phi(\rho) = \left\{ \frac{a \Theta_0 N_0}{2} \right\}^{1/2} \frac{1}{ch[\Theta_0(z - z_0 - V_{sol}t)]} \quad (31)$$

где z_0 – центр солитона;

V_{sol} – скорость солитона;

$$\Theta_0 = \frac{Q_s N_0}{4 \hbar a I_s}.$$

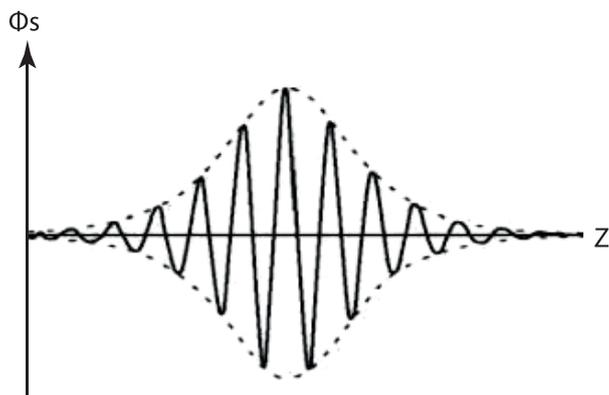


Рис. 3. Пространственно-временная структура типа уединенной волны – солитона (Давыдовский режим).

О первом экспериментальном наблюдении коллективных возбуждений (конденсации Фрѐлиха) в биологической системе сообщается в статье [11]. Авторы использовали методы рентгеновской кристаллографии в сочетании с терагерцовым излучением с частотой 0.4 ТГц для визуализации структурных изменений, связанных с низкочастотными коллективными колебаниями, индуцированными в кристалле белка лизоцима (рис. 4).

В эксперименте на образец периодически направляли импульсы ТГц-излучения, после чего, с помощью техники рентгеновской дифракции, фиксировалась атомарная структура кристалла (рис. 5).

Установлено, что, поглощая излучение с частотой 0.4 терагерц, молекулы белка в кристалле изменяют свое электронное состояние, а вместе с ним и строение. В частности, сжимается одна из α -спиралей лизоцима. При этом сжатое состояние сохраняется в образце от микро- до миллисекунд, что на 3–6 порядков дольше, чем если бы изменения

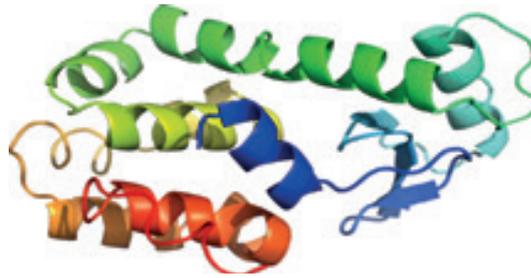


Рис. 4. Пространственная структура белка лизоцима, включающая несколько альфа-спиральных участков [<http://bigpictures.club/resize.php?img=http://scop.berkeley.edu/thumbs/2.06/ek/d4ekqa1/dl.png>]

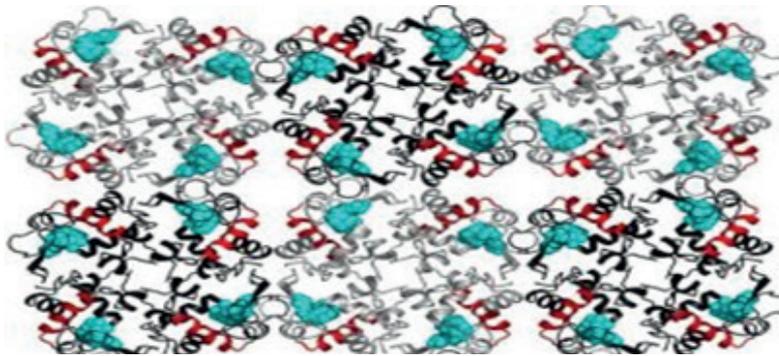


Рис. 5. Структура кристалла белка лизоцима.

в кристалле были вызваны тепловыми эффектами [12]. Эти исследования показывают, что длительность подобных структурных изменений можно объяснить только возникновением коллективных возбуждений – конденсации Фрёлиха и автолокализованных состояний.

Таким образом, данные результаты можно считать первыми доказательствами существования коллективных колебаний и/или солитонов в цепочках альфа-спиральной белковой структуры. Они указывают на то, что макроскопические квантовые эффекты имеют место в биологических системах. С возможностью образования «осциллирующих диполей» в молекулярной биологии связывают такие явления, как селективные силы, молекулярное узнавание и каталитическую активность белков-ферментов [13], а образование солитонов может приводить к переносу ими энергии (информации) и заряженных частиц (электронов) по α -спиральным белкам.

Заключение

Анализ решений уравнений для фононов в молекулярной структуре показывает, что они являются уравнениями для параметров порядка, допускающими возможность появления бифуркаций. При этом система может находиться в различных динамических режимах, которые определяются поведением параметров порядка. Переключение происходит при значениях внешних параметров, приводящих к изменению знака величины управляющего параметра λ_s , определяемого, в том числе, «накачкой» фононов в макромолекулу из резервуара.

Результаты проведенного теоретического исследования динамических свойств альфа-спирального белка, взаимодействующего с окружением, показывают, что неустойчивость, вызываемая изменением внешних параметров – свойств окружающей среды, может приводить к образованию новых макроскопических пространственно-временных структур системы. Совместное действие случайных и детерминированных сил приводит к переключению системы из исходных состояний в новые, характеризующиеся кооперативным поведением отдельных подсистем макромолекулы. В свою очередь, характер биологических функций, выполняемых белком, определяется динамическим состоянием (режимом) макромолекулы. Одним из условий такой самоорганизации является наличие нескольких подсистем в белковой молекуле – регулярных цепочек водородных связей и боковых радикалов цепи. В связи с этим внутри белковых макромолекул могут возникать устойчивые к тепловым колебаниям пространственно-временные структуры, в том числе и автолокализованные состояния, что подтверждается и результатами численного моделирования [10].

Список литературы / References:

1. Fröhlich H. The biological effects of microwaves and related questions // *Advances in Electronics and Electron Physics*. 1980. V. 53. P. 85–152.
2. Fröhlich H. Coherent electric vibrations in biological systems and cancer problem // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1978. V. 26. P. 613–617.
3. Warburg O., Posener K., Negelein E. Über den Stoffwechsel der Carcinomzelle // *Biochem. Z.* 1924. V. 152. P. 309–344.
4. Warburg O. On the origin of cancer cells // *Science*. 1956. V. 123. P. 309–314.
5. Pokorny J. Conditions for coherent vibrations in the cytoskeleton // *Bioelectrochem. Bioenerg.* 1999. V. 48(2). P. 267–271.
6. Turton D.A., Senn H.M., Harwood T., Laphorn A.J., Ellis E.M., Wynne K. Terahertz underdamped vibrational motion governs protein-ligand binding in solution // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. 3999. doi:10.1038/ncomms4999.
7. Pokorný J., Pokorný J., Foletti A., Kobilková J., Vrba J., Vrba J. Mitochondrial dysfunction and disturbed coherence: gate to cancer // *Pharmaceuticals*. 2015. V. 8. P. 675–695.
8. Давыдов А.С. Солитоны в молекулярных системах. Киев: Наукова думка, 1984. 288 с.
9. Davydov A.S. Solitons in molecular systems. Kiev: Naukova dumka, 1984. 288 p. (in Russ.)
10. Takeno S. Vibron solitons in one-dimensional molecular crystals // *Prog. Theor. Phys.* 1984. V. 71. № 2. P. 395–398.
11. Lupichev L.N., Savin A.V., Kadantsev V.N. *Synergetics of Molecular Systems*. Springer Int. Publ. Switzerland, 2015. VIII. 332 p.
12. Lundholm I.V., Rodilla H., Wahlgren W., Duelli A., Bourenkov G., Vukusic J., Friedman R., Stake J., Schneider T. Terahertz radiation induces non-thermal structural changes, associated with Fröhlich condensation in a protein crystal // *Structural Dynamics*. 2015. V. 2. P. 054702.
13. Saint-Blancard J., Clochard A., Cozzone P., Berthou J., Jolles P. The temperature-dependent structural transition of lysozyme A study of the Arrhenius plots // *Biochim. Biophys.*

Acta. 1977. V. 491(1). P. 354–356.

13. Borgia A., Borgia M.B., Bugge K., Kissling V.M., Heidarsson P.O., Fernandes C.B., Sottini A., Soranno A., Buholzer K.J., Nettels D., Kragelund B.B., Best R.B., Schuler B. Extreme disorder in an ultrahigh-affinity protein complex // Nature. 2018. March 1. V. 555. P. 61–66.

Об авторах:

Каданцев Василий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры биокрибернетических систем и технологий Института кибернетики ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Гольцов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, Школа науки, техники и технологии, Абертэй Университет, Данди, Великобритания.

About the authors:

Vasiliy N. Kadantsev, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Chair of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Alexey N. Goltsov, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), School of Science, Engineering and Technology, Abertay University, Dundee, UK.

УДК 621.315.5:548.55

РАСЧЕТ УПРУГОНАПРЯЖЕННОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В.Н. Светогоров^{1,@},
Р.Х. Акчурин¹,
А.А. Мармалюк²,
М.А. Ладугин²,
И.В. Яроцкая²

¹Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²ООО «Сигм плюс», Москва 117342, Россия

@Автор для переписки, e-mail: svetogorvlad@mail.ru

Выполнены расчеты составов эпитаксиальных слоев, формирующих низкоразмерные гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для лазерных диодов с длиной волны излучения 1.55 мкм. При проведении расчетов ставилась задача обеспечения максимальной высоты энергетических барьеров для эффективного ограничения носителей заряда в квантовых ямах. Наряду с эффектом размерного квантования энергии свободных носителей заряда в разрешенных зонах, учитывалось влияние упругих напряжений в эпитаксиальных слоях на смещение краев энергетических зон. Показано, что для решения поставленных задач необходимо формирование гетероструктур с напряжениями упругого сжатия в квантовой яме и напряжениями упругого растяжения в барьерных слоях. Предложена структура, включающая барьерный слой $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ толщиной 110 Å и квантовую яму $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ в слое толщиной 55 Å со степенями рассогласования параметров кристаллической решетки с подложкой InP –0.8% и +1.4%, соответственно. По результатам расчетной оценки, указанные толщины эпитаксиальных слоев не превышают критических значений, способных привести к образованию дислокаций несоответствия на гетерограницах.

Ключевые слова: лазерные диоды, квантовая яма, $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, механические напряжения, уровни размерного квантования.

CALCULATION OF ELASTICALLY STRESSED QUANTUM WELLS
HETEROSTRUCTURE $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ FOR EFFICIENT
DIODE LASERS

V.N. Svetogorov^{1,@},
R.Kh. Akchurin¹,
A.A. Marmalyuk²,
M.A. Ladugin²,
I.V. Yarotskaya²

¹Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

²JSC “Sigm Plyus”, Moscow 117342, Russia

@Corresponding author e-mail: svetogorvlad@mail.ru

The compositions of epitaxial layers forming quantum-well heterostructures $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ for laser diodes with the radiation wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ are calculated. When carrying out the calculations, the problem was to provide the maximum height of the energy barriers for effective limitation of charge carriers in the quantum wells. Along with taking care of the effects of the dimensional quantization of the energy of free charge carriers in allowed zones, the effect of elastic stress in epitaxial layers on the displacement of the edges of the energy bands were taken into account in the calculation.

It is shown that in order to solve the posed problems it is necessary to form heterostructures with elastic compression stress in a quantum well and elastic tensile stress in the barrier layers. As a result of the calculations the authors suggest a structure that includes a barrier layer of $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ with a thickness of 110 \AA and a quantum well $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ in a layer with a thickness of 55 \AA (with the mismatch between the parameters of the crystal lattice and the InP substrate – 0.8% and + 1.4 %, respectively). According to the calculation results, the indicated thicknesses of epitaxial layers do not exceed the critical values that can lead to the formation of imperfect dislocations at heterointerfaces.

Keywords: laser diodes, quantum well, $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, mechanical stress, dimensional quantization levels.

Введение

Лазерные диоды с длиной волны $1.55 \mu\text{m}$ на основе гетероструктур (ГС) $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$, используемые в настоящее время в волоконно-оптических линиях связи, весьма чувствительны к изменениям рабочей температуры. Это связано с относительно малой величиной энергетического барьера для электронов в квантовых ямах (КЯ) из-за небольшой величины разрыва зоны проводимости ($\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$) на границе с барьерными слоями [1, 2]. Разработка альтернативных четырехкомпонентных ГС для указанных лазеров, способных работать при повышенных температурах без термоэлектрического охлаждения, диктует необходимость поиска новых полупроводниковых композиций. Одним из вариантов таких композиций являются ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с упругонапряженными КЯ, характеризующиеся существенно бóльшим значением разрыва зоны проводимости ($\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$) [2]. Благодаря большой глубине потенциальной ямы для электронов, рассматриваемая ГС становится наиболее перспективной для реализации приборов с повышенной температурной стабильностью порогового тока лазерной генерации. Возможность изготовления механически сильнонапряженных эпитаксиальных слоев в таких структурах с различием параметров кристаллических решеток вплоть до 1.5% позволяет дополнительно улучшить рабочие характеристики лазерных диодов [3]. Установлено, что лазерные диоды с ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ способны достигать значения порогового тока 20 mA [4–7]. В ГС с КЯ $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ со степенью рассогласования +1% значение порогового тока равнялось 25 mA [7]. Аналогичная ГС со степенью рассогласования +1.37% и степенью рассогласования в барьерных слоях –0.6% обладала значением порогового тока 20 mA [5], что объясняют влиянием упругих напряжений, вызванных рассогласованием параметров решеток на рабочие характеристики. Следует также отметить, что в ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженными слоями легче регулировать величину энергетического зазора в КЯ при той же величине вводимых напряжений, чем в ГС $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$, благодаря малой разнице параметров кристаллической решетки GaAs и AlAs (около 0.12%).

Цель данной работы – расчет составов эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, формирующих упругонапряженные слои КЯ, и барьерных слоев (БС) в лазерных диодах с длиной волны излучения 1.55 мкм, с учетом эффекта размерного квантования энергии свободных носителей заряда и влияния упругих напряжений на смещение краев энергетических зон.

В связи с влиянием инверсии населенности носителей заряда расчет был ориентирован на длину волны излучения 1.53 мкм (величина оптического перехода 0.81 эВ). Необходимым условием при этом являлось обеспечение максимальной высоты энергетических барьеров для эффективного ограничения носителей заряда в КЯ и неперевышение в сопрягаемых слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, наращиваемых на подложки InP, критических напряжений, способных привести к образованию дислокаций несоответствия на гетерограницах.

Методика расчета

Основные параметры эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ рассчитывали по правилу Вегарда:

$$\text{par}_{\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}} = x \times \text{par}_{\text{AlAs}} + y \times \text{par}_{\text{GaAs}} \times (1 - x - y) \times \text{par}_{\text{InAs}} \quad (1)$$

Расчет составов твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ с задаваемой степенью рассогласования параметров решетки с подложкой InP проводили с использованием зависимости, характерной для твердого раствора типа $\text{A}_x\text{B}_y\text{C}_{1-x-y}\text{D}$ [8]:

$$y = A_0 + B_0 \times x \quad (2)$$

Граничные результаты расчета относятся к двум тройным твердым растворам $\text{Ga}_w\text{In}_{1-w}\text{As}$ и $\text{Al}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$, определяющим анализируемый твердый раствор. Из (2) следует, что коэффициент A_0 равен мольной доле GaAs в твердом растворе $\text{Ga}_w\text{In}_{1-w}\text{As}$, а коэффициент $B_0 = \frac{-A_0}{z}$, где z – мольная доля AlAs в твердом растворе $\text{Al}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$.

С учетом возрастания пластичности материала с температурой, оценку критических толщин эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, наращиваемых на подложку InP, осуществляли для температуры роста слоев с использованием уравнения Мэттьюса-Блэкли [9]:

$$\frac{h_c}{b} = \frac{(1 - 0.25 \times \nu)}{4 \times \pi \times (1 + \nu) \times \Delta a} \times \ln\left(\frac{h_c}{b} + 1\right), \quad (3)$$

где $\nu = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{11}}$ – коэффициент Пуассона;

b – вектор Бюргерса, равный $\frac{a}{\sqrt{2}}$ для 60° -дислокаций с учетом направления роста 100;

Δa – степень рассогласования;

h_c – критическая толщина слоя.

Параметры кристаллической решетки подложки и эпитаксиального слоя при температуре роста рассчитывали с учетом соответствующих коэффициентов термического расширения (КТР) [10]:

$$a_T = a_{T_k} + \alpha_T \times a_{T_r} \times (T - T_k), \quad (4)$$

где a_T и a_{T_k} – параметры решетки при температуре роста (T) и комнатной температуре (T_k), соответственно;

α_T – КТР при температуре роста.

В расчетах принимали $T = 903$ К [11]. В отсутствие данных по α_T необходимые значения получали решением многочлена Лагранжа II степени:

$$\alpha_T = \left(\frac{T - T_1}{T_0 - T_1} \right) \times \left(\frac{T - T_2}{T_0 - T_2} \right) \times \alpha_{T_0} + \left(\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \right) \times \left(\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} \right) \times \alpha_{T_1} + \left(\frac{T - T_0}{T_2 - T_0} \right) \times \left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \right) \times \alpha_{T_2} \quad (5)$$

где T_0, T_1, T_2 – значения температур, для которых соответствующие им значения α находили по имеющимся в литературе графическим зависимостям [12–14].

Для учета возрастания пластичности материала при температуре роста рассчитывали изменение констант упругости (C_{ij}) с температурой, применяя уравнение [15]:

$$\frac{C_{ij}}{C_{ijk}} = \exp \left(-\delta_{ij} \times \beta \times (T - T_K) \times \left(1 + \frac{\delta_{ij} \times \beta \times (T - T_K)}{2} + \frac{\delta_{ij}^2 \times \beta^2 \times (T - T_K)^2}{3} \right) \right), \quad (6)$$

где C_{ijk} – константы упругости при комнатной температуре;

$\beta = 3 \times \alpha_T$ – объемный коэффициент термического расширения при комнатной температуре;

δ_{ij} – параметр Андерсона-Грюнайтца, в первом приближении для данного расчета принимали равным 3 для всех полупроводниковых соединений [16].

Интервал значений состава твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ с $E_g = 0.81$ эВ определяли по зависимости [17]:

$$E_g^{\text{Тк}} = 0.359 + 2.093 \times x + 0.629 \times y + 0.577 \times x^2 + 0.436 \times y^2 + 1.013 \times x \times y - 2 \times x \times y \times (1 - x - y) \quad (7)$$

Изменения энергетического положения зоны проводимости ΔE^e и валентной зоны тяжелых дырок ΔE^{hh} , вызванные упругими напряжениями, рассчитывали в соответствии с [18]:

$$\Delta E^e = 2 \times a \times \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \times \Delta a \quad (8)$$

$$\Delta E^{hh} = -b \times \left(1 + 2 \times \frac{C_{12}}{C_{11}} \right) \times \Delta a, \quad (9)$$

где a – гидростатический деформационный потенциал для запрещенной зоны;

b – сдвиговой деформационный потенциал.

Учет эффекта размерного квантования проводили для рабочей температуры лазерного диода (300 К). Уровни размерного квантования (ε) в потенциальных ямах вычисляли согласно трансцендентному уравнению [18]:

$$\pm \left(\sqrt{\frac{m_{qw}}{m_{bar}} \times (U - \varepsilon)} \right)^{\pm 1} = \text{tg} \left(\sqrt{\frac{m_{qw} \times \varepsilon}{2}} \times \frac{L}{\hbar} \right), \quad (10)$$

где m_{qw} и m_{bar} – эффективные массы частиц в КЯ и барьере, соответственно;
 L – ширина КЯ.

Энергию оптического перехода в данной упругонапряженной КЯ рассчитывали по формуле:

$$h\nu = E_g^{qw} + \Delta E^c + \Delta E^{hh} + \varepsilon_e + \varepsilon_{hh}. \quad (11)$$

U – величины потенциальных барьеров – определяли по формулам:

$$U_e = (1-Q) \times (E_g^{bar} - E_g^{eff_{hh}}); \quad (12)$$

$$U_{hh} = Q \times (E_g^{bar} - E_g^{eff_{hh}}), \quad (13)$$

где E_g^{qw} и E_g^{bar} – ширина запрещенных зон ненапряженных КЯ и барьера;

Q – относительный разрыв валентной зоны для тяжелых дырок.

Справочные значения, использованные при расчете, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физические параметры InP, GaAs, InAs и AlAs, использованные в расчетах [7, 9, 13]

T = 300 K	InP	GaAs	InAs	AlAs
a [Å]	5.8687	5.6533	6.0583	5.6614
$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	4.60	5.73	4.52	4.28
$C_{11} \cdot 10^{10}$ [H/M ²]		5.38	4.53	5.72
$C_{12} \cdot 10^{10}$ [H/M ²]		0.34	0.38	0.28
m_{el}/m_0		0.067	0.024	0.124
m_{hh}/m_0		0.55	0.36	0.81
a [эВ]		-7.17	-5.08	-5.64
b [эВ]		-1.7	-1.8	-1.5

Результаты и их обсуждение

Интервалы значений составов твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ для различных степеней рассогласования параметров решетки с подложкой InP в интервале от -1.5% до +1.5%, рассчитанные с использованием уравнений (2), (4) и (5), и составы твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ с $E_g = 0.81$ эВ (300 К), полученные по уравнению (7), приведены на рис. 1. Искомые значения составов находятся на пересечении приведенных зависимостей.

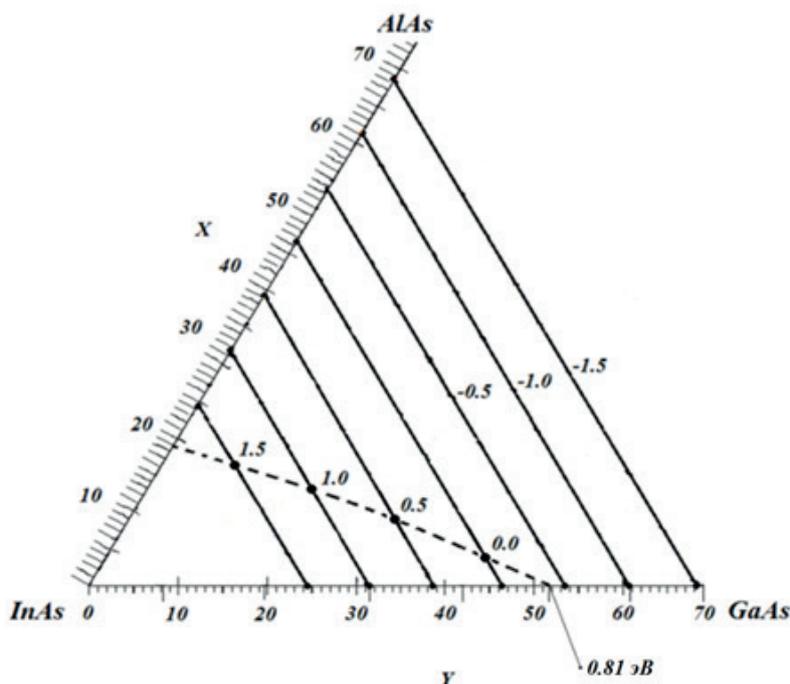


Рис. 1. Расчетная концентрационная зависимость степени рассогласования параметров решетки твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ с подложкой InP (сплошные линии) и составы, отвечающие $E_g = 0.81$ эВ (штриховая линия).

Результаты расчета показывают, что для объемного твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ значения $E_g = 0.81$ эВ могут быть достигнуты в интервале составов, отвечающих значениям $\Delta a/a$ примерно от 0 до +1.5%. При формировании ГС с КЯ необходима корректировка составов с учетом изменений, вносимых в зонную структуру упругими напряжениями и квантоворазмерными эффектами.

Необходимость исключения образования дислокаций несоответствия на гетерограницах требует расчетной оценки критических толщин эпитаксиальных слоев $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ с разной степенью решеточного рассогласования с InP. Требуемые для этого расчетные значения параметров кристаллической решетки исходных соединений, полученные с использованием скорректированных для $T = 903$ К значений КТР, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Рассчитанные значения параметров решетки и КТР для $T = 903$ К

$T = 903$ К	InP	GaAs	InAs	AlAs
$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	7.40	7.20	6.21	5.88
a [Å]	5.8949	5.6778	6.0810	5.6815

Результаты расчета критических толщин эпитаксиальных слоев показали, что для составов с $\Delta a = 1.5\%$ величина h_c составляет около 54.3 \AA , что в первом приближении определяет предельную толщину слоев, образующих КЯ. Для устранения эффекта туннелирования толщина барьерного слоя (БС) принималась равной 110 \AA . Расчет состава такого слоя проводился с учетом необходимости обеспечения максимальной высоты энергетического барьера, избегая при этом образования дислокаций несоответствия. Кроме требований максимального напряжения, вызванного несогласованием параметров решеток, и отсутствия дислокаций, существует несколько условий для качественного барьерного слоя. Недостатком всех алюминийсодержащих полупроводниковых лазеров является сродство алюминия к кислороду. Повышение концентрации кислорода провоцирует высокую скорость поверхностной рекомбинации, приводит к низкой мощности и структурному несовершенству, увеличению значения порогового тока. Основное предположение о влиянии кислорода состоит в том, что кислород, как атом примеси, приводит к сильному увеличению безызлучательной рекомбинации электронов и дырок. Это провоцирует большой ток неосновных носителей заряда, так называемый ток утечки, что дает в результате более высокое значение порогового тока.

Зададим значение ширины запрещенной зоны, равное 1.24 эВ , и соотнесем его с составом барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$. По результатам расчета, требуемым условиям отвечает состав $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$, имеющий степень несогласования решетки с подложкой $\text{InP } \Delta a = -0.8\%$.

Стоит отметить, что результаты, приведенные на рис. 1, получены для объемного материала. При росте упругонапряженных квантоворазмерных слоев под действием эффекта размерного квантования и энергетических сдвигов зоны проводимости и валентной зоны происходит увеличение величины оптического перехода, что следует из уравнений (8) и (9). Высказанное предположение подтверждается при подстановке полученных результатов в формулы (8)–(14). Результат представлен в табл. 3.

Таблица 3. Рассчитанные значения энергии оптического перехода и соответствующей длины волны при различных степенях несогласования параметра решетки КЯ с подложкой InP

Δa БС, %	Δa КЯ, %	ΔE , эВ	λ , мкм
-0.8	0.5	0.962	1.289
-0.8	1.0	0.969	1.280
-0.8	1.5	0.976	1.271

Из расчета величины оптического перехода выявлено, что при уменьшении мольной доли AlAs и увеличении мольной доли GaAs происходит уменьшение величины оптического перехода и, соответственно, увеличение длины волны излучения. С учетом данной тенденции проведена корректировка расчетов состава квантовой ямы $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ для искомой длины волны излучения. На рис. 2 показаны составы, отвечающие $\Delta E = 0.81 \text{ эВ}$, с учетом вышеуказанных эффектов. Видно, что необходимым значениям энергии оптического перехода отвечают составы эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, у которых степень несогласования параметра решетки с подложкой InP составляет $1.3\text{--}1.5\%$.

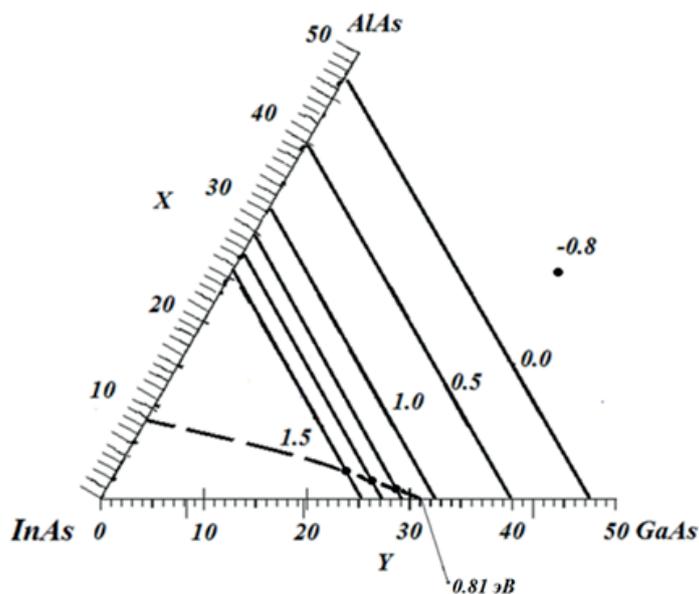


Рис. 2. Составы эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$, отвечающие $\Delta E = 0.81$ эВ (штриховая линия), скорректированные с учетом влияния упругих напряжений и квантоворазмерных эффектов.

Повторная оценка критических толщин эпитаксиальных слоев для скорректированных составов $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ дала результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4. Расчетные значения критических толщин эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ для различных степеней рассогласования с подложкой InP

Δa БС, %	Δa КЯ, %	h_c , Å
-0.8	1.3	62.3
-0.8	1.4	60.7
-0.8	1.5	53.8

По результатам расчета видно, что для скорректированного состава слоев с $\Delta a = 1.5\%$ критическая толщина уменьшилась до 53.8 \AA , что меньше ранее принятой толщины слоя КЯ (55 \AA). Исходя из этого, в качестве материала КЯ выбран состав $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$, отвечающий условию $\Delta E = 0.81$ эВ и характеризующийся величиной $\Delta a = 1.4\%$.

Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что предъявляемым требованиям отвечает ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с БС $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ и КЯ состава $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ с толщинами слоев 110 и 55 \AA , соответственно.

Заключение

С учетом эффектов размерного квантования энергии свободных носителей заряда в разрешенных зонах и влияния упругих напряжений на смещение краев энергетических зон выполнен расчет составов эпитаксиальных слоев квантоворазмерной гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для лазерных диодов с длиной волны излучения 1.55 мкм . Расчет составов проводили для степеней рассогласования параметров кристаллической решетки эпитаксиальных слоев с подложкой InP в интервале от -1.5% до $+1.5\%$ при температуре роста с целью нахождения параметров, обеспечивающих максимальную высоту энерги-

ческих барьеров для КЯ. По результатам расчетов предложена структура, включающая барьерный слой $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.30}\text{In}_{0.42}\text{As}$ (степень рассогласования -0.8%) толщиной 110 \AA и КЯ $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.74}\text{As}$ (степень рассогласования $+1.4\%$) в слое толщиной 55 \AA . Оценка критических толщин образования дислокаций в слоях рассчитанного состава, произведенная по модели Мэтьюса-Блэкли, показала, что для барьерного слоя и КЯ они составляют 125 \AA и 61 \AA , соответственно. Толщины соответствующих эпитаксиальных слоев в предложенной структуре не превышают полученных значений.

Литература / References:

1. Qing K., Shaoyang T., Dan L., Ruikang Z., Wei W., Chen J. High power 1550 nm InGaAsP/InP lasers with optimized carrier injection efficiency // Proceed. of the 14th Int. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOON). Nanjing, China. July 3, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2015. P. 1–3.
2. Kuo Y.K., Yen S.H., Yao M.W., Chen M.L., Liou B.T. Numerical study on gain and optical properties of AlGaInAs, InGaAs, and InGaAsP material systems for 1.3- μm semiconductor lasers // Optic Commun. 2007. V. 275. P. 156–164.
3. Gladyshev A.G., Novikov I.I., Karachinsky L.Y., Denisov D.V., Egorov A.Y., Kurochkin A.S., Blokhin S.A., Blokhin A.A., Nadtochiy A.M. Optical properties of InGaAs/InGaAlAs quantum wells for the 1520–1580 nm spectral range // Semiconductors. 2016. V. 50. № 9. P. 1186–1190.
4. Veselov D.A., Shashkin I.S., Bakhalov K.V., Lyutetskiy A.V., Pikhtin N.A., Rastegaeva M.G., Slipchenko S.O., Bechvay E.A., Strelets V.A., Shamakhov V.V., Tarasov I.S. On the problem of internal optical loss and current leakage in laser heterostructures based on AlGaInAs/InP solid solution // Semiconductors. 2016. V. 50. № 9. P. 1225–1230.
5. Liou B.T., Yen S.H., Yao M.W., Chen M.L., Kuo Y., Chang S.H. Numerical study for 1.55- μm AlGaInAs/InP semiconductor lasers // Proceed. of SPIE. 2006. V. 6368. 636814. doi: 10.1117/12.685959
6. Hou L., Avrutin E.A., Haji M., Dylewicz R., Bryce A.C., Mars J.H. 160 GHz passively mode-locked AlGaInAs 1.55 μm strained quantum-well lasers with deeply etched intracavity mirrors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2013. V. 19. № 4.
7. Takemasa K., Munakata T., Kobayashi M., Wada H., Kamijoh T. 1.3- μm AlGaInAs–AlGaInAs strained multiple-quantum-well lasers with a p-AlInAs electron stopper layer // IEEE Photonics Technology Lett. 1998. V. 10. № 4. P. 495–497.
8. Springer Handbook of Electronic and Photonic materials / Eds. S. Kasap, P. Capper. Springer Science+Business Media, Inc., 2006. 1438 p.
9. Jia H., Yin J., Zhu T., Rao L. Study of strain-compensated for 1310 nm AlGaInAs/InP multi-quantum-well laser // Proceed. of the 15th Int. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOON 2016). Hangzhou, China. September 24–27, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2016. P. 760–763.
10. Vurgaftman I., Meyer J.R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. № 11. P. 5916–5875.
11. Яковлева Н.И., Болтарь К.О., Седнев М.В. Исследование фотодиодных лавинных элементов матричных фотоприемных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 374–382.

Yakovleva N.I., Boltar K.O., Sednev M.V. Investigations of ADP FPA photodiodes formed in InGaAs heterostructures // *Uspekhi prikladnoi fiziki (Advances in Applied Physics)*. 2014. V. 2. № 4. P. 374–382. (in Russ.).

12. Soma T., Satoh J., Matsuo H. Thermal expansion coefficient of GaAs and InP // *Solid State Commun.* 1982. V. 42. № 12. P. 889–892.

13. Adhikari J., Kumar A. Study of structural and thermodynamic properties of GaAs and InAs using Monte Carlo simulations // *Molecular Simulation*. 2007. V. 33(8). P. 623–628.

14. Adachi S. GaAs, AlAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: Material parameters for use in research and device applications // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58(3). P. 1–29.

15. Liu Q., He Q. Elastic constants for various classes of solids at high temperature // *Acta Physica Polonica. Series A*. 2007. V. 112. № 1. P. 69–76. doi: 10.12693/APhysPolA.112.69

16. Ledbetter H.M., Reed R.P. Elastic properties of metals and alloys. Naval Research Laboratory, Colorado, 1973.

17. Zhang Y., Ning Y., Zhang L., Zhang J., Zhang J., Wang Z., Zhang J., Zeng Y., Wang L. Design and comparison of GaAs, GaAsP and InGaAlAs quantum-well active regions for 808-nm VCSELs. // *Optics Express*. 2011. V. 19. № 13. P. 12569–12581.

18. Максимов М.В., Крестников И.Л., Иванов С.В., Леденцов Н.Н., Сорокин С.В. Расчет уровней размерного квантования в напряженных ZnCdSe/ZnSe квантовых ямах // *Физика и техника полупроводников*. 1997. Т. 31. № 8. P. 939–943.

Maksimov M.V., Krestnikov I.L., Ivanov S.V., Ledentsov N.N., Sorokin S.V. Calculation of the size-quantization levels in strained ZnCdSe/ZnSe quantum wells // *Semiconductors*. 1997. V. 31. № 8. P. 800–803.

Об авторах:

Светогоров Владимир Николаевич, аспирант кафедры материаловедения и технологии функциональных материалов и структур Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119435, Россия, Москва, улица Малая Пироговская, д. 1).

Акчурин Рауф Хамзинович, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии функциональных материалов и структур Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119435, Россия, Москва, улица Малая Пироговская, д. 1).

Мармалюк Александр Анатольевич, доктор технических наук, заместитель директора по науке ООО «Сигм плюс» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Россия, Москва, улица Введенского, д. 3).

Ладугин Максим Анатольевич, кандидат технических наук, технический директор ООО «Сигм плюс» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Россия, Москва, улица Введенского, д. 3).

Яроцкая Ирина Валентиновна, кандидат технических наук, инженер-технолог ООО «Сигм плюс» им. М.Ф. Стельмаха (117342, Россия, Москва, улица Введенского, д. 3).

About the authors:

Vladimir N. Svetogorov, Postgraduate Student, Chair of Material Science and Technology of Functional Materials and Structures, M. V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (1, Malaya Pirogovskaya St., Moscow 119435, Russia).

Rauf Kh. Akchurin, Dr. Sc. (Engineering), Professor of Chair of Material Science and Technology of Functional Materials and Structures, M. V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (1, Malaya Pirogovskaya St., Moscow 119435, Russia).

Alexander A. Marmalyuk, Dr. Sc. (Engineering), Deputy manager in science, JSC «Sigm Plyus» (3, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia).

Maxim A. Ladugin, Candidate of Engineering Sciences, Technical manager, JSC «Sigm Plyus» (3, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia).

Irina V. Yarotskaya, Candidate of Engineering Sciences, Manufacturing engineer, JSC «Sigm Plyus» (3, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia).

УДК 538.958

ТЕОРИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТОВ

**А.Н. Юрасов^{1,@},
М.М. Яшин²**

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

@Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Методы эффективной среды применяются для описания оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов, представляющих собой неоднородные структуры, в которых металлические гранулы помещены в матрицу полупроводника или диэлектрика. В подобных структурах возможно существование гигантского и туннельного магнито-сопротивления, гигантского аномального эффекта Холла, большой магнитооптической активности, аномального оптического поглощения. Существует несколько методов описания эффективной среды нанокompозита. Основным приближением в случае малой концентрации металлической компоненты (в нашем случае она составляет 7%) является использованный нами метод эффективной среды Максвелла-Гарнетта, который описывает структуру через эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} . Для средних концентраций применяется приближение Бруггемана; в случае произвольных концентраций хорошо работает симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта. В статье исследована спектральная зависимость диэлектрической проницаемости образца нанокompозита в ближней ИК-области спектра. С помощью формул Френеля построены спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания p -поляризованного света. Обнаружены и обсуждены особые точки приведенных спектральных зависимостей при λ , равных 1 и 4 мкм. Определен состав нанокompозита (Cu+Si), для которого наблюдается хорошее качественное и количественное согласие экспериментальных и модельных зависимостей. Проведенный в статье анализ позволяет прогнозировать оптические свойства любого нанокompозита, что важно для выбора материалов с заданными свойствами. Обсуждены возможности использования нанокompозитов.

Ключевые слова: магнитооптика, нанокompозиты, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, формулы Френеля, условие Вульфа-Брэгга, угол Брюстера.

THE EFFECTIVE MEDIUM THEORY AS A TOOL FOR ANALYZING THE OPTICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITES

**A.N. Yurasov^{1,@},
M.M. Yashin²**

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

@Corresponding author e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

The spectral dependence of the dielectric permittivity of a nanocomposite sample in the near-IR range was investigated. Nanocomposites are inhomogeneous structures in which metal granules are placed in a semiconductor or dielectric matrix. Methods of effective medium are used to describe the optical and magneto-optical properties of nanocomposites. In such structures the existence of giant and tunnel magnetoresistance, giant anomalous Hall effect, large magneto-optical activity and anomalous optical absorption is possible. These effects are of both fundamental and practical interest. Using the Fresnel formula, the spectral dependences of the reflection and transmission coefficients of p-polarized light were constructed. The singular points of the given spectral dependences at $\lambda = 1$ and $4 \mu\text{m}$ were found and discussed. The composition of the nanocomposite (Cu + Si) was determined. The model spectral dependences of the dielectric constant for this nanocomposite were constructed. A good qualitative and quantitative agreement of the experimental and model spectral dependences was observed. The dielectric permittivity values for Cu + Si nanocomposite were calculated by the Maxwell-Garnett method. To date, there are several methods for describing the effective environment of a nanocomposite. The main approximation in the case of a small concentration of the metal component is the Maxwell-Garnett effective medium method, which describes the structure by means of the effective dielectric constant ϵ_{eff} . For medium concentrations the approach of Bruggeman is used. In the case of arbitrary concentrations, the symmetrized Maxwell-Garnett approximation works well. Since the concentration of the metal component was determined in our work, which is 7%, the method of Maxwell-Garnett effective medium method was chosen. The analysis carried out in the article makes it possible to predict the optical properties of any nanocomposite, which is important for the selection of materials with specified properties. The possibilities of using nanocomposites are discussed.

Keywords: magnetooptics, nanocomposites, dielectric permittivity, reflection coefficient, Fresnel formulas, Wolf-Bragg condition, Brewster angle.

В настоящее время весьма актуальны исследования оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов [1–4]. Нанокompозитами называются такие неоднородные структуры, в которых металлические гранулы помещены в матрицу полупроводника или диэлектрика. Для описания оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов применяются методы эффективной среды [5–8]. В подобных структурах возможно существование гигантского и туннельного магнитосопротивления, гигантского аномального эффекта Холла, большой магнитооптической активности, аномального оптического поглощения [9–11] и пр. Указанные эффекты представляют фундаментальный и практический интерес.

Цель работы – моделирование оптических свойств любых нанокompозитов методами эффективной среды. Для наглядности дано сравнение модельных и экспериментальных результатов [12–15] для нанокompозитов Cu–Si. Первоначально представлены экспериментальные данные по оптическим свойствам нанокompозитов Cu–Si, а затем обсуждены различные возможности их интерпретации в рамках теории эффективной среды.

В результате стандартных оптических измерений, подробно описанных в работе [3], получены спектральные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ исследуемого образца (нанокompозита Cu–Si) в ИК-диапазоне электромагнитного излучения, которым обладают, например, галогенные и ксеноновые лампы. Образцы получали методом молекулярно-лучевой эпитаксии в атмосфере аргона. Подробно детали эксперимента и получения образцов описаны ранее [3].

Полученные спектральные зависимости представлены на рис. 1. При рассмотрении нанокомпозита мы должны обратить внимание на поглощение, которое учитывается в мнимой части диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ и показателя преломления n^* :

$$n^* = n - ik.$$

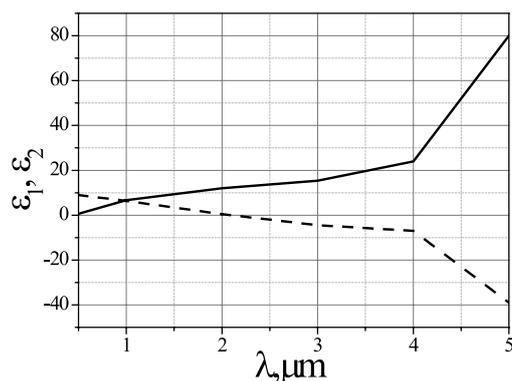


Рис. 1. Спектральная зависимость действительной ε_1 (пунктир) и мнимой ε_2 (сплошная линия) частей диэлектрической проницаемости исследуемого нанокомпозита.

Как видно из рис. 1, данная спектральная зависимость имеет свои особенности в точках с длиной волны λ , равной 1 и 4 мкм. Для анализа оптических свойств нанокомпозита в особых точках проверим выполнение условия Вульфа-Брэгга, т.е. возможна ли интерференция:

$$2d n \sin\theta = m\lambda, \text{ при } \sin\theta = 0.5 \text{ и } m = 1 \Rightarrow dn = \lambda, \quad (1)$$

где d – толщина нанокомпозита;

m – порядок интерференционного максимума;

θ – угол скольжения.

Таким образом, при длине волны $\lambda = 1$ мкм условие Вульфа-Брэгга выполняться не будет: интерференция будет возможна только при $d = 0.36$ мкм, а при $\lambda = 4$ мкм необходимое значение толщины нанокомпозита должно составлять $d = 1.3$ мкм.

Для дальнейших исследований нами рассчитаны и построены спектральные зависимости коэффициентов отражения R_p и пропускания T_p исследуемого образца (рис. 2).

Как показано в [17], для трехслойной структуры (воздух–нанокомпозит–воздух) R_p и T_p , соответственно, равны:

$$R_p = \left| \frac{r_{jk}^p + F^2 \cdot r_{ki}^p}{1 + F^2 \cdot r_{jk}^p \cdot r_{ki}^p} \right|^2; \quad (2)$$

$$T_p = \left| \frac{F \cdot t_{jk}^p \cdot t_{ki}^p}{1 + (F^2) \cdot r_{jk}^p \cdot r_{ki}^p} \right|^2;$$

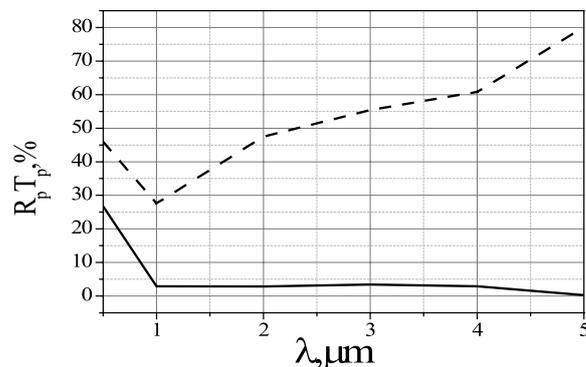


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициентов отражения R_p (пунктирная) и пропускания T_p (сплошная линия) исследуемого образца.

где параметр F определен выражением $F_k = \exp(-2\pi i \cdot \lambda^{-1} \cdot g_k \cdot d_k)$;

коэффициенты r и t p -поляризованного света на границе раздела j -й и k -й сред с показателями преломления n_j и n_k равны:

$$r_{jk}^p = \frac{g_j \cdot n_k^2 - g_k n_j^2}{g_j \cdot n_k^2 + g_k n_j^2};$$

$$t_{jk}^p = \frac{2 \cdot g_j \cdot n_j n_k}{g_j \cdot n_k^2 + g_k n_j^2};$$
(3)

Параметр g определен следующим выражением: $g_i = \sqrt{n_j^2 - n_i^2 \sin^2 \varphi}$,
здесь: n_j – показатель преломления внешней среды (обычно это воздух, и $n_j = 1$);
 φ – угол падения света.

С использованием формул (2) и (3) построены также спектральные зависимости коэффициента отражения R_p (рис. 3) и пропускания T_p (рис. 4) при переменном угле падения $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ электромагнитного излучения.

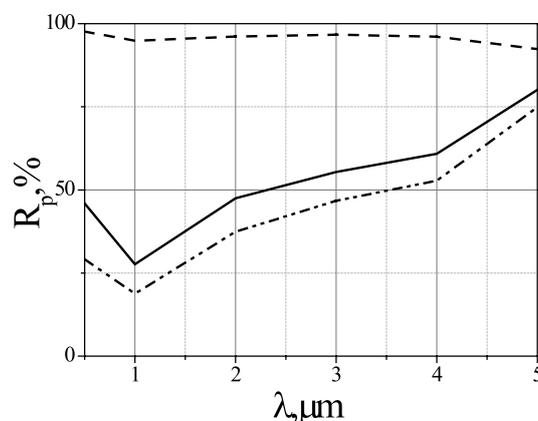


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента отражения R_p (для p -поляризованного света) при различных углах падения электромагнитного излучения: $\varphi = 90^\circ$ (пунктир); $\varphi = 0$ (точки); $\varphi = 45^\circ$ (сплошная).

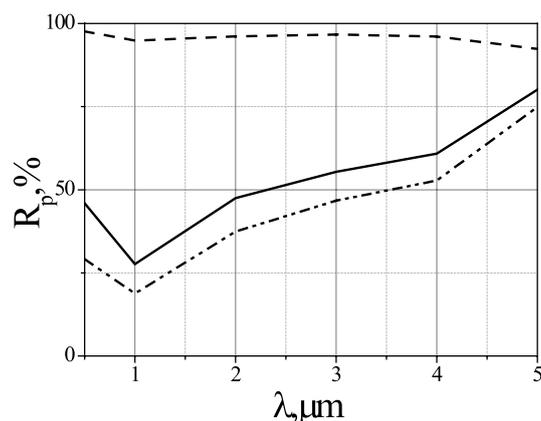


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента пропускания T_p (для p -поляризованного света) при различных углах падения электромагнитного излучения: $\varphi = 90^\circ$ (пунктир); $\varphi = 0$ (точки); $\varphi = 45^\circ$ (сплошная).

Очевидно, что на представленных на рис. 3 и 4 зависимостях имеются те же характерные особые точки при длинах волн λ , равных 1 и 4 мкм, аналогично имеющимся на рис. 2. Необходимо отметить, что в области $\lambda = 4$ мкм наблюдается резкое увеличение (уменьшение) коэффициента отражения (прохождения) при $\varphi \rightarrow 90^\circ$. Отсюда логично предположить существование угла Брюстера или главного угла металла в данной спектральной области.

Рассчитаем угол Брюстера:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Тогда при $\lambda = 1$ мкм: $\operatorname{tg}(\varphi) = 2.8 \Rightarrow \varphi \approx 70^\circ$; при $\lambda = 4$ мкм: $\operatorname{tg}(\varphi) = 3 \Rightarrow \varphi \approx 72^\circ$.

Чтобы проанализировать полученные результаты, целесообразно построить зависимости коэффициентов отражения R_p и пропускания T_p от угла падения света φ при $\lambda = 1$ мкм (рис. 5) и $\lambda = 4$ мкм (рис. 6).

Как видно из рис. 5, при угле $\varphi \approx 70^\circ$ наблюдается особая точка. Это согласуется с оценкой угла Брюстера в рассматриваемой спектральной области, при $\lambda = 1$ мкм. Подчеркнем, что при толщине образца $d = 0.36$ мкм выполняется условие интерференции (1). При указанном значении d коэффициент отражения R_p достигает своего максимального значения, а пропускание при этом равно нулю $T_p = 0$.

Такие же выводы справедливы и для другой особой точки, при $\lambda = 4$ мкм (рис. 6).

Нами выполнен детальный анализ широкого спектра структур по их известным оптическим константам [18] и построены теоретические зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_2 от длины волны λ электромагнитного излучения в сравнении с зависимостями, представленными на рис. 1. Спектральные зависимости ϵ_1 и ϵ_2 для соединения Cu+Si сопоставлены на рис. 7. Они позволили рассчитать оптимальную концентрацию меди в матрице кремния. Для простой оценки рассчитано значение эффективного показателя преломления нанокомпозита по следующей формуле [19, 20]:

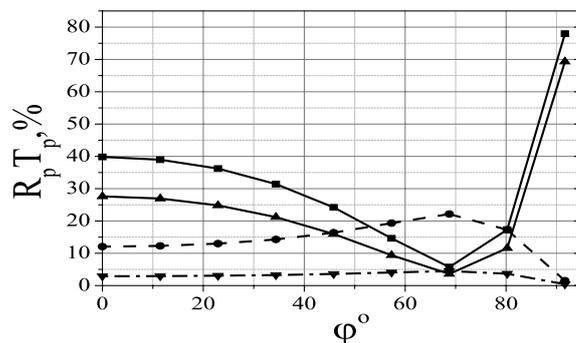


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента отражения R_p (пунктир) и пропускания T_p (сплошная линия) от угла падения φ ($0 \leq \varphi \leq 90^\circ$) p -поляризованного света в спектральной области $\lambda = 1$ мкм при $d = 0.1$ мкм (квадраты) и $d = 1$ мкм (треугольники).

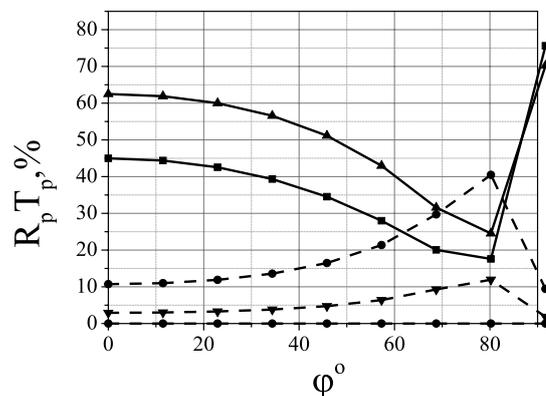


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента отражения R_p (пунктир) и пропускания T_p (сплошная линия) от угла падения φ ($0 \leq \varphi \leq 90^\circ$) p -поляризованного света в спектральной области $\lambda = 4$ мкм, при $d = 0.1$ мкм (квадраты) и $d = 1$ мкм (треугольники).

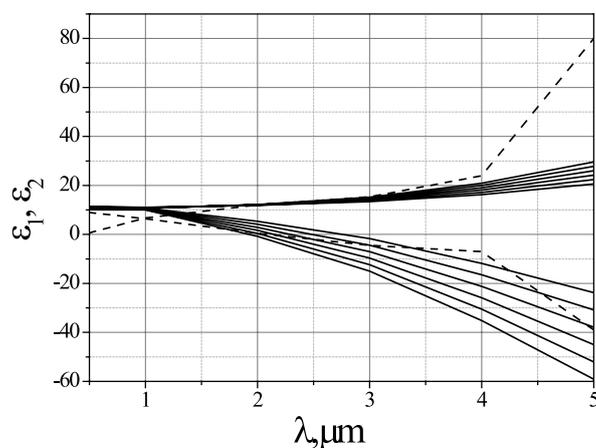


Рис. 7. Спектральные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_2 исследуемого образца (пунктирная линия) в сравнении ϵ_1 и ϵ_2 для сплава Cu+Si (сплошная линия) при различной концентрации меди в матрице кремния $5\% < X < 10\%$.

$$n_{eff} = \sqrt{n_{Cu}^2 \cdot X + n_{Si}^2 \cdot (1 - X)} \quad (5)$$

где n_{Cu} – показатель преломления меди;

n_{Si} – показатель преломления кремния;

X – объемная концентрация металлической компоненты (в нашем случае, меди).

У кремния показатель преломления остается практически постоянным во всей ИК-области электромагнитного излучения и составляет $n_{Si} = 3.4$, для меди: $n_{Cu} = n + ik$. Отсюда и была рассчитана оптимальная, с точки зрения описания экспериментальных данных, концентрация меди в матрице кремния: она составила 7%. Данная спектральная зависимость представлена на рис. 8.

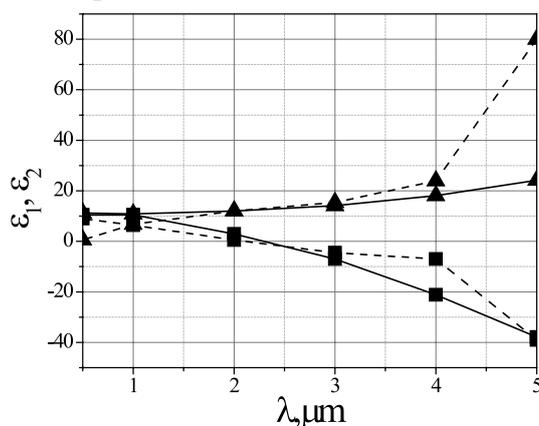


Рис. 8. Спектральные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 (квадраты) и ϵ_2 (треугольники) исследуемого образца в сравнении с ϵ_1 и ϵ_2 для нанокompозита Cu+Si при концентрации меди $X = 7\%$. Сплошные линии соответствуют ϵ_1 и ϵ_2 нанокompозита Cu+Si, пунктирные – исходного образца.

Таким образом, в целом объяснена спектральная зависимость действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей диэлектрической проницаемости исследуемого нанокompозита (рис. 1), найдена оптимальная структура, соответствующая составу образца нанокompозита.

Для уточнения вычислений необходимо рассмотреть теорию эффективной среды. На сегодняшний день существует несколько методов описания эффективной среды нанокompозита [21]. Основным приближением в случае малой концентрации металлической компоненты является метод эффективной среды Максвелла-Гарнетта, который описывает структуру через эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} . Для средних концентраций применяется приближение Бруггемана. В случае произвольных концентраций хорошо работает симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта [22]. Так как в представленной здесь работе определена концентрация металлической компоненты, равная 7%, выбран метод эффективной среды Максвелла-Гарнетта. В данном приближении рассматривается взвесь сферических частиц металла $\epsilon_1 = \epsilon_1' - \epsilon_1''$ в среде с диэлектрической постоянной $\epsilon_0 = \epsilon_0' - i\epsilon_0''$. В рамках приближения Максвелла-Гарнетта и с учетом малости частиц условие эффективной среды приводит к уравнению для диэлектрической проницаемости $\epsilon_e \equiv \epsilon^{MG}$:

$$\epsilon^{MG} = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 + 2\epsilon_0 + 2X(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\epsilon_1 + 2\epsilon_0 - X(\epsilon_1 - \epsilon_0)} \quad (6)$$

В нашем случае $X = 0.07$. Зависимости действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей диэлектрической проницаемости нанокompозита Cu+Si в сравнении с ϵ_1 и ϵ_2 , рассчитанными методом эффективной среды Максвелла-Гарнетта, изображены на рис. 9. Как видно, полученные спектральные зависимости хорошо согласуются.

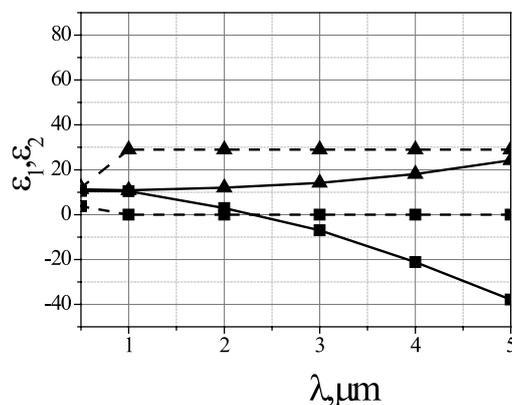


Рис. 9. Спектральные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 (квадраты) и ϵ_2 (треугольники) сплава Si+Cu (сплошная линия) в сравнении с ϵ_1 и ϵ_2 , рассчитанными методом эффективной среды Максвелла-Гарнетта (пунктирная линия).

Заключение

Проведенный в статье анализ позволяет прогнозировать оптические свойства любого нанокompозита, что важно для выбора материалов с заданными свойствами. Выполнено моделирование оптических свойств нанокompозитов с использованием подходов эффективной среды. Расчет спектральных зависимостей действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей диэлектрической проницаемости нанокompозита Cu+Si выполнен с использованием простейшего подхода и в рамках метода Максвелла-Гарнетта (рис. 9). Как видно из этого рисунка, наблюдается хорошее согласие полученных экспериментальных и модельных спектральных зависимостей. Все результаты статьи представляют значительный интерес для дальнейшего исследования оптических свойств нанокompозитов и поиска перспективных материалов с заданными свойствами.

Подобные нанокompозиты могут использоваться как высокочувствительные магниторезистивные датчики и миниатюрные магнитосчитывающие головки. По нашему мнению, они могут найти применение в качестве селективных усилителей и модуляторов света, а также приемников теплового излучения [1]. Полученные результаты представляют как фундаментальный, так и практический интерес в широкой области применения нанокompозитов.

Литература:

1. Юрасов А.Н. Магниторефрактивный эффект, как бесконтактный метод исследования функциональных материалов // Материаловедение. 2014. № 6. С. 32–38.
2. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., Gan'shina E.A., Kaul' A.R., Korsakov I.E., Perov N.S., Fetisov L.Yu., Yurasov A.N. Magnetorefractive effect in the $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ thin films grown by MOCVD // J. Magn. Magn. Mat. 2014. V. 367. P. 53–59.

3. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-193 semiconductors multilayers // *Solid State Phenomena*. 2011. V. 168-169. P. 533–536.
4. Hrabovský D., Caicedo J.M., Herranz G., Infante I.C., Sánchez F., Fontcuberta J. Jahn-Teller contribution to the magneto-optical effect in thin-film ferromagnetic manganites // *Phys. Rev. B*. 2009. V. 79(5). P. 052401-1–052401-4.
5. Bergman L.J. The dielectric constant of a composite material – a problem in classical physics // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 44. P. 1285–1287.
6. Gerady J.M., Ausloos M. Absorption spectrum of clusters of spheres from the general solution of Maxwell's equations. The long-wavelength limit // *Phys. Rev. B*. 1980. V. 22(12). P. 4950–4959.
7. Gerady J.M., Ausloos M. Effects of high polar orders on the infrared absorption spectrum of ionic clusters // *Surface Sci.* 1981. V. 106. P. 319–326.
8. Антонов В.А., Пшеницин В.И. Эффективная диэлектрическая проницаемость гетерогенной системы // *Оптика и спектроскопия*. 1981. Т. 50. С. 362–370.
9. Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электроинформ, 2005. 168 с.
10. Xiao J.Q., Jiang J.S., Chien C.L. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68. P. 3749–3756.
11. Ведяев А.В., Грановский А.Б., Калицев А.В., Брауерс Ф. Аномальный эффект Холла гранулированных сплавов // *ЖЭТФ*. 1997. Т. 112. С. 2198–2209.
12. Балабанов В. И. Нанотехнологии. Наука будущего. М.: Эксмо, 2009. 256 с.
13. Вызулин С.А., Горобинский А.В., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Чекрыгина Ю.И., Шипкова И.Г. ФМР, магнитные и резистивные свойства мультислойных наноструктур $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ // *Известия РАН, сер. физическая*. 2010. Т. 74. № 10. С. 1441–1443.
14. Naik S.R., Rai S., Tiwari M.K., Lodha G.S. Structural asymmetry of Si/Fe and Fe/Si interface in Fe/Si multilayers // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. P. 115307–115312.
15. Ханикаев А.Б., Грановский А.Б., Клерк Ж.-П. Влияние распределения гранул по размерам и притяжения между гранулами на порог перколяции в гранулированных сплавах // *Физика твердого тела*. 2002. Т. 44. С. 1537–1540.
16. Price P.J. Anisotropic conduction in solids near surfaces // *IBM J. Res. Develop.* 1960. V. 4. P. 152–157.
17. Маевский В.М. Теория магнетооптических эффектов в многослойных системах с произвольной ориентацией намагниченности // *Физика металлов и материаловедение (ФММ)*. 1985. Т. 59. № 2. С. 213–219.
18. Bass M., DeCusatis C., Enoch J.M., Lakshminarayanan V., Li G., MacDonald C., Mahajan V.N., Van Stryland E. Handbook of optics: Third Edition. Vol. IV: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics. McGraw-Hill Education, 2009. V. 4. 1152 p.
19. Gorelik V.S., Yashin M.M., Vodchits A.I., Reflection spectra of 1D photonic crystals based on aluminum oxide // *Physics of Wave Phenomena*. 2017. V. 25. № 3. P. 175–179.
20. Горелик В.С., Яшин М.М. Узкополосные фильтры в видимом спектральном диапазоне на основе пористого фотонного кристалла // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*.

Серия: естественные науки. 2016. № 5(68). С. 105–114.

21. Сушко М.Я., Криськив С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем // Журн. техн. физики. 2009. Т. 79. Вып. 3. С. 97–101.

22. Granovsky A.B., Gan'shina E.A., Vinogradov A.N., Rodin I.K., Yurasov A.N., Khan H.R. Magneto-optical spectra of ferromagnetic Co-CoO composites // Physics of Metals and Metallography. 2001. V. 91. № 1 suppl. S52–S55.

References:

1. Yurasov A.N. Magnetorefractive effect as contactless method for investigation of functional materials // Materialovedenie (Materials Science). 2014. № 6. P. 32–38. (in Russ.).

2. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., Gan'shina E.A., Kaul' A.R., Korsakov I.E., Perov N.S., Fetisov L. Yu., Yurasov A.N. Magnetorefractive effect in the $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ thin films grown by MOCVD // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2014. V. 367. P. 53–59.

3. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-193 semiconductors multilayers // Solid State Phenomena. 2011. V. 168-169. P. 533–536.

4. Hrabovský D., Caicedo J.M., Herranz G., Infante I.C., Sánchez F., Fontcuberta J. Jahn-Teller contribution to the magneto-optical effect in thin-film ferromagnetic manganites // Phys. Rev. B. 2009. V. 79(5). P. 052401-1–052401-4.

5. Bergman L.J. The dielectric constant of a composite material – a problem in classical physics // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. P. 1285–1287.

6. Gerady J.M., Ausloos M. Absorption spectrum of clusters of spheres from the general solution of Maxwell's equations. The long-wavelength limit // Phys. Rev. B. 1980. V. 22(12). P. 4950–4959.

7. Gerady J.M., Ausloos M. Effects of high polar orders on the infrared absorption spectrum of ionic clusters // Surface Sci. 1981. V. 106. P. 319–326.

8. Antonov V.A., Pshenitsin V.I. Effective permittivity of a heterogeneous system // Optika i spektroskopiya (Optics and Spectroscopy). 1981. V. 50. P. 362–370. (in Russ.).

9. Kasatkin S.I., Vasilyeva N.P., Muraviev A.M. Spintronic magnetoresistive elements and devices based on them. Moscow: Elektroinform Publ., 2005. 168 p. (in Russ.).

10. Xiao J.Q., Jiang J.S., Chien C.L. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 3749–3756.

11. Vedyayev A.V., Granovskii A.B., Kalitsev A.V., Brauers F. Anomalous Hall effect in granular alloys // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1997. V. 85. P. 1204–1210.

12. Balabanov V.I. Nanotechnologies. Science of the future. Moscow: Eksmo Publ., 2009. 256 p. (in Russ.).

13. Vyzulin S.A., Gorobinskii A.V., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Lebedeva E.V., Syr'ev N.E., Trofimenko I.T., Chekrygina Y.I., Shipkova I.G. Ferromagnetic resonance, magnetic properties, and resistivity of $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ multilayer nanostructures // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2010. V. 74. № 10. P. 1380–1382.

14. Naik S.R., Rai S., Tiwari M.K., Lodha G.S. Structural asymmetry of Si/Fe and Fe/Si interface in Fe/Si multilayers // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 115307–115312.

15. Khanikaev A.B., Granovskii A.B., Clerc J.P. Influence of the size distribution of granules

and of their attractive interaction on the percolation threshold in granulated alloys // *Physics of the Solid*. 2002. V. 44. № 9. P. 1611–1513.

16. Price P.J. Anisotropic conduction in solids near surfaces // *IBM J. Res. Develop.* 1960. V. 4. P. 152–157.

17. Majewski VM The theory of magneto-optical effects in multilayer systems with an arbitrary orientation of the magnetization // *Fizika metallov i metallovedenie (Physics of Metals and Metallography)*. 1985. V. 59. № 2. P. 213–219 (in Russ.).

18. Bass M., DeCusatis C., Enoch J.M., Lakshminarayanan V., Li G., MacDonald C., Mahajan V.N., Van Stryland E. *Handbook of optics: Third Edition. Vol. IV: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics*. McGraw-Hill Education, 2009. V. 4. 1152 p.

19. Gorelik V.S., Yashin M.M., Vodchits A.I., Reflection spectra of 1D photonic crystals based on aluminum oxide // *Physics of Wave Phenomena*. 2017. V. 25. № 3. P. 175–179.

20. Gorelik V.S., Yashin M.M. Narrow-band filters in the visible spectral range based on porous photonic crystal // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.E. Baumana, Estestv. nauki (Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.)*. 2016. № 5. P. 105–114. (in Russ.).

21. Sushko M.Y., Kriskiv S.K. Compact group method in the theory of permittivity of heterogeneous systems // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2009. V. 54. № 3. P. 423–427.

22. Granovsky A.B., Gan'shina E.A., Vinogradov A.N., Rodin I.K., Yurasov A.N., Khan H.R. Magneto-optical spectra of ferromagnetic Co-CoO composites // *Physics of Metals and Metallography*. 2001. V. 91. № 1 suppl. S52–S55.

Об авторах:

Юрасов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Яшин Максим Михайлович, ассистент кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5).

About the authors:

Alexey N. Yurasov, Dr.Sc., Docent, Professor of Chair of Nanoelectronics, Physical Technological Institute, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Maxim M. Yashin, Assistant of Chair of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Bauman st., Moscow 105005, Russia).

UDC 336.2

STREAMLINING THE MANAGEMENT OF CORPORATE ACCOUNTS RECEIVABLE*

Marin Marinov[@],
Georgy Angelov

Tsenov Academy of Economics, Svishtov, 5250, Bulgaria
[@] Corresponding author e-mail: m.marinov@uni-svishtov.bg

The paper assesses the importance of corporate receivables to the financial position of companies nowadays. The process of streamlining corporate accounts receivable relates to maintaining their value within such limits which would be sufficient to ensure covering short-term corporate accounts payable without having to resort to additional sources of financing. The contents of the research paper is presented in two logically connected parts. Part one reviews the methods and approaches to corporate accounts receivable management which have been established in financial theory. Part two presents an analysis of the accounts receivable of six Bulgarian public companies. According to achieved financial results, each company has been positioned within a matrix illustrating the correlation between accounts receivable and sales volumes, following the Gentry-De La Garza model. The views of the authors on related issues are based on the conducted research and are presented as research findings and conclusions.

Keywords: corporate accounts receivable, sales revenue, public companies

МОНИТОРИНГ УПРАВЛЕНИЯ ДЕБИТОРСКОЙ ЗАДОЛЖЕННОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

Марин Маринов[@],
Георги Ангелов

Хозяйственная академия им. Ценова, Свиштов, 5250, Болгария
[@] Автор для переписки, e-mail: m.marinov@uni-svishtov.bg

*The authors' contribution to this paper is: Assoc. Prof. Marin Marinov – introduction and conclusion; Assistant Prof. Georgy Angelov – abstract, part one and part two.

The authors use as synonyms the concepts firm, corporation, business enterprise and company. The same applies to the concepts of inventory and production inventory. The authors have adopted this approach to avoid using repeatedly the same financial terms.

Настоящая статья посвящена исследованию влияния дебиторской задолженности на финансовое положение современных компаний. Рационализация требований к управлению дебиторской задолженностью связана с необходимостью поддержания ее величины в пределах, достаточных для покрытия краткосрочных корпоративных обязательств без необходимости привлечения дополнительных источников финансирования. В статье рассмотрены вопросы выработки политики платежей, соблюдение которой позволит сохранить нормальное финансовое состояние компании. Исследовано влияние роста дебиторской задолженности на дополнительные издержки компании и, как следствие, на ее финансовые результаты. Работа состоит из двух частей, логически связанных между собой: в первой рассматриваются методы и подходы, сформулированные и обоснованные в финансовом менеджменте в части управления дебиторской задолженностью компании; во второй – на фактических данных проведен анализ дебиторской задолженности шести болгарских публичных компаний, каждая из которых в соответствии с достигнутыми результатами позиционируется в матрице, отражающей взаимосвязь между дебиторской задолженностью и объемом продаж на примере Gentry и Garza. Позиция авторов по исследуемой проблеме сформулирована на основе результатов проведенного анализа данных и изложена в заключительных выводах.

Ключевые слова: корпоративная дебиторская задолженность, выручка от продаж, публичные компании.

Introduction

The rational management of corporate accounts receivable leads to an increase in cash; ensures the prompt payment of accounts payable and reduces costs of attracting additional capital. It is therefore essential that each corporate entity maintains the level of its accounts receivable at a sufficient level to prevent delays in cash inflows or missed opportunities for selling the products of the company. In our research, we analyse some methods of managing corporate accounts receivable, which makes it possible to rationalize their value.

Due to the financial crisis, intercompany indebtedness has grown immensely over the past few years, which has had a dramatic effect on the economic situation in the country. The main drivers of economic growth, companies, are key agents in the process of creating products of labour that are the primary source of income to economic agents, i.e. the state and households. Within this context, the issue of corporate accounts receivable and their management has become a major one. Hence, *the objective of this paper* is to make a critical analysis of contemporary methods of managing corporate accounts receivable and to apply and test a technology for streamlining the accounts receivable of Bulgarian public companies.

The efficient management of short-term company assets is a prerequisite for maintaining the solvency of business entities and raising their financial stability. In some cases, maintaining a high turnover of current assets and ensuring the prompt collection of accounts receivable enables companies to pay their short-term accounts payable without having to use any alternative sources of short-term financing. Therefore, the analysis of current assets refers mainly to their major elements, such as: inventory, accounts receivable and cash, and seeks to identify their optimum level in terms of desired profitability and the risk inherent to them [1]. Management of current assets is an element of the operating cycle of companies measured in the number of days from purchasing production supplies to the moment of receiving the money for products sold.

Within the specified time period, the sub-process of corporate accounts receivable management is essential, since it determines the efficiency of corporate activity and is a major source of the cash necessary to maintain the pace of production even.

Corporate accounts receivable are managed by applying various approaches to the analysis of their value, some of the major ones [1, p. 114] being:

- *The method of accounting documents* – this method is based on the data presented in the financial statements of companies and provides information about estimated cash inflows and outflows in terms of corporate accounts receivable and accounts payable;
- *The equilibrium approach, which is based on the time value of money* – this approach relates to the use of commercial credit, when the cash flows from operating activities exceed financing costs;
- *The ratio method* which is based on employing different financial ratios to establish the condition of and changes in the value of corporate accounts receivable;
- *Timing of debtors' indebtedness* – this approach is based on the preparation of tables which indicate the timing of accounts receivable. These tables are used to record the moment of cash inflows currently and during previous periods;
- *The method of financial ratios* which further elaborates the method above. It involves recording the share of cash inflow from sales which will be received during the current period and the share of the transaction value which is recorded as an account receivable.

I. Aspects of the Management of Corporate Accounts Receivable

The integrated management of short-term investment requires maintaining a high turnover of current assets, so as to ensure sufficient liquidity for covering the current and long-term payments of the company. The success of a business depends on maintaining the turnover of current assets at a level ensuring sufficient capital to meet cash discounts on purchases, to keep low the cost of collection and losses and to maintain a reasonable standard of efficiency [2, p. 112]. The management of corporate accounts receivable is of crucial importance to that process. Rational management of accounts receivable provides funds for investing in assets to ensure the smooth running of production. Accounts receivable may most broadly be defined as the cash which companies expect to receive from their customers for the products they have sold. Financial theory and practice identify different types of accounts receivable according to the collection schedule [3]:

- *Current accounts receivable* are the accounts receivable which business entities expect to collect during the regular operating cycle and within the current reporting period;
- *Fixed-term accounts receivable* are the accounts receivable on transactions for which the company has negotiated payment in installments;
- *Arrears* are accounts receivable formed after the term of payment set in the contract has expired. They are also referred to as 'doubtful' accounts receivable, since companies may doubt the possibility to collect them in full;
- *Write-offs* – these are accounts receivable which will positively not be collected due to a significant default on the term of the transaction.

This classification of corporate accounts receivable equips financial managers with information about the structure of accounts receivable and the appropriate actions they

need to initiate in terms of their management. Arrears, for example, entail a substantial risk. Hence, the bigger the value of arrears, the worse the liquidity of the company will be due to the delayed turnover of assets. In this case, the company will need additional funds, and the risk of uncollectibility will be higher, which will hinder the regular performance of the enterprise.

The existence of accounts receivable is a must in market economy, and credit sales are becoming increasingly popular. Therefore, scientists across the globe have been paying greater attention to different methods of managing accounts receivable in an effort to identify an instrument for reducing the collection periods of such payments and optimizing corporate performance.

The technique employed to classify accounts receivable according to the number of days a payment has been defaulted with¹ has become extremely popular in financial theory [4, p. 8]. The size of fines and sanctions in each group is determined according to the the number of days a payment has been defaulted with. Leitch and Lamminmaki employ a similar approach in their research of the correlation between the number of days a payment has been defaulted with and the possibility to collect the accounts receivable of the company [5]. Their analysis has established a positive correlation between credit sales and the aging schedule of accounts receivable. It also provides supporting evidence that credit sales are positively correlated with the rate of collectability. In a research dealing with the management of accounts receivable, Enzhu Li [6] points out that in the contemporary economic environment many companies cannot manage their accounts receivable properly, and it is therefore necessary to design a system of overall and systematic analysis of problem issues in risk management and the reasons underlying that risk.

Lixin and Jiao [7] also deal with that problem and present a detailed system for managing the accounts receivable of small and medium-sized enterprises. They analyse contemporary methods and concepts which relate to the risk diversification of corporate accounts receivable management based on their research of the problems existing in small and medium-sized enterprises. They propose a four-component internal company system of accounts receivable management (see fig. 1) which aims to ensure total control over each stage of a commercial transaction.

A certain correlation has been established between the volume of sales and the accounts receivable of companies. As a matter of fact, the sales policy is determined by two major components: crediting the customers who buy the products of the company and the sums which the business entity has to pay to its suppliers. Therefore, streamlining the accounts receivable of a company enables business entities to ensure the cash required for running their production smoothly and to reduce the risk of additional external financing. A good method for identifying the correlation between sales volumes and the value of accounts receivable is that proposed by Gentry-De La Garza [8]. In their research, the authors elaborate further Gallinger and Ifflander's findings [9] and present the correlation between the two variables through a matrix (fig. 2). There are nine possible situations illustrating changes in the sales volumes and in the accounts receivable of companies.

¹The categorization includes 5 (five) time intervals which reflect the aging of the accounts receivable as follows: 0 days; 0–30 days; 30–60 days; 60–90 days; more than 90 days.

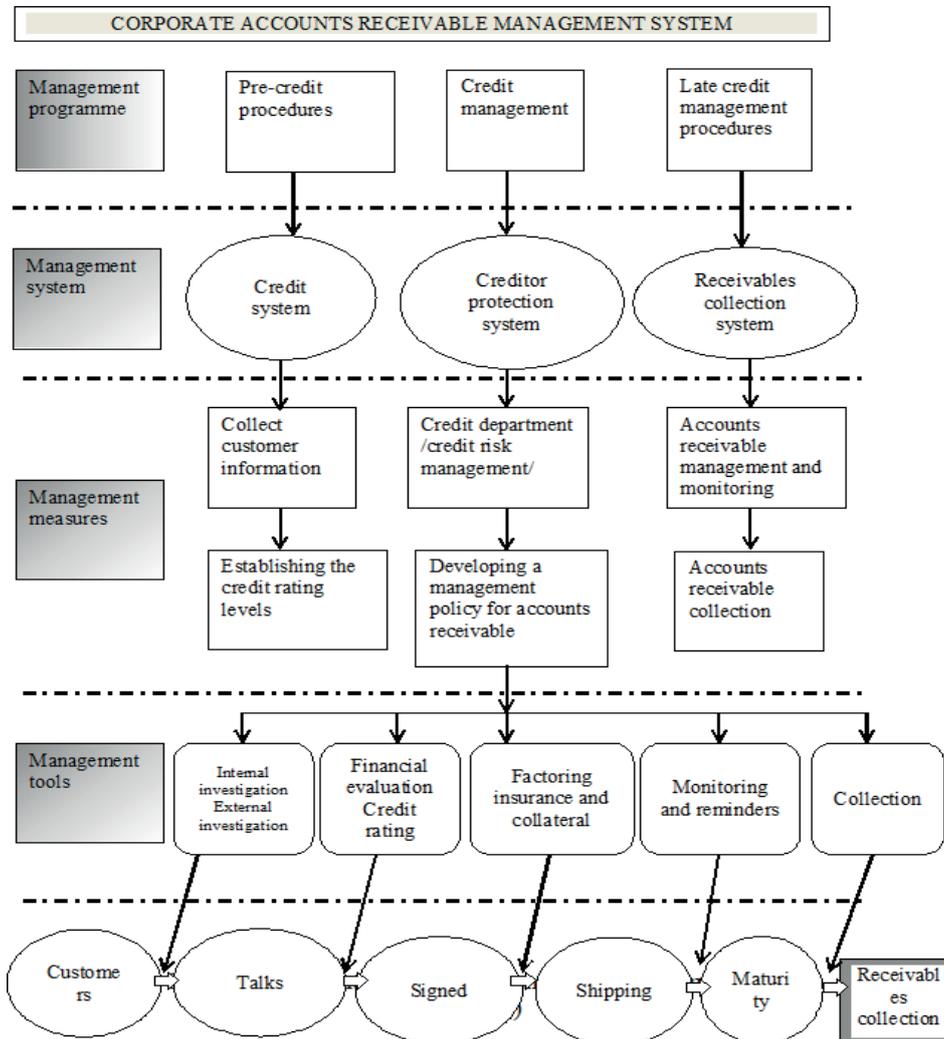


Fig. 1. Corporate accounts receivable management system [7, p. 386].

Accounts receivable	Sales volumes		
	Increase	No change	Decrease
Increase	8	2	5
No change	7	1	4
Decrease	9	3	6

Fig. 2. Matrix of the correlation between the accounts receivable and the sales volume of companies.

Quadrant one (1) of the matrix presents a situation in which there is no change in the sales pattern or in the collection experience of the company. The change in the accounts receivable illustrated in quadrant two (2) might be due to some change in the collection experience of accounts receivable. The increased value of accounts receivable may, for example, result from a more lenient credit policy of the company due to the deteriorated financial position of customers and their inability to make payments in due time. This, in turn, results in lower collectability, yet it does not affect the sales volume achieved previously. Alternatively, the

decrease of accounts receivable illustrated in quadrant three (3) might be due to the stricter credit policy of companies forcing their customers to make their payments duly, which does not result in a lower sales volume, either.

In quadrants four (4) and seven (7), the increase or the decrease in the sales volume does not affect the accounts receivable of the company. This situation occurs when the entire volume of sold products is paid at the moment of delivery, i.e., entries in the accounts receivable remain the same regardless of positive or negative changes in the sales volume.

Quadrant eight (8) illustrates a situation in which both analysed variables increase simultaneously. There is a simultaneous increase in the sales volume and in the value of accounts receivable, which might be accounted for by the credit policy of the company. A lenient credit policy affects sales negatively, which in turn results in increased demand and hence, in growing sales. Increased demand generates a larger sales volume and leads to an increasing amount of accounts receivable, thus posing the threat of losses incurred due to the lower collectability rate in future. As a matter of fact, the method of payment has a direct impact on the accounts receivable.

Quadrant six (6) illustrates a situation in which a strict credit policy is observed, and as a result there is a negative trend in the values of accounts receivable and of sales volume. The implications of the credit policy may be twofold. On the one hand, a strict credit policy may result in lower volumes of sales and accounts receivable, while credit sales may lead to increasing accounts collectible, yet they may also increase the risk of bad debt. A lower sales volume may be the result of implementing a stricter credit policy, which will result in lower sales volumes and accounts receivable.

Quadrants five (5) and nine (9) illustrate the effect of two opposing forces upon the sales volume and the value of accounts receivable. In quadrant five (5), there is an increase in accounts receivable as a result of a lenient credit policy, which results in lower sales volumes in the long run. Whether there will be an upward or downward trend in the change of accounts receivable, depends on which has a stronger impact – the decreasing demand for the products of the company or the credit policy of the business enterprise. Quadrant nine (9) illustrates the most favourable policy to be implemented by a company, i.e., there is a simultaneous decrease in corporate accounts receivable and an increase in the sales volume, which is due to the increased demand for the products of companies and prompt payments made by their customers.

In summary of the correlation presented between sales volumes and corporate accounts receivable in the matrix, it is possible to identify the credit policy implemented by a company and the analysis instruments employed by the financial manager. Hence, financial managers need to employ various methods of monitoring the collectability of corporate accounts receivable.

An issue logically related to the management of corporate accounts receivable is how financial managers should combine the terms of the corporate credit policy and the sales policy of the company. As a matter of fact, the rational management of accounts receivable ensures the collection of accounts receivable through consistent, intelligent and efficient credit collection policies [10, p. 172]. Combining the implementation of corporate policies with the execution of the requirements set in them makes it possible to collect the accounts receivable without violating related legal requirements. We should note that Bulgarian legislation has adopted stricter measures to combat late payments on commercial transactions in compliance with

the requirements set in Directive 2011/7/EU². According to the Directive, ‘Many payments in commercial transactions between economic operators are made later than agreed in the contract or laid down in the general commercial conditions. Although the goods are delivered or the services performed, many corresponding invoices are paid well after the deadline. Such late payments negatively affect liquidity and complicate the financial management of undertakings. They also affect their competitiveness and profitability when the creditor needs to obtain external financing because of a late payment. The risk of such negative effects increases dramatically in periods of economic downturn, when access to financing is more difficult³.

The collection of accounts receivable may be defined as a continuous and consistent process, the implementation of which requires designing a specific policy to meet the objectives of the business enterprise. The type of policy that will be implemented by a company depends on a number of factors, the major ones of them being: the type of business; the values of sales and earnings; the level of competition; the financial position of customers, etc. Hence, designing a system for collecting corporate accounts receivable is of paramount importance. Such a system should be based on the choice of instruments which will be most efficient in producing the desired effect on the collection of accounts receivable within a specific period [2, p. 118].

II. Streamlining the Management of Accounts Receivable in Selected Bulgarian Public Companies

The system presented below is a further elaboration of the methods and models for managing corporate accounts receivable we have analysed so far and consists of three stages (fig. 3), each of them based on approaches which have been well established in economic practice: the method of accounting data (based on collecting and processing data from financial statements and then analysing the condition of corporate accounts receivable); the method of ratio analysis (i.e., designing a system of ratios to be employed as an instrument for evaluation of corporate accounts receivable) and positioning companies in the matrix of accounts receivable and accounts payable according to the Gentry-De La Garza model.

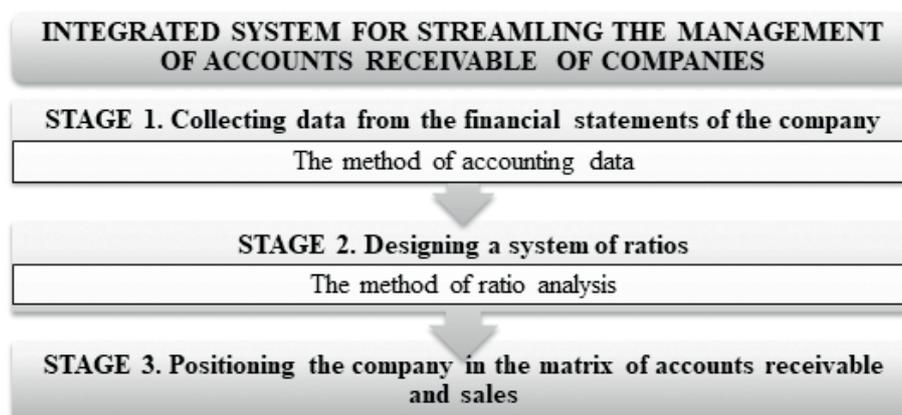


Fig. 3. Integrated system for streamlining the management of accounts receivable of companies.

²Directive 2011/7/EU of the European Parliament and of the Council, Art. 2, Para. 4. (2011, February 23). Retrieved April 13, 2016, from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:048:0001:0010:bg:PDF>.

³The Directive defines payments not made within the contractual or statutory period of payment as ‘late payments.

Our selection of companies to be included in the scope of our analysis is in line with the requirement to focus on companies whose activity is mainly in terms of production and sale of products (i.e. real goods and services). We have therefore chosen five companies with the SOFIX index and left outside the scope of our research holdings and commercial banks.

In our research, the system for streamlining corporate accounts receivable is tested on Bulgarian public companies which are included in the SOFIX index of the Bulgarian stock exchange. Financial data about these corporate entities is publicly accessible, which makes possible the empirical analysis of their accounts receivable within a specified time period. Testing the system will enable financial managers to streamline their policies improve the liquidity, solvency and financial stability of companies.

STAGE 1. Collecting data from the financial statements of the company

To implement the first stage of the system it is necessary to have data from two major financial documents of business entities – the balance sheet and the income statement. Based on the data obtained from these documents, key indicators are calculated to evaluate the condition of corporate accounts receivable. We need to emphasize, though, that the companies we analyse in our research operate in different spheres and sectors, which determines the different values of their short-term assets, inventory, accounts receivable and accounts payable.

A financial analysis of corporate balance sheets reveals that there are two major categories of assets – long-term assets and short-term assets. In line with the objectives of our analysis, the focus of our attention is on short-term assets. These include inventory, accounts receivable, investments and cash (National Accounting Standard 1 – Presentation of financial statements, 2005⁴). As evident from any corporate balance sheet, accounts receivable are a major category in the group of highly liquid assets for a large part of manufacturers and wholesalers [10, p. 172].

It is therefore necessary to calculate the value of corporate accounts receivable as a share of the sum of their short-term assets (Table 1).

Table 1.The share of accounts receivable in the sum of short-term assets of analysed companies

No.	Company	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1.	Neochim PLC	34%	39%	32%	45%	34%	16%
2.	Monbat PLC	63%	60%	58%	57%	61%	60%
3.	Albena PLC	58%	77%	72%	49%	53%	54%
4.	Sopharma PLC	63%	71%	78%	69%	69%	61%
5.	M+S Hydraulic PLC	34%	33%	35%	43%	38%	33%
6.	Chimimport PLC	60%	68%	68%	72%	59%	69%

The values of the accounts receivable of the analysed companies within a five-year period indicate that in 67% of the cases (i.e., 4 out of 6 companies) the value of accounts receivable exceeds 50% of the total sum of short-term assets. This confirms the statement made earlier that accounts receivable have the biggest share in the group of highly liquid assets. The significant value of the entries made in accounts receivable clearly indicate the importance of this category of corporate assets. Therefore, the next stage in their management requires analysis and evaluation so as to establish the condition of and trends in analysed companies.

⁴Natsionalen schetovoden standart 1 – Predstavayane na finansovi otcheti. National Accounting Standard 1 – Presentation of financial statements (2005, April 7). SG. No. 30.

STAGE 2. Designing a system of ratios

Financial managers often employ the ratio analysis method, despite the disadvantage that the method can only provide information about the condition of accounts receivable as of a particular moment, i.e., the moment of preparing the balance sheet. Financial ratios are based on correlations between the items in financial statements. They facilitate the interpretation of the correlations between balance sheet items and identifying trends in the development of companies [11, p. 22]. Due to their nature, corporate accounts receivable are an extremely dynamic category. It is therefore possible that their condition at a later moment might totally differ from the condition registered earlier. Nevertheless, the ratio analysis method is widely employed as it is based on the stability of corporate assets.

Analysis ratios are selected according to the significance of the information they provide to financial managers and the possibility to adequately evaluate the value and the condition of corporate accounts receivable. We should note that financial literature abounds in numerous versions of the ratios presented here [5, p. 5; 1, p.114; Analysis of Receivable Management⁵, p. 199]. Each of them is used to analyse some aspect of corporate accounts receivable. Our choice of ratios was influenced by the objectives of our research. Each ratio is calculated on an annual basis over the entire analysed period (from 2011 to 2015) (Table 2).

Table 2. Ratios employed in the analysis of corporate accounts receivable [12, p. 307; Balance Sheet Ratios⁶]

<i>Accounts receivable turnover</i>	Sales/(Average size of accounts receivable)	Measures the rate at which accounts receivable are being collected on an annual basis.
<i>Average collection period in days</i>	360/Accounts receivable turnover	Converts the accounts receivable turnover ratio into the average number of days the company must wait to be paid.
<i>Accounts receivable/Accounts payable ratio</i>	Accounts receivable/Accounts payable	Indicates the ability of the company to pay its current liabilities through its accounts receivable.

The ratio of Accounts receivable turnover is a key efficiency ratio applied to corporate policies on the collection of accounts receivable. The ratio measures how fast accounts receivable are turned into cash. The ratio measures how many times a business can turn its accounts receivable into cash, i.e., how many times the cycle of accruing and collecting accounts receivable is repeated within a year [12, p. 307]. The key role of that ratio is also due to the fact that it is used to measure the efficiency of the accounts receivable collection policy. Although there are no strictly defined margins for the value of the ratio, it is generally accepted that the higher the value, the longer the period of the commercial credit provided by a business entity.

According to the requirement on the high rate of accounts receivable turnover, the best performing company is Albena PLC, which maintained the highest values of turnover rate ranging between 8,754 and 18,601 times. M+S Hydraulic PLC and Monbat PLC rank second and third with nearly equal values of the turnover rate. The average turnover rate maintained

⁵Analysis of Receivable Management (n.d.). Retrieved January 22, 2016, from http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/723/11/11_chapter%206.pdf.

⁶Balance Sheet Ratios (n.d.). Retrieved January 30, 2016, from <https://www.suu.edu/business/sbdc/pdf/balancesheetratios.pdf>.

during the period by M+S Hydraulic PLC was 6,352, while that of Monbat PLC was 4,850. Sopharma PLC maintained a relatively steady turnover of nearly 1,500 over the entire period. The lowest rate of turnover was registered by Neochim PLC and Chimimport PLC, which ranked at the bottom with values of 71 and 39 times (see fig. 4). As a result of the conducted analysis it is possible to identify four contingent groups of companies. The only company in group one is Albena PLC with the highest rate of turnover. M+S Hydraulic PLC and Monbat PLC are in group two with their relatively high rates of turnover. In group three, there is only one company, Sopharma PLC. Neochim PLC and Chimimport PLC are in group four, their rate of turnover being the lowest. The analysed ratio directly correlates to the number of days which a company needs to collect its accounts receivable. The higher the value of the accounts receivable turnover rate, the fewer the days which the company needs to collect its accounts receivable, which also indicates an inverse relationship.

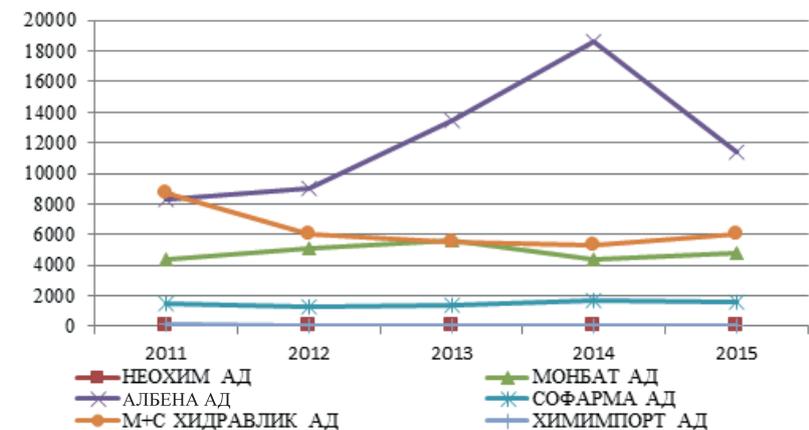


Fig. 4. Turnover of the accounts receivable (y-axis – turnover rate) of Bulgarian public companies [НЕОХИМ АД – NEOCHIM PLC; МОНБАТ АД – MONBAT PLC; АЛБЕНА АД – ALBENA PLC; СОФАРМА АД – SOPHARMA PLC; М+С ХИДРАВЛИК АД – M+S HYDRAULIC PLC; ХИМИМПОРТ АД – CHIMIMPORT PLC].

The ratio of the average collection period in days converts the accounts receivable turnover rate into the average number of days in which a company expects to collect its account receivables. The ratio is also known as days of credit sales and indicates the number of days which a company needs to collect its accounts receivable from credit sales. Their number is calculated by dividing the days within a calendar year into the accounts receivable turnover rate [12, p. 308]. A comprehensive and accurate analysis of accounts receivable requires that the average collection period be compared to the collection periods of other companies in the sector. When the collection period is longer than those in previous reporting periods or than those of other companies operating in the same sector, companies need to make adequate adjustments to their policies in terms of credit sales, accounts receivable monitoring and collection.

An increase or decrease in the value of the ratio indicates two major trends – towards an improvement or a deterioration of the collection policy or some change in the financial situation of a company's customers. As the inability of customers to pay the sums they owe does not depend directly on companies, the focus of attention should be shifted towards the financial management policy of the company and corporate governance.

Due to the inverse relationship between the average collection period ratio and the ratio of accounts receivable turnover, Chimimport PLC is the company which needs the fewest days to

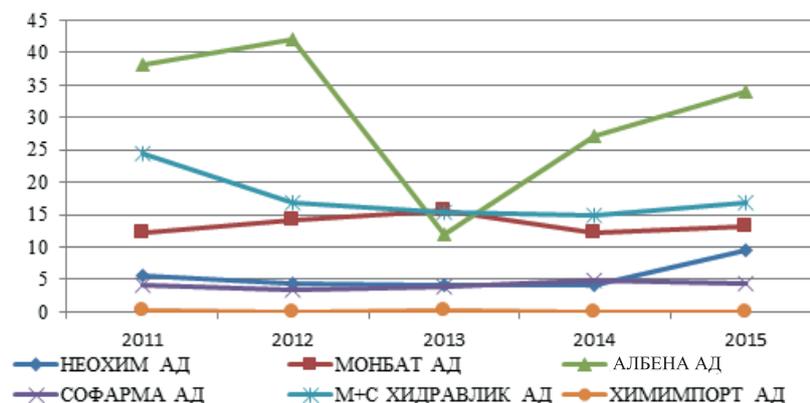


Fig. 5. Average collection period of accounts receivable (y-axis – days) of Bulgarian public companies.

collect its accounts receivable – 0.11 days. The highest value of the ratio is the one registered by Albena PLC. There was a trend towards an initial increase of the ratio in the period from 2011 to 2012, followed by a dramatic decrease from 42 days (in 2012) to 12 days (in 2013). Nevertheless, even the value of 42 days for the ratio does not pose a threat to the liquidity of the company, since the accounts receivable are collected within the current quarter of the year. We should note the dependency between the accounts receivable and the liquidity of a company: the higher the size of corporate accounts receivable, the poorer the liquidity of a company. Credit sales reduce cash inflows and thus lead to a decrease in available cash. In other words, the customers of a company benefit from its cash without being charged an interest for that. Monbat PLC and M+S Hydraulic PLC registered roughly equal values over the entire analysed period within a calendar month (of 30 days). The values registered by Sopharma PLC and Neochim PLC were favourable, too. On the one hand, this was due to the high rate of accounts receivable turnover, while on the other hand that was the result of the restrictive credit policy implemented by the companies. The average value of the ratio for Sopharma PLC was 4.15 days, and that of Neochim PLC was 5.57 days.

Another key indicator of the collection policy of accounts receivable directly relates to corporate liquidity. The Accounts receivable/Accounts payable ratio reveals the ability of companies to cover their short-term accounts payable with the value of accrued accounts receivable. The value of that ratio indicates whether the accounts receivable of the business entity are managed rationally. It also correlates to corporate solvency: the lower the rate of accounts receivable turnover, the lower the solvency of the company, since accounts receivable are one of the potential sources of funds for making corporate payments.

In business practice, the amount of accounts payable normally exceeds the amount of accounts receivable due to the specific nature of some short-term accounts payable (such as payment of salaries and wages; social security contributions; taxes, etc.). Therefore, the accounts receivable are efficiently managed only when that ratio is below one (1), thus ensuring the higher liquidity and financial independence of the enterprise.

Values slightly above or below one (1) are also acceptable for that ratio, as they will not pose a threat to the performance of the company. However, values higher than one (1) indicate

that the company cannot collect its accounts receivable within short periods and allows its customers to benefit from corporate capital without being charged an interest.

The graphical presentation of the data (see fig. 6) illustrates the trend in terms of the correlation between corporate accounts receivable and payable.

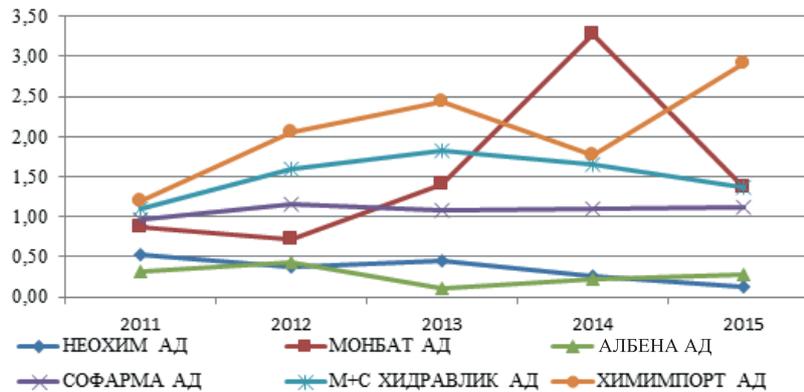


Fig. 6. Accounts Receivable/Accounts Payable of Bulgarian public companies.

According to the criterion set, Sopharma PLC is the company in the most favourable situation, the value of its ratio fluctuating around one (1) over the entire analysed period (from 2011 to 2015). Albena PLC and Neochim PLC are the other two companies which performed well, the value of the ratio being below one (1) throughout the entire period and decreasing steadily. A similar policy indicates efficient management of accounts receivable and the ability of companies to fully cover their current account payable through collected accounts receivable. According to the applied criterion, Chimimport PLC was in a less favorable situation, and so were M+S Hydraulic PLC and Monbat PLC over the last years of the analysed period, there being a trend towards a continuous growth of the ratio which significantly exceeded the optimum level equaling one (1). A similar policy forces companies to seek additional sources of financing (bank loans) due to the insufficient revenue from sales for covering their liabilities within the reporting period. In general, this poses a threat to the financial stability of business enterprises and is indicative of inefficient and irrational management of accounts receivable and/or an excessive increase in corporate liabilities and therefore requires that adjustments to the financial policy of the company be made.

STAGE 3. Positioning the company in the matrix of accounts receivable and sales

Implementing the final stage of the integrated system for assessing corporate accounts receivable is based on the Gentry-de La Garza matrix of the correlation between corporate accounts receivable and the volume of sales. The objective is to position each company in a quadrant of the matrix according to the trends in the development of those two key ratios. It would thus be possible to judge whether the policy of each company needs to be changed and identify an appropriate line for its development in future.

The trends towards an increase or a decrease of both variables are identified by applying a comparative analysis to the values of the accounts receivable and sales volume of Bulgarian public companies in each of the years included in our research period (from 2011 to 2015). These trends are monitored by modeling the trend line presented in fig. 7 and fig. 8. This enables

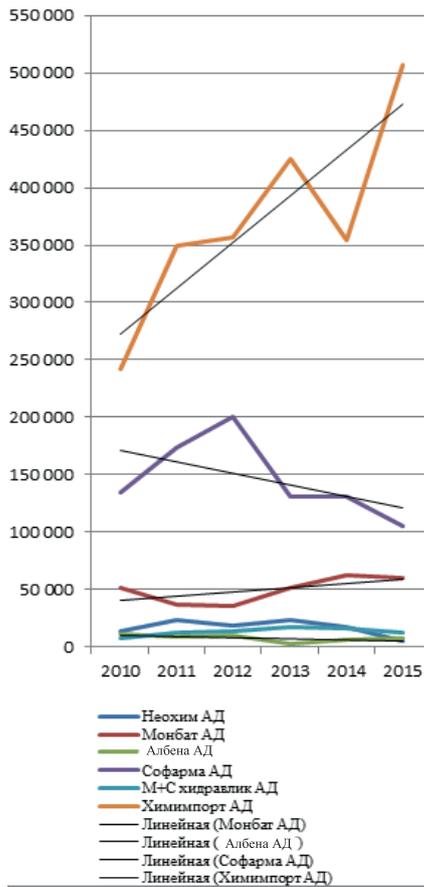


Fig. 7. Trends in the accounts receivable of Bulgarian public companies.

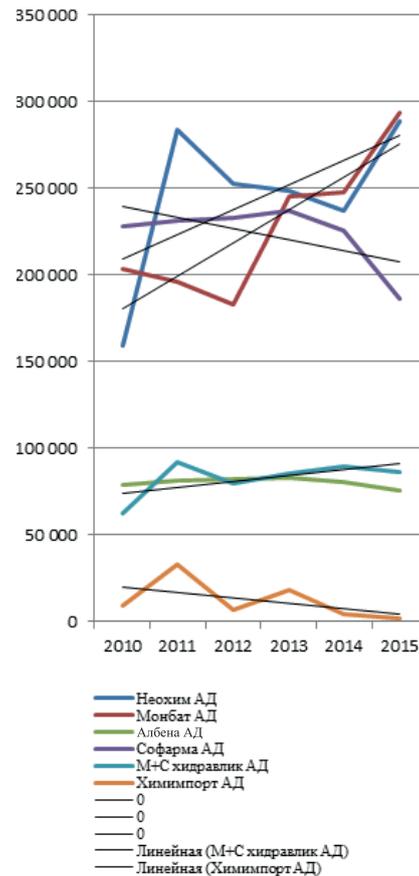


Fig. 8. Trends in the sales of Bulgarian public companies.

us to pinpoint the position of each company in the matrix (fig. 9) based on the considerations presented in the research of Gentry-De La Garza [8, p. 29].

Adopting the Gentry-De La Garza matrix for Bulgarian public companies supports the view stated earlier that Neochim PLC is the company with the most rational management of accounts receivable. The company is positioned in quadrant nine (9) which presents the most favourable situation combining an increase in corporate sales and a decrease in corporate accounts receivable. This situation renders the company successful on the market and reliant on the loyalty of its customers, which boosts the demand of the company produce.

Receivables	Sales volume		
	Increase	No change	Decrease
Increase	8 Monbat Plc	2	5 Chimimport Plc.
No change	7 M+S Hydraulic Plc.	1	4
Decrease	9 Neochim Plc.	3 Albena Plc.	6 Sofarma Plc.

Fig. 9. Positioning of Bulgarian public companies in the matrix by studying the correlation between their accounts receivable and sales volumes.

M+S Hydraulic PLC is positioned in quadrant seven (7) which describes a situation of increasing sales volumes and a constant value of the accounts receivable. As we have already noted, a similar situation is present when the total volume of products sold is paid for at the moment of their delivery, i.e., entries in the accounts receivable remain the same despite the change in the sales volume. The accounts receivable of the company remain steady, which increases the number of days in which payments are defaulted.

Monbat PLC is positioned in quadrant eight (8) where the situation is one of a simultaneous increase in the sales volume and in the value of the accounts receivable. A similar situation occurs when companies change their credit policies and encourage their credit sales. In this case, every unit of produce is sold on commercial credit, and both values grow simultaneously at the same rate.

Quadrant six (6) presents a situation in which companies employ a stringent credit policy, which results in a negative trend in the values of accounts receivable and sales. This is the quadrant where Sopharma PLC is positioned. As a matter of fact, this situation may occur when a company fails to collect its previous accounts receivable and does not make new sales, thus exposing to risk both its liquidity and solvency.

Albena PLC is positioned in quadrant three (3) where accounts receivable decrease while the volume of sales remains steady. This might be due to a tighter credit policy which requires customers to make prompt payments. On the other hand, a company may improve its collection policy on previous accounts receivable without making any new sales. This is a favourable situation, though only in the short run, since cash inflows on accounts receivable accrued earlier compensate for the lack of new sales. In the long run, a similar situation would result in lack of funds, which poses a threat to corporate liquidity and solvency.

Chimimport PLC is positioned in quadrant five (5) which indicates a situation of increasing accounts receivable as a result of a lenient credit policy, thus leading to a declining sales volume in the long run. This is considered to be the least favourable situation, which supports the observations we made earlier about the policy employed by Chimimport PLC.

Conclusion

In their effort to recover swiftly from the negative consequences of the economic crisis, companies operating in the production sector need to ensure the rational management of their short-term assets. A major issue, therefore, is the efficient management of their accounts receivable. Our research provides a compilation of different methods and models for managing corporate accounts receivable which have been verified by both financial theory and economic practice as adequate approaches to designing the credit and collection policies of business entities. In terms of this, the designed system for the management of accounts receivable enables financial managers to make adequate adjustments to their credit policies. In conclusion, we should note that the collection policy of a company does not depend on internal company solutions only, but also relates to the financial position of its customers, the strength of the competition, the market conditions and the economic situation in the country where the company operates.

References:

1. Patev P., Marinov M., Ganchev A. *Finansi na firmata (Company Finance)*. Ruse: Avangart print, 2015. 208 p. (in Bulg.)
2. Milinov V., Vasileva P., Pavlov A. *Operativen finansov menidzhmant (Operational Financial Management)*. Veliko Tarnovo: Abagar, 2010. 148 p. (in Bulg.)
3. Volostnova A. *Accounts Receivable Management: Reduction Options // Economic Science Today: Theory and Practice : Materials of the scientific and practical conference Interactive Plus*. 2014. P. 34–37. (in Russ.)
4. Aristarkhova M.K., Valiev Sh.N. Increase of efficiency of management of accounts receivable of the enterprise by creation of the simulation model of management. p.8. Last access 20th April 2016, from Neftegazovoe delo: http://www.ogbus.ru/authors/Aristarkhova/Aristarkhova_1.pdf (in Russ.)
5. Leitch Ph., Lamminmaki D. Refining measures to improve performance measurement of the accounts receivable collection function // *Article of Griffith Business School - Griffith University*. 2009. № 01. 27 p.
6. Enzhu L. An analysis of the construction of total risk management mechanism for enterprises' accounts receivable // *Int. J. Business and Management*. 2008. V. 3. № 5. P. 105–108.
7. Lixin W., Jiao X. The risk control of accounts receivable for SMEs // *Orient academic forum*. 2012. P. 382–391. <http://www.seiofbluemountain.com/upload/product/201012/4-Z08.pdf>, retrieved on 12 October 2013, 2012.
8. Jones A., Jesus M., Garza A. Generalized model for monitoring accounts receivable // *Financial Management*. 1985. V. 14. № 4. P. 28–38.
9. Gallinger G., Ifflander A. Monitoring accounts receivable using variance analysis // *Financial Management*. 1986. V. 15. P. 69–76.
10. Adamov V. *Finansi na fermata (Company Finance)*. Svishtov: Akademichno izdatelstvo Tsenov, 2012. 503 p. (in Bulg.)
11. Kasarova V., Dimitrova R. Analysis of financial statements: Scientific handwriting deposited at CNTB (Научен ръкопис, депозиран в ЦНТБ) № Нд 373/2005. Sofiya. 64 p. (in Bulg.)
12. Adamov V., Holst J., Zahariev A. *Financial Analysis: Third Edition*. Veliko Tarnovo: Abagar, 2006. (in Bulg.)

About the authors:

Marin Marinov, Assoc. Prof., Ph.D., Department of Finance and Credit, Tsenov Academy of Economics (2, Em. Chakarov Str., Svishtov, 5250, Bulgaria).

Georgy Angelov, Assistant Prof., Ph.D., Department of Finance and Credit, Tsenov Academy of Economics (2, Em. Chakarov Str., Svishtov, 5250, Bulgaria).

Об авторах:

Маринов Марин, доцент кафедры финансов и кредита Хозяйственной академии им. Ценова (5250, Болгария, Свиштов, ул. Ем.Чакъров, 2).

Ангелов Георги, ассистент кафедры финансов и кредита Хозяйственной академии им. Ценова (5250, Болгария, Свиштов, ул. Ем.Чакъров, 2).

УДК 330.142

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ КАПИТАЛ ОРГАНИЗАЦИИ: СУЩНОСТЬ, СТРУКТУРА, ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ

**Ю.Б. Надточий[@],
Л.С. Будович**

Московский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: nadtochij@mirea.ru

В статье предлагается обзор разных подходов к определению сущности и структуры интеллектуального капитала, рассмотрены возможности его оценки. Изучению интеллектуального капитала посвящено множество зарубежных и отечественных трудов. Однако до сих пор нет однозначного четкого мнения, что понимать под интеллектуальным капиталом – у каждого автора свой подход к пониманию данной дефиниции. Отмечено, что практически все отечественные и зарубежные авторы едины во мнении о составе (структуре) интеллектуального капитала, в который входят знания, умения и навыки человека (работника), являющегося его обладателем, или совокупности людей, работающих в конкретной организации. Одни исследователи трактуют интеллектуальный капитал как нематериальные активы, другие – как интеллектуальную собственность; известны труды, в которых три эти понятия рассматриваются как взаимосвязанные, но не тождественные. Не вызывает сомнения, что основой интеллектуального капитала как результата являются знания человека или группы людей: полученное образование, придуманная торговая марка, разработанное программное обеспечение и др. Интерес к понятию «интеллектуальный капитал» возник в связи с повышением интеллектуализации труда в современных условиях, насыщением любого труда умственной деятельностью. Интеллектуальный капитал служащего, рабочего, преподавателя наполнен разным содержанием в силу специфики деятельности. Отсюда возникают сложности в оценке интеллектуального капитала.

Ключевые слова: интеллектуальный капитал, знания, нематериальные активы, оценка интеллектуального капитала.

INTELLECTUAL CAPITAL OF THE ORGANIZATION: THE ESSENCE, STRUCTURE, APPROACHES TO EVALUATION

**Yu.B. Nadtochiy[@],
L.S. Budovich**

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author e-mail: nadtochij@mirea.ru

What is "intellectual capital"? There is still no clear answer to this question. But it should be noted that practically all domestic and foreign authors are unanimous in the opinion that the composition (structure) of intellectual capital includes knowledge, skills and experience of a person (worker) who owns it or an aggregate of people working in a particular organization. Some researchers considering intellectual capital, treat it as intangible assets, others – as intellectual property, and there are also works in which these three concepts are regarded as interrelated, but not identical. Anyway, the basis of intellectual capital as a result – the education received, the invented brand, the developed software and much more – are the knowledge of a person or a group of people.

Interest in the concept of "intellectual capital" arose in connection with the increase in the intellectualization of labor in modern conditions. The attention of many scientists, especially economists, has been directed at the need to saturate any work with mental activity. At present, there are many definitions of the concept of "intellectual capital" and many different elements of its structure. Besides, the definition of the structural elements of intellectual capital has its own characteristics depending on the type of organization. The intellectual capital of an employee and worker will be filled with different content due to the specifics of their activities. The intellectual capital of a teacher of a higher educational institution will also have its own specific features. In this regard, in part, there are difficulties in assessing intellectual capital. At the present time, it is possible to talk about the existence of different approaches to the evaluation of intellectual capital, but it is quite certain that intellectual capital cannot be fully valued.

Keywords: intellectual capital, knowledge, intangible assets, estimation of intellectual capital.

В связи с возросшим в последние годы вниманием к увеличению доли умственных функций человека в производстве, к интеллектуализации труда, т.е. к процессу постоянного обогащения знаниями, формирования интеллектуально значимого опыта и использования интеллектуальных способностей, закономерно возникает и интерес к такому понятию, как «интеллектуальный капитал». Особую актуальность данное понятие приобретает с появлением наукоемких и высокотехнологичных производств, так как признается необходимой составляющей их успешного функционирования, повышения эффективности деятельности и развития.

Не вызывает сомнения тот факт, что высокотехнологичные и наукоемкие производства составляют основу инновационной экономики. Современная экономика характеризуется усложнением продукции, а выпуск более сложной продукции основывается на профессиональных знаниях и информации. Знания и информация в этих условиях приобретают особое значение, а они, в свою очередь, являются составляющими элементами интеллектуального капитала как отдельного работника, так и всей организации в целом.

Исторический аспект. Понятие «интеллектуальный капитал» пользуется в современном мире все большей популярностью. В научной литературе высказывается мнение, что словосочетание «интеллектуальный капитал», под которым подразумевалась интеллектуальная деятельность, впервые было использовано Джоном Кеннетом Гэлбрейтом в 1969 г. в переписке с Михалом Калецким. Дж. Гэлбрейт и признается автором термина «интеллектуальный капитал».

В своих трудах Дж. Гэлбрейт, рассуждая о взаимосвязи власти и капитала, указывает на то, что власть в новом индустриальном обществе принадлежит новому фактору производства – совокупности людей, обладающих разнообразными техническими знаниями,

опытом и способностями, в которых нуждается современная промышленная технология и планирование. Эта совокупность людей охватывает многочисленный круг лиц – от руководителей современного промышленного предприятия до основной массы рабочей силы – и включает в себя тех, кто обладает необходимыми способностями и знаниями [1].

Сущность и структура интеллектуального капитала организации. Так как интеллектуальный капитал признается одним из важных ресурсов современных организаций, обеспечивающих их конкурентоспособность, необходимо подробнее рассмотреть общепризнанные подходы (некоторые из них даже можно назвать классическими) к определению его сущности и структуры.

Признанные пионеры в изучении интеллектуального капитала Лейф Эдвинссон и Майкл Мэлоун прибегают к метафоре, чтобы дать наглядное представление о его значении для организации [2], сравнивая организацию с живым организмом – деревом (рис. 1). Исходя из наглядного представления, авторы [2] утверждают, что интеллектуальный капитал – это корни организации, скрытые условия развития, таящиеся за видимым фасадом ее зданий и товарного ассортимента.

К скрытым условиям развития организации относятся две группы факторов: человеческий и структурный капитал (рис. 2), которые являются составляющими интеллектуального капитала (рис. 3).

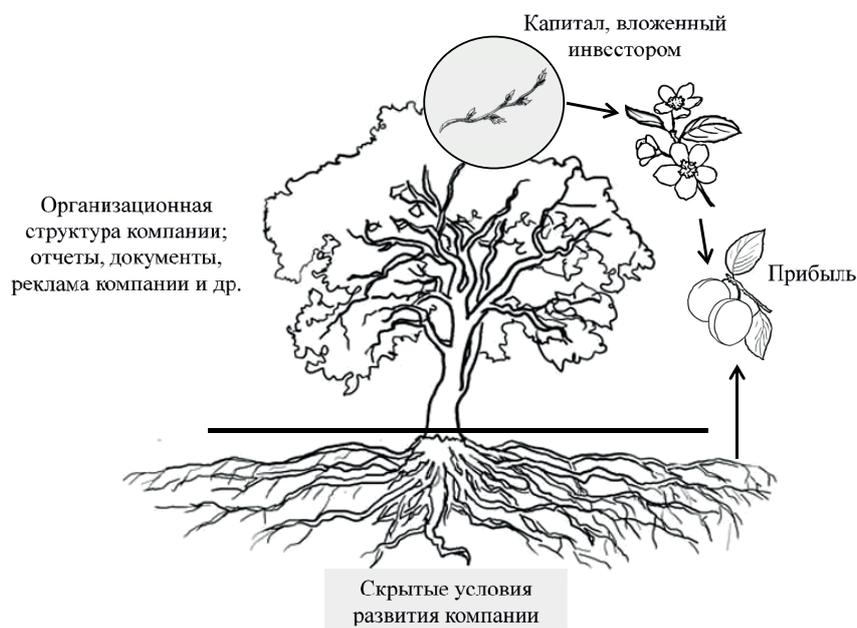


Рис. 1. Наглядное представление значения интеллектуального капитала для организации [2].

Категории интеллектуального капитала, по мнению Л. Эдвинссона и М. Мэлоуна, применимы не только к коммерческим организациям, но и к некоммерческим, а также к военным учреждениям и даже к правительствам.

Существуют и другие подходы к рассматриваемому понятию, например, подход, предложенный Томасом Стюартом. В своей работе [3, с. 82] Т. Стюарт изучает особенности интеллектуального (умственного) труда и признает знание главным источником



Рис. 2. Скрытые условия развития организации [2].



Рис. 3. Составляющие интеллектуального капитала [2].

стоимости на рынке труда («рынки труда вознаграждают тех, кто работает головой, и дают шлепка тем, кто этого не делает»).

Информация и знания отличаются от денежных, природных, трудовых и технических ресурсов. В отличие от прочих ресурсов, особенности знаний заключаются в их изобилии. «Интеллектуальная энергия корпорации» включает два вида интеллектуального капитала (интеллектуальных активов): 1) «экспертиза» – постоянная совокупность специальных знаний и профессионального опыта, сопутствующая любому заданию, человеку или организации; 2) инструменты увеличения совокупности знаний. Т. Стюарт указывает, что главный смысл его книги «Интеллектуальный капитал. Новый источник богатства организаций» заключается в утверждении, что «интеллектуальный капитал в Век информации превышает финансовый капитал». Т. Стюарт, используя схему Хьюберта Сент-Онжа и Лейфа Эдвинссона, предложил в структуре интеллектуального капитала (этих взаимосвязанных видов «интеллектуальной энергии корпорации») рассматривать три составляющие – человеческий, структурный (организационный) и потребительский капитал.

Интерес представляет также подход Энни Брукинг, которая считает, что интеллектуальный капитал имеет давнюю историю существования: «он появился, когда первый бродячий торговец установил хорошие отношения с покупателем» – «доброе имя» [4, с. 30]. Невозможно не согласиться с утверждением автора, что современные компании не могут функционировать без нематериальных преимуществ, их наличие усиливает конкурентные преимущества, что позволяет их считать активами. Исходя из этого, под интеллектуальным капиталом Э. Брукинг предлагает понимать термин, используемый для обозначения нематериальных активов, без которых компания не может существовать в современном мире (рис. 4).

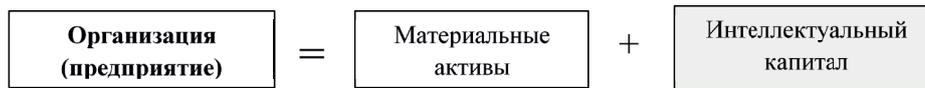


Рис. 4. Сущность интеллектуального капитала [4].

Структура интеллектуального капитала организации, представленная Э. Брукинг, состоит из четырех частей: рыночные активы, интеллектуальная собственность как актив, человеческие и инфраструктурные активы (рис. 5).

Рыночные активы – это нематериальные активы, связанные с рыночными операциями, которые обеспечивают компании конкурентные преимущества во внешней среде. Собственность, которая приобретена как результат умственной деятельности и защищена законодательно, считается интеллектуальной. Интеллектуальная собственность как актив (интеллектуальные активы) являются важной составляющей успеха любой компании, особенно компании, производящей технически сложную или инновационную продукцию. Человеческие активы (качества, присущие людям) – это совокупность коллективных знаний сотрудников организации, их творческих способностей, умений решать проблемы, лидерских качеств, предпринимательских и управленческих навыков. Под инфраструктурными активами подразумеваются технологии, методы и процессы, которые делают работу организации вообще возможной, они формируют среду, в которой сотрудники организации работают и общаются друг с другом [4].



Рис. 5. Структура интеллектуального капитала организации [4].

Так же, как и Э. Брукинг, Даниел Андрессен и Рене Тиссен признают, что в современном мире главным ключом к успеху в бизнесе являются нематериальные активы [5]. Авторы выделяют пять групп нематериальных активов (intangible assets), представленных на рис. 6.

В состав ценных ресурсов и приобретений входят: сложившаяся клиентская база, торговая марка и имидж, сеть поставщиков, интеллектуальный потенциал, обладание

стандартами. В качестве первичных процессов и процессов управления рассматриваются: руководство и контроль, обмен информацией и управленческая информация. Навыки и неформализованные знания включают: ноу-хау и сферы компетенции, а технология и формализованные знания – патенты, руководства и процедуры. К области общих моральных ценностей относится ориентация на потребителя, надежность, качество и др.



Рис. 6. Пять групп нематериальных активов [5].

Навыки и неформализованные знания являются скорее активами человека. Постоянно увеличивается число компаний, которые стараются управлять формализованными знаниями и активно их использовать. Способность превратить свой интеллектуальный капитал в источник дохода становится важнейшим условием успеха. Значительный объем знаний заложен и в первичных (основополагающих) процессах. Планирование ресурсов предприятия позволяет работникам пользоваться этим интеллектуальным капиталом, и богатые на знания компании все чаще к нему прибегают. Процессы управления также могут иметь решающее значение для создания корпоративной культуры, учитывающей особую роль знаний.

В связи с мировым признанием Японии страной с высокоразвитой промышленностью, где ведущими отраслями являются высокотехнологичные и наукоемкие отрасли, заслуживает внимания и «японский взгляд» на проблему интеллектуального капитала. Эксперты в области бизнеса Икуджиро Нонака и Хиротака Такеучи, описывая общую модель создания организационного знания, наглядно демонстрируют достижения успехов японскими компаниями благодаря их навыку и опыту в создании организационного знания [6]. Способность компании как единого целого создавать новое знание, распространять его по организации и воплощать в продукции, услугах и системах и есть авторское понимание сути создания организационного знания. В основе их теории лежит универсальный компонент организации – человеческое знание. Бизнес-организация не только использует знание, но и создает его. И. Нонака и Х. Такеучи предлагают разделение человеческого знания на два типа (рис. 7) [6].



Рис. 7. Типы человеческого знания [6].

Более важная роль, по мнению авторов [6], принадлежит второму типу знания – неформализованному знанию. Именно оно и является наиболее важным компонентом коллективного человеческого поведения. И тот, и другой типы знания рассматриваются в качестве взаимодополняющих компонентов, а их взаимодействие образует основу стимулирования создания знания организацией – некий процесс, развивающийся по спирали.

Своеобразную позицию в отношении понимания интеллектуального капитала можно отметить у Хервига Фридага и Вальтера Шмидта: интеллектуальный капитал – это совокупность духовных и материальных потенциалов (возможностей и способностей), находящихся в распоряжении организации [7]. Потенциалы организации могут быть:

- в сотрудниках, работающих в компании (знаниях и навыках сотрудников, культуре общения);
- в людях, связанных с компанией – способе установления взаимоотношений и общения с партнерами (клиентами, поставщиками, инвесторами) и доступе к их знаниям и навыкам;
- в структурах компании: потенциале машин, оборудования, материалов, средств связи и организационных структур;
- в используемых компанией общественных ресурсах: системе образования, сети Интернет, окружающей среде, которые также содержат потенциал [7].

Необходимо указать также на разнообразие используемых взаимозаменяемых терминов: «интеллектуальные активы», «нематериальные активы», «неосязаемый капитал» и др. В связи с этим целесообразно уделить внимание подходу Уэнди Букович и Руфь Уилльямс, которые уже в предисловии к своей книге «Управление знаниями: руководство к действию» [8] объясняют использование различных терминов. Термин «активы, базирующиеся на знаниях» (knowledge based assets) для определения всех без исключения активов, из которых организации извлекают стоимость, они намеренно заменили терминами «капитал знаний» (knowledge capital) или «интеллектуальный капитал». Поясняется эта замена так: термином «актив» называется любое «нечто», находящееся в собственности организации, но многие из наиболее важных источников стоимости для организации – ее

работники и знания, которые находятся в их головах, – никогда не станут собственностью организации.

Интеллектуальный капитал, или знания (у У. Букович и Р. Уильямс это взаимозаменяемые понятия) – это все, что имеет стоимость для организации и заключено в работающих в ней людях или возникает из производственных процессов, систем или организационной культуры [8]. Интеллектуальный капитал включает: знания и навыки конкретных людей, нормы и системы ценностей, базы данных, методологии, программное обеспечение, производственный опыт (ноу-хау), лицензии, бренды, торговые секреты и т.д. Ко многим компонентам интеллектуального капитала следует подходить как к арендованным, взятым в лизинг, или заемным активам.

Отечественные ученые в своих суждениях о сущности понятия «интеллектуальный капитал» и его структуре придерживаются несколько иной точки зрения, хотя многие опираются на разработки зарубежных коллег. Так, в книге Бориса Борисовича Леонтьева дается такое определение интеллектуального капитала того или иного субъекта [9]: это стоимость совокупности имеющихся у него интеллектуальных активов, включая интеллектуальную собственность, его природные и приобретенные интеллектуальные способности и навыки, а также накопленные им базы знаний и полезные отношения с другими субъектами. Главная функция интеллектуального капитала состоит в его способности существенно ускорять прирост массы прибыли за счет формирования и реализации необходимых предприятию систем знаний, вещей и отношений, которые обеспечивают его высокоэффективную хозяйственную деятельность. Составной частью интеллектуального капитала является интеллектуальная собственность. В отличие от интеллектуальных способностей, которые сложно выразить цифрами, единицами измерения, интеллектуальная собственность может быть оценена и практически использована. Интеллектуальный капитал – это не просто хорошие мозги, но и, как результат, хорошие технические и художественные решения. Это система капитальных устойчивых интеллектуальных преимуществ данной организации или фирмы на рынке [9].

В отличие от метафоры Л. Эдвинссона и М. Мэлоуна, показывающей значение интеллектуального капитала для организации, представленной в виде дерева (рис. 1), наш соотечественник Б.Б. Леонтьев предлагает сравнение, основанное на принципе подобия условий существования живой природы условиям существования бизнеса: три вида капитала соответствуют трем физическим состояниям вещества (рис. 8).

Природа и бизнес существуют только при сочетании в окружающей среде трех агрегатных состояний вещества и капитала.

Физический капитал – это материальные активы и другие ценности, способные приносить прибавочную стоимость; финансовый капитал – депозиты его обладателей и на их основе финансовые и денежные потоки, обеспечивающие его наращивание (денежные средства, чеки, аккредитивы, переводы, акции и др.); интеллектуальный капитал составляет основу любого предприятия и является его ведущим капиталом. Его можно видеть и оценивать, но нельзя взять в руки. Это самый деликатный вид капитала и самый капризный.

Еще одна точка зрения отечественных практиков на определение рассматриваемого понятия и соотношение понятий «интеллектуальный капитал», «интеллектуальная соб-

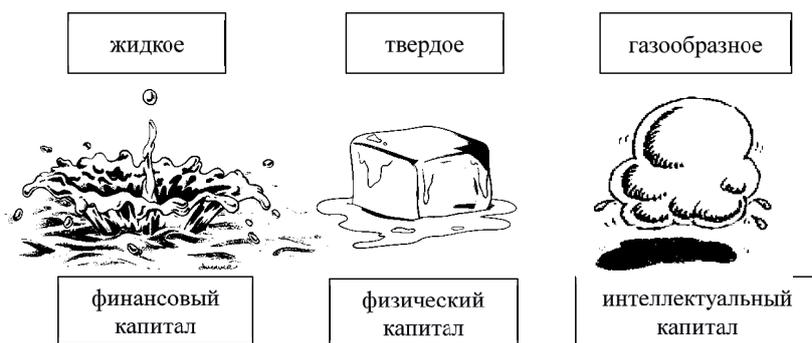


Рис. 8. Три вида капитала в бизнесе [9].

ственность» и «нематериальные активы» изложена в книге «Управление знаниями. Как превратить знания в капитал» [10]. Интеллектуальный капитал коммерческой организации – это совокупность знаний, опыта, информации, квалификации и мотивации персонала, организационных возможностей, каналов и технологий коммуникации, способная создавать добавленную стоимость и обеспечивающая конкурентные преимущества организации на рынке (рис. 9). Авторы указывают на способность интеллектуального капитала включать в свой состав нематериальные активы, у которых «отмечается» способность включать в свой состав интеллектуальную собственность.



Рис. 9. Соотношение понятий «интеллектуальный капитал», «интеллектуальная собственность» и «нематериальные активы» [10].

Подводя итог вышеизложенному, можно сказать, что при всем разнообразии концепций интеллектуального капитала практически все авторы сходятся во мнении о том, что интеллектуальный капитал – это, прежде всего, знания, которыми обладает организация (и соответственно, все ее работники).

В связи с большим разбросом мнений относительно рассматриваемого понятия предпринята попытка дать авторское определение на основе подробного рассмотрения таких дефиниций, как «интеллект», «интеллектуальный» и «капитал» по отдельности [11]: интеллектуальный капитал – это стоимость нематериальных активов (знаний, умений, навыков, опыта), создаваемых интеллектуальным трудом¹. Именно *создаваемых* (а не

¹Интеллектуальный труд – труд, при осуществлении которого рабочим органом, создающим продукт, является мозг, преобладают затраты умственной энергии, продуктом труда является изложенная на бумаге мысль (идея), для передачи другим или воплощенная в чем-то (на полотне, в мраморе, ноу-хау и т.д.). Интеллектуальный труд в значительной степени носит творческий характер (источник: Экономический словарь / Отв. ред. А.И. Архипов. М.: РГ-Пресс, 2017. С. 266).

созданных), так как его накопление продолжается в течение всей жизни человека (в том числе, и в процессе его трудовой деятельности). Интеллектуальный капитал можно назвать продуктом интеллектуальной деятельности человека.

Подходы к оценке интеллектуального капитала организации. Среди основных подходов к оценке интеллектуального капитала можно рассмотреть подходы Т. Стюарта, Э. Брукинг, Б.Б. Леонтьева. Интерес к ним вызван тем, что их можно модифицировать и использовать для оценки интеллектуального капитала в соответствии со специфическими особенностями деятельности каждой конкретной организации.

Так, например, Т. Стюарт утверждает, что «человеческий, структурный и потребительский капитал не имеет вещественной формы, а отражает знания как источник богатства – и в то же время касается вещей, которые деловые люди могут потрогать и даже заключить в объятия» [3, с. 307]. Автор предлагает способы измерения нематериальных активов в соответствии с такими областями, как:

1) интеллектуальный капитал в целом – подсчитать разницу между рыночной оценкой компании и учетной стоимостью основных фондов, но при этом для достоверности показателей надо смотреть не на абсолютную величину, а на соотношение двух величин (для сравнения однотипных компаний или финансовых показателей одной и той же компании за разные годы), рассчитать коэффициент Тобина и использовать метод расчетной стоимости нематериальных активов (CIV);

2) человеческий капитал – критерии оценки: инновации, отношение сотрудников к работе, трудовой стаж, текучесть кадров, опыт, учеба, изучение качественных характеристик (по предложенному Т. Стюартом списку в его книге [3]) и банк знаний (научные разработки, умения и навыки, списки потребителей, профессиональное мастерство и т.п.);

3) структурный капитал – критерии оценки: оценка банков знаний, оборачиваемость оборотного капитала, бремя бюрократии (определяется, не препятствуют ли организационные системы взаимодействию работников компании и потребителей), стоимость конторской работы;

4) потребительский капитал – способы оценки: удовлетворенность клиента, выгода от сотрудничества, «стоимость» постоянного потребителя.

В итоге Т. Стюарт предлагает для оценки использовать навигатор интеллектуального капитала (рис. 10).

Параметры (радиусы): 1 – обновляемость операторов знаний; 2 – доля новой продукции в общем объеме продаж; 3 – отношение сотрудников к работе; 4 – расчетная стоимость замены базы данных; 5 – оборачиваемость оборотного капитала; 6 – отношение продаж к продажам наукоемкой продукции, общие и административные расходы; 7 – удовлетворенность потребителей; 8 – верность торговой марке; 9 – процент удержания потребителей. Поперечные черточки на линиях – шкалы, которые могут быть разными: одна шкала отражает проценты, вторая – абсолютные величины, третья – соотношения и т.д. Оценка интеллектуального капитала с помощью навигатора предполагает отметку на осях искомым показателем и соединение их линиями. Таким образом, внутри полученного многоугольника содержится «информация» о том, что «вы имеете, а за его пределами – то, что хотели бы иметь» [3, с. 339].

Уникальность навигатора Т. Стюарта состоит в том, что он отражает не только полученные результаты проведенной оценки интеллектуального капитала, но и указывает



Рис. 10. Навигатор интеллектуального капитала [3].

направление, в котором организации необходимо развиваться, а также выявляет «аномалии», требующие немедленного изучения [3, с. 340]. Перечисленные выше параметры можно менять в зависимости от определяемых для каждой конкретной организации критериев оценки интеллектуального капитала в соответствии со спецификой ее деятельности.

В свою очередь, Э. Брукинг предлагает составить *общую* картину интеллектуального капитала организации. Для этого автор рекомендует по совокупности методов оценки активов, входящих в структуру интеллектуального капитала, проводить аудит² интеллектуального капитала и рассматривает его оценку в бухгалтерском смысле для того, чтобы помочь понять ценность компании, оценить ее успех и развитие, найти основу для поиска средств и получения займов и пр. Для составления общей картины интеллектуального капитала Э. Брукинг рекомендует «активы интеллектуального капитала и средние значения их индексов наносить на «мишень» [4, с. 184–185] (рис. 11).



Рис. 11. Общая картина интеллектуального капитала [4].

²Общий аудит интеллектуального капитала подразумевает рассмотрение нематериальных активов компании, их документальное оформление, фиксирование состояния на текущий момент и, если возможно, подсчет их стоимости» [4, с. 127].

Пятерка в «мишени» обозначает индексы с высокими значениями, каждому номеру соответствует цвет. «Мишень» конструируется для каждой категории активов, а каждый актив отображается в соответствующем круге, исходя из среднего значения индекса активов, с помощью маленьких (менее важные активы) и больших (важные активы) точек.

Отметим, что Э. Брукинг солидарна с позицией Т. Стюарта в том, что способы оценки интеллектуального капитала зависят от целей организации и состояния рынка. Она указывает также на необходимость разработки процедуры оценки для каждой организации, основанной на учете того, какой аспект интеллектуального капитала для нее важен в данный момент [4].

Б.Б. Леонтьев [9] рассматривает оценку такой составной части интеллектуального капитала, как интеллектуальная собственность. При оценке интеллектуальной собственности, как одного из видов нематериальных активов, автор предлагает изучить функциональные возможности объекта интеллектуальной собственности, что позволит прогнозировать – с определенной степенью достоверности – ожидаемую через 3-4 года прибыль от его практического использования. Именно на этой основе он предлагает рассчитать условно-рыночную стоимость интеллектуальной собственности.

В России нематериальные активы в большинстве случаев оцениваются на основе трех подходов с учетом используемого в их рамках набора методов [9]:

1) затратного – стоимость актива оценивается по затратам, необходимым для его воспроизводства или замены с вычетом обоснованной поправки на начисленный износ (временной или моральный) актива;

2) сравнительного – применим условно; полноценные сравнительные методы могут быть использованы при наличии у покупателя выбора нематериальных активов из числа других подобных и при возможности выбора продавца нематериальных активов наиболее интересных для него покупателей;

3) доходного – установление причинной связи между функциональными свойствами нематериального актива, используемого в конкретной технологии, и будущими доходами от использования данного актива в хозяйственной деятельности [9].

В заключение необходимо подчеркнуть, что такое понятие, как «интеллектуальный капитал» очень трудно рассматривать однозначно и трудно предложить единообразные методы его оценки в силу специфики деятельности разных организаций. Поэтому существуют и разные концепции интеллектуального капитала, которые, несомненно, будут разрабатываться дальше.

Рассматриваемые в статье подходы к оценке интеллектуального капитала рекомендуются использовать в качестве основы для оценки интеллектуального капитала организации. При этом стоит учесть, что большинство методов оценки интеллектуального капитала основаны на интуиции, эрудиции (совокупности знаний, умений и навыков оценивающего) и опыте оценщика (эксперта) и имеют сравнительный характер: в ходе оценки происходит сравнение интеллектуального капитала разных работников.

До настоящего времени утверждается, что интеллектуальный капитал трудно эффективно использовать, отчасти в связи с тем, что он не принадлежит полностью организации (не находится полностью в собственности организации). Однако сегодня важно отметить авангардную роль интеллектуального капитала в современном производстве, особенно, в наукоемком и высокотехнологичном секторах экономики, а также необходимость разработки вопросов, связанных с его содержанием и оценкой.

Литература:

1. Гэлбрейт Д.К. Новое индустриальное общество. Избранное. М.: Эксмо, 2008. 1200 с.
2. Эдвинссон Л., Мэлоун М. Интеллектуальный капитал. Определение истинной стоимости компании // Новая постиндустриальная волна на Западе. Антология / Под ред. В.Л. Иноземцева. М.: Academia, 1999. С. 429–447.
3. Стюарт Т.А. Интеллектуальный капитал. Новый источник богатства организаций: пер. с англ. В.А. Ноздриной. М.: Поколение, 2007. 368 с.
4. Брукинг Э. Интеллектуальный капитал: пер. с англ. / Под ред. Л.Н. Ковалик. СПб.: Питер, 2001. 288 с.
5. Андриссен Д., Тиссен Р. Невесомое богатство. Как определить реальную стоимость вашей компании в будущем мире нематериальных активов. М.: Олимп-Бизнес, 2004. 304 с.
6. Нонака И., Takeuchi Х. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах: пер. с англ. А. Трактинского. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2011. 384 с.
7. Фридаг Х.Р., Шмидт В. Сбалансированная система показателей: пер. с нем. М.В. Лапшинова. М.: Омега-Л, 2006. 144 с.
8. Букович У., Уильямс Р. Управление знаниями: руководство к действию: пер. с англ. М.: ИНФРА-М, 2002. 504 с.
9. Леонтьев Б.Б. Цена интеллекта. Интеллектуальный капитал в российском бизнесе. М.: Издательский центр «Акционер», 2002. 196 с.
10. Гапоненко А.Л., Орлова Т.М. Управление знаниями. Как превратить знания в капитал. М.: Эксмо, 2008. 400 с.
11. Надточий Ю.Б. Определение сущности и структуры интеллектуального капитала высшего учебного заведения // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2017. № 10 (ч. 1). С. 66–69.

References:

1. Galbraith D.K. The New Industrial Society. Selected works: transl. from English. Moscow: Eksmo Publ., 2008. 1200 p. (in Russ.).
2. Edvinsson L., Malone M. Intellectual Capital. Realizing Your Company's True Value by Finding Its Hidden Roots. In: New Post-Industrial Wave in the West. Anthology. Ed. by V.L. Inozemtsev. Moscow: Academia Publ., 1999. P. 429–447. (in Russ.).
3. Stewart T.A. Intellectual Capital. The New Wealth of Organizations: transl. from English. Moscow: Pokolenie Publ., 2007. 368 p. (in Russ.).
4. Brooking A. Intellectual Capital: transl. from English. Ed. by L.N. Kovalik. Saint-Petersburg: Piter Publ., 2001. 288 p. (in Russ.).
5. Andriszen D., Thiessen R. Weightless Wealth: Find Your Real Value in a Future of Intangible Assets. Moscow: Olimp-Biznes Publ., 2004. 304 p. (in Russ.).
6. Nonaka I., Takeuchi H. The company is the creator of knowledge. Origin and development of innovation in Japanese firms: transl. from English by A. Traktinsky. Moscow: Olimp-Biznes Publ., 2011. 384 p. (in Russ.).
7. Friedag H.R., Schmidt W. Balanced Scorecard: transl. from German by M.V. Lapshinov.

Moscow: Omega-L Publ., 2006. 144 p. (in Russ.).

8. Bukowitz W., Williams R. Knowledge Management: A Guide to Action: transl. from English. Moscow: INFRA-M. Publ., 2002. 504 p. (in Russ.).

9. Leontiev B.B. The Price of Intelligence. Intellectual Capital in Russian Business. Moscow: Publishing Center "Aktzioner", 2002. 196 p. (in Russ.).

10. Gaponenko A.L., Orlova T.M. Knowledge Management. How to Turn Knowledge into Capital. Moscow: Eksmo Publ., 2008. 400 p. (in Russ.).

11. Nadtochy Yu.B. Definition of essence and structure of intellectual capital of a higher educational institution // Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tehnologii (Competitiveness in the Global World: Economy, Science, Technology). 2017. № 10 (part 1). P. 66–69. (in Russ.).

Об авторах:

Надточий Юлия Борисовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры экономики и инновационного предпринимательства Института экономики и права ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Будович Лидия Сергеевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и инновационного предпринимательства Института экономики и права ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20).

About the authors:

Yuliya B. Nadtochiy, Ph.D. (Pedagogy), Associate Professor, Chair of Economics and Innovative Entrepreneurship, Institute of Economics and Law, Moscow Technological University (20, Stromynka St., Moscow 107076, Russia).

Lidiya S. Budovich, Ph.D. (Economics), Associate Professor, Chair of Economics and Innovative Entrepreneurship, Institute of Economics and Law, Moscow Technological University (20, Stromynka St., Moscow 107076, Russia).

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № *ФС77-65315* от 12 апреля 2016 г.

Дата опубликования *30 марта 2018 г.*

Московский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj.mirea.ru>