

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, 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

Карнаков В.В. Директор Института комплексной безопасности и специального приборостроения Московского технологического университета, к.т.н., e-mail: karnakov_vv@mgupr.ru

Кимель А.В. К.ф.-м.н., Университет г. Наймеген (Нидерланды), 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@mgupr.ru

Кузнецов В.В. И.о. Директора 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 управления и стратегического развития организаций Московского технологического университета, к.э.н., e-mail: mylnikova@mirea.ru

Перно Филипп. Проректор по научной работе Высшей инженерной школы, профессор, г. Лилль, Франция

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

Савиных В.П. Президент МИИГАиК, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, e-mail: president@miigaik.ru

Скотт Джеймс. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет г. Кембридж, Великобритания, e-mail: jamescott@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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Голованова Н.Б., Сороко А.В.

Личный кабинет как элемент информационной системы статистики образования **3**

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Заикин Б.А.

Линейная фильтрация выходных данных в охранной однопозиционной системе **13**

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

***Пасечник С.В., Шмелева Д.В., Торчинская А.В., Семина О.А.,
Дюкин А.А.***

Метод затухающего потока в реологии полимерных пористых пленок, заполненных жидкими кристаллами **25**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Джемесюк И.А., Горбунов С.Г.

Математическое моделирование влияния релаксационных процессов на температурные поля в упругом полупространстве **40**

Карлов В.Д.

Новые функциональные соотношения для линейных реологических моделей Максвелла и Кельвина-Фогта **51**

Пастухова С.Е., Евсеева О.А.

Асимптотика решения уравнения диффузии в периодической среде на больших временах и ее применение к оценкам усреднения **60**

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

Бодрова Е.В., Калинов В.В.

Государственная научно-техническая политика в период «оттепели»: прорывы и причины торможения модернизации **70**

Сухорукова С.М., Погорелый А.М.

Биосферный подход к теории экономического роста **86**

УДК 004.9:35

ЛИЧНЫЙ КАБИНЕТ КАК ЭЛЕМЕНТ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТАТИСТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ

**Н.Б. Голованова[@],
А.В. Сороко**

Московский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: Golovanova@mirea.ru

Статья посвящена вопросам применения информационных технологий в организации современной статистики образования, охарактеризованы основные направления модернизации статистического инструментария, обусловленной изменениями, произошедшими в российской системе образования. Дана оценка значимости создания информационной системы статистики, ее роли в формировании информационных ресурсов государственного управления в сфере образования. Раскрыты функции Министерства образования и науки РФ как субъекта официального статистического учета, выделены направления развития организационно-технологической составляющей информационной системы статистики образования, которая непосредственно связана с внедрением более развитых технических средств сбора, обработки и передачи данных, повышением уровня автоматизации решения статистических задач, в частности, введение в состав элементов информационной системы личного кабинета. Обоснована целесообразность использования иерархического подхода при построении информационной системы статистики образования, охарактеризованы концептуальные основы создания личных кабинетов. Они базируются на иерархической структуре российской системы образования и в полной мере обеспечивают решение задачи перехода на пообъектный статистический учет. Сформулированы функции личных кабинетов с учетом статуса участника информационной системы и дана краткая характеристика технологии сбора статистической информации с использованием личного кабинета.

Ключевые слова: информационные ресурсы, информационная система, федеральное статистическое наблюдение, система образования, личный кабинет, функции личных кабинетов.

PERSONAL ACCOUNT AS AN ELEMENT OF INFORMATION SYSTEM OF STATISTICS EDUCATION

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

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: Golovanova@mirea.ru

The article is devoted to the application of information technology in the organization of modern statistics education. The main trends of modernization of statistical instruments due to the changes in the Russian education system are described. The importance of statistics information system creation and its role in the formation of information resources for state management in the field of education are evaluated. The functions of the Ministry of education and science of the Russian Federation as a subject of official statistical registration are shown. Directions of the development of the organizational and technological component of the information system for statistics education are described. This is directly related to the implementation of more advanced technical means for gathering, processing and transfer of data, increase of the automation level for solving statistical tasks, in particular, the introduction of information system elements such as personal account. The appropriateness of the hierarchical approach in the construction of the statistical information system of education is proven. The conceptual basis for the creation of personal accounts is characterized. It is based on the hierarchical structure of the Russian education system and fully provides the solution of the problem of transfer to item-by-item statistics. The author defines the functions of private accounts with consideration for the status of each participant of the information system and presents brief characteristics of technologies for gathering statistical information using the personal account.

Keywords: information resources, information system, federal statistical observation, education system, personal account, functions of personal accounts.

Государственное управление сегодня является неотъемлемой частью любой социально-экономической системы. Трудно найти такую сферу современного общества и его жизнедеятельности, которую в той или иной степени, прямо или очень опосредованно не касалось бы государственное управление. В зависимости от целого ряда факторов оно может иметь разные границы, масштабы, осуществляться в различных формах и с использованием различных методов и инструментов.

С точки зрения современных представлений о роли государства, образование является той сферой, где государственное вмешательство объективно необходимо. Роль образования на современном этапе развития нашей страны чрезвычайно велика и определяется задачами перехода России к демократическому обществу, к правовому государству, задачами преодоления накапливающегося отставания России от мировых тенденций экономического и общественного развития и формирования развитой высокотехнологичной рыночной экономики. Неслучайно образование признано одним из приоритетов российского общества и государства.

Очевидно, что достижение поставленных в сфере образования целей развития и, прежде всего, модернизация образования и повышение его качества, выполнение органами государственной власти возложенных на них полномочий в сфере образования, возможности оперативного принятия обоснованных управленческих решений и разработки планов и программ стратегического развития российского образования, а в конечном счете, повышение эффективности государственного управления в сфере образования, непосредственно связано с качеством информационного обеспечения государственного управления. В свою очередь, качество информационного обеспечения достигается путем создания, хранения и поддержки в актуальном состоянии информационных ресурсов (как государственных, так и негосударственных). Оно зависит от наличия и эффектив-

ного функционирования организационных структур, реализующих информационные процессы, в частности, сбор, обработку, хранение, распространение, поиск и передачу информации, а также наличия программно-технических средств и информационных систем и технологий, обеспечивающих для потенциальных потребителей доступ к информационным ресурсам.

Одной из основных форм организации информационных ресурсов является информационная система, которая представляет собой организационно-упорядоченную совокупность документов (массивов документов) и информационных технологий, в том числе, с использованием средств вычислительной техники и связи, реализующих информационные процессы [1].

В соответствии с законом «Об образовании в Российской Федерации» в системе образования и государственной регламентации образовательной деятельности создаются государственные информационные системы [2, с. 129–131], целью создания и функционирования которых является сбор (накопление), хранение, обработка и передача информации, потребность в которой возникает в процессе принятия решений по вопросам функционирования и развития системы образования. Как указано в тексте Закона, основным назначением информационных систем в системе образования является информационное обеспечение. К числу государственных информационных систем, необходимость ведения которых зафиксирована в Федеральном законе «Об образовании в Российской Федерации» (статья 98), относятся федеральная информационная система проведения государственной итоговой аттестации; информационная система «Реестр организаций, осуществляющих образовательную деятельность по имеющим государственную аккредитацию образовательным программам»; государственная информационная система государственного надзора в сфере образования и ряд других.

Важное место в комплексе государственных информационных систем принадлежит информационной системе статистики образования. Ее основой служит государственная статистика образования.

Статистика образования в нашей стране прошла долгий путь становления и развития и уже долгие годы является одним из элементов системы государственной статистики. Как информационный ресурс, статистика образования всегда формировалась с учетом институциональных особенностей системы образования и потребностей государственного управления. И поэтому вполне закономерно, что сложившаяся в условиях административно-командной экономики статистика образования в новых, рыночных, условиях не могла достаточно эффективно выполнять функции информационного обеспечения принятия решений.

Произошедшие в сфере образования изменения потребовали модернизации статистического инструментария, которая началась еще в конце 90-х годов XX века и одним из основных направлений которой стала унификация статистического наблюдения. В числе основных задач унификации следует назвать:

- внедрение пообъектного учета и сбора статистических данных для всех уровней образования, при котором единицей наблюдения является организация, осуществляющая образовательную деятельность;
- разработку и внедрение единых для организаций всех уровней образования унифицированных форм Федерального статистического наблюдения (ФСН);

- установление единых для всех уровней образования периодов наблюдения, позволяющих получать сведения: начало учебного года – для получения данных по таким ключевым вопросам деятельности образовательных организаций, как общие сведения об организации, контингент обучающихся, кадровый потенциал, и отчетный год – для получения сведений о материально-технической базе и социальной инфраструктуре образовательной организации, сведения о финансово-экономической деятельности, что обеспечивает выполнение одного из важнейших принципов статистики – сопоставимости по времени;

- реализацию единого подхода при проведении преобразования первичной статистической информации, позволяющего в последующем осуществлять аналитическую разработку данных по формам ФСН по единой методологии формирования выходной информации и получение сводных показателей в различных разрезах.

Новые условия функционирования, новые задачи, стоящие перед статистикой образования, потребовали не только модернизации статистического инструментария, но и поиска новых подходов к организации статистики образования, эффективных технологий сбора и передачи данных, хранения собранной информации, разработки методики ее анализа, способов распространения информации и организации доступа к данным.

До 2011 г. основная часть официальной статистической информации о функционировании системы образования и ее развитии формировалась в виде статистической отчетности, организацией которой занимался специальный государственный орган, ответственный за сбор статистики. С 2011/2012 уч. года в соответствии с разделом 22 Федерального плана статистических работ (утвержден распоряжением Правительства РФ от 06.05.2008 № 671-р) субъектом официального статистического учета в сфере общего, среднего профессионального и высшего образования, а также дополнительного образования детей стало Министерство образования и науки РФ [3]. В функции Минобрнауки России как субъекта официального статистического учета в сфере образования вошло обеспечение статистического наблюдения за организациями всех форм собственности, всех типов и видов, реализующих соответствующие образовательные программы, формирование показателей для оценки эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации в рассматриваемой сфере деятельности.

Ключевое значение Министерства образования и науки РФ как субъекта официального статистического учета проявляется, прежде всего, в организации и проведении Федерального статистического наблюдения в сфере образования. В отличие от других источников информации, данные, получаемые в результате ФСН, отличаются более высокой достоверностью, формализованностью представления в виде статистических показателей (что упрощает проведение аналитической разработки данных), полнотой и комплексностью собираемых сведений; высокой репрезентативностью, обеспечиваемой сплошным охватом единиц объекта наблюдения. В совокупности это и определяет большую значимость и ценность статистического наблюдения как информационного ресурса и как основы информационного обеспечения государственного управления.

Одной из первоочередных задач, поставленных Министерством образования и науки РФ как субъектом официального статистического учета, стало создание информационной системы статистики образования, которая позволила бы не только обеспечить все уровни

управления образованием необходимой, актуальной информацией о текущем состоянии системы образования на всех ее уровнях, но и интегрировать статистику образования в общую систему государственной статистики. Указанное обстоятельство открывает широкие аналитические возможности использования данных статистики образования не только в описательных целях, но и для серьезной аналитической работы с использованием данных демографической статистики, результатов переписей населения, данных обследования домохозяйств и пр.

Информационная система статистики образования – это совокупность актуальной информации о функционировании системы образования, информационных технологий и технических средств, обеспечивающих обработку информации, а также пользователей. Информационная система статистики образования должна осуществлять:

- ввод информации из внешних или внутренних источников;
- обработку входной информации;
- вывод информации для представления ее потребителям в удобном виде или передачи в другую систему;
- обязательную обратную связь для коррекции входной информации.

Пользователями информационной системы статистики образования являются Министерство образования и науки Российской Федерации, органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации, осуществляющие государственное управление в сфере образования, органы местного самоуправления, а также иные структуры, заинтересованные в получении статистической информации.

Очевидно, что эффективное выполнение функций субъекта официального статистического учета и как следствие – повышение качества информационного обеспечения государственного управления в сфере образования возможно при условии синхронизации модернизации программно-методологических и организационно-технологических изменений, которая реализуется посредством совершенствования информационной системы статистики образования.

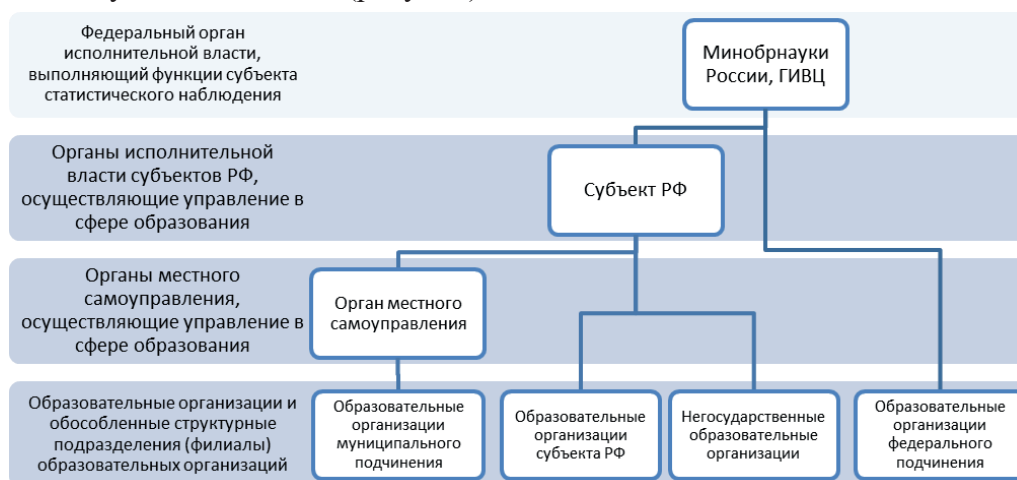
Процесс совершенствования организационно-технологической составляющей информационной системы непосредственно связан с внедрением более развитых технических средств сбора, обработки и передачи данных, повышением уровня автоматизации решения статистических задач. Одним из проявлений модернизации информационной системы статистики образования стало введение личных кабинетов.

Личный кабинет – это закрытая часть информационной системы статистики образования, необходимая для организации сбора сведений по каждой организации, участвующей в процессе сбора информации по формам ФСН через данную систему, в которой оператором выступает Главный информационно-вычислительный центр (ГИВЦ), являющийся структурным подразделением Московского технологического университета. Доступ к личному кабинету осуществляется для каждого пользователя с использованием уникальной пары «логин-пароль» через специальный раздел сайта ГИВЦ в сети Интернет.

Концепция создания личных кабинетов как части информационной системы статистики образования базируется на иерархической структуре российской системы образования и в полной мере обеспечивает решение задачи перехода на пообъектный учет. С учетом зафиксированной в законе «Об образовании в Российской Федерации» структуры управления в сфере образования создаются:

- личный кабинет уровня организации, реализующей образовательные программы (общего образования, среднего профессионального и высшего образования);
- личный кабинет уровня административно-территориального образования;
- личный кабинет уровня субъекта Российской Федерации;
- личный кабинет федерального уровня.

В соответствии с выбранным подходом на текущий момент в информационной системе статистики образования созданы личные кабинеты для каждого субъекта РФ, около 2500 личных кабинетов административно-территориальных образований (АТО) и более 52000 личных кабинетов для объектов наблюдения – организаций, осуществляющих образовательную деятельность (рисунок).



Иерархия в информационной системе статистики образования.

Таким образом, в совокупности информационная система статистики образования включает порядка 55000 личных кабинетов для организаций различных уровней, имеющих свое определенное место и роль в системе образования, от которых зависят их права и возможности как пользователей личным кабинетом.

Роли и возможности пользователей личных кабинетов различных уровней определяются иерархической структурой системы, в рамках которой обеспечивается персонализированный доступ к информации, программному обеспечению и сервисам. Следовательно, наибольшими возможностями для работы в системе обладают пользователи личных кабинетов федерального уровня, а наименьшими – пользователи личных кабинетов образовательных организаций.

Как элемент информационной системы и инструментальное средство, личные кабинеты выполняют следующие общие функции:

- обеспечение взаимодействия между участниками сбора сведений по формам ФСН;
- обеспечение возможности оперативного предоставления статистических данных в соответствии с Федеральным планом статистических работ;
- контроль полноты и достоверности предоставляемых статистических сведений;
- обеспечение возможности получения сводной информации по выбранным показателям.

Вместе с тем, в зависимости от уровня объекта наблюдения перечень частных функций личных кабинетов различен (табл. 1).

Таблица 1. Функции личных кабинетов в информационной системе статистики образования

Пользователь личного кабинета	Функции личного кабинета
Личный кабинет образовательной организации	• доведение до образовательной организации официальной информации Министерства образования и науки РФ; • санкционированный доступ для заполнения сведений в режиме «on-line»; • предоставление доступа к программному обеспечению, необходимому для предоставления статистических отчетов; • возможность загрузки статистических отчетов; • просмотр предоставленных статистических отчетов; • просмотр статусов предоставленных статистических отчетов.
Личный кабинет органа управления образованием субъекта Российской Федерации	• доведение до органа управления образованием субъекта Российской Федерации официальной информации Министерства образования и науки Российской Федерации; • санкционированный доступ для заполнения сведений в режиме «on-line»; • контроль над ходом сбора сведений по статистическим отчетам от образовательных организаций субъекта.
Личный кабинет федерального органа исполнительной власти	• доведение до федерального органа исполнительной власти официальной информации Министерства образования и науки РФ; • санкционированный доступ для заполнения сведений в режиме «on-line».

Объект каждого уровня иерархии имеет паспорт, содержащий ключевые признаки объекта. Наибольшее количество атрибутов имеет паспорт образовательной организации, который включает 26 атрибутов: код образовательной организации; ОКПО; ИНН; КПП; полное и краткое наименование организации; адрес и телефоны; электронный адрес; фамилия, имя, отчество руководителя организации; номер лицензии на право ведения образовательной деятельности; реквизиты свидетельства государственной аккредитации образовательных программ и ряд других. Например, по уровню общего образования в связи с большим количеством образовательных организаций и в целях сохранения достоверности информации на должном уровне паспорт каждой организации отдан в управление учредителю образовательной организации. В частности, паспорта школ регионального подчинения и паспорта органов управления образованием муниципального уровня, а также паспорта негосударственных организаций создаются и поддерживаются в актуальном состоянии органом управления образованием соответствующего субъекта РФ; паспорта образовательных организаций муниципального уровня создают и ведут органы управления образованием муниципального уровня. Паспорта образовательных организаций федерального подчинения заполняются централизованно на федеральном уровне. В функции вышестоящих организаций входит также прием (утверждение) отчетов от образовательных организаций. В личных кабинетах образовательных организаций доступна только возможность работы с формами ФСН: получение программного обеспечения для заполнения форм ФСН, загрузка заполненных отчетов по формам ФСН, хранение отчетов по закрытым сборам.

Среди личных кабинетов информационной системы статистики образования роль первичных играют личные кабинеты образовательных организаций. Именно в личный кабинет данного типа производится загрузка отчетов по формам ФСН, содержащим показатели, характеризующие различные аспекты деятельности образовательных ор-

ганизаций общего образования, среднего профессионального и высшего образования. Основные характеристики форм статистической отчетности в рамках Федерального статистического наблюдения сферы образования представлены в табл. 2. Личные кабинеты образовательных организаций в зависимости от уровня образования организованы в различных разделах веб-сайта ГИВЦ по адресу www.miccedu.ru.

Таблица 2. Характеристики форм Федерального статистического наблюдения

Форма ФСН	Число разделов	Число показателей	Число формул арифметического и логического контроля	Число единиц наблюдения (образовательных организаций)
№ ОО-1	74	26973	16282	47590
№ ОО-2	17	928	398	42248
№ 1-ОД	10	721	329	2
№ 1-ДО	12	902	428	209
№ 1-ДО (сводная)	19	4499	3571	85
№ Д-13	18	2838	2369	85
№ 1-НД	2	560	428	85
№ 103-РИК	5	1162	1167	85
№ ВПО-1	28	5855	более 1500	1658
№ СПО-1	26	6265	более 1500	5010
№ ВПО-2	17	1617	более 500	1607
№ СПО-2	16	1617	более 500	4077

Сбор статистической информации начинается по письмам Министерства образования и науки РФ об открытии сбора данных. После заполнения и обработки образовательной организацией отчетов по формам ФСН происходит загрузка файлов с данными отчетов в личные кабинеты. На этапе сбора и верификации при пообъектному учете статистическую информацию предоставляют только образовательные организации. Все отличные от них типы пользователей осуществляют контроль за достоверностью и своевременностью предоставления статистических данных по всем объектам наблюдения, относящимся к их территории. Шаблон формы предоставляется в зависимости от уровня образования и формы ФСН для каждой образовательной организации либо в формате электронных таблиц Microsoft Excel, либо в форме специализированного программного обеспечения для заполнения и предварительного контроля вносимых сведений. Шаблон может быть получен в личном кабинете информационной системы.

После заполнения документа пользователь загружает его на сервер через личный кабинет информационной системы в формате, определяемом письмом Минобрнауки России, согласно порядку предоставления сведений, уникальному для каждого уровня образования, и получает отчет о проверке документа по формулам логического и арифметического контроля, которые встроены в информационную систему на всем пути прохождения статистической информации. Одновременно с заполнением электронной версии образовательная организация распечатывает печатную версию отчета по форме ФСН, которая сначала сверяется с электронной версией, а в последующем - хранится в ГИВЦ.

Помимо функции личного кабинета как окна, через которое производится загрузка форм статистической отчетности и их заполнение, он является инструментом, с помо-

щью которого реализуются информационные запросы органов управления образованием различного уровня. Действующая информационная система позволяет гибко, используя различные критерии отбора, формировать отчеты по показателям разных форм статистической отчетности. При этом критерии отбора могут быть заранее обусловленными, либо использоваться в различных комбинациях и разрезах. Среди основных направлений аналитической разработки материалов статистической отчетности: построение сводных таблиц в разрезе Российской Федерации; в разрезе субъектов Федерации; по типу и месту расположения образовательных организаций; по форме собственности и статусу организации; по уровню подчинения и многим другим. Столь широкий диапазон разработки материалов позволяет органам управления в сфере образования получать самую разнообразную информацию о деятельности образовательных организациях и состоянии системы образования.

Реализуемый на данном этапе функционал личных кабинетов информационной системы статистики образования имеет возможность расширения. Для дальнейшего развития функциональности личных кабинетов необходима разработка более сложного программного обеспечения. В числе первоочередных задач:

1. Совершенствование методов контроля входной информации;
2. Разработка механизмов и инструментов интеграции данных информационных систем региональных систем образования в единую информационную систему статистики образования;
3. Расширение возможностей аналитической разработки не только в направлении увеличения критериев и разрезов сводки, но и возможностей вычисления различных аналитических показателей.

В заключение следует еще раз отметить, что информационные системы, функционирующие в системе образования, представляют собой важнейшее средство информационного взаимодействия всех основных участников развития российского образования. Данные системы динамично развиваются, интенсивно наращивая возможности сбора, автоматизированной обработки, передачи и анализа статистической информации, включая расширение возможностей предоставления доступа к такой информации. Постоянно развиваясь, они становятся самостоятельным и вместе с тем неотъемлемым сегментом единого информационного пространства России, способствуя совершенствованию информационного обеспечения органов государственного управления.

Литература:

1. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информатизации и защите информации» (с изменениями и дополнениями). www.base.garant.ru/12148555.
2. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации». М: Проспект, 2013. 160 с.
3. Распоряжение Правительства РФ от 6 мая 2008 г. № 671-р «Об утверждении Федерального плана статистических работ (с изменениями и дополнениями). <http://base.garant.ru/6388294>.

References:

1. Federal Law of July 27, 2006 № 149-FZ "On information, Informatization and Information Protection" (with changes and additions). www.base.garant.ru/12148555.

2. Federal Law "On education in Russian Federation". Moscow: Prospekt, 2013. – 160 p.
3. The decree of the RF Government of 6 may 2008 N 671-R "On approval of the Federal plan of statistical works (with changes and additions) <http://base.garant.ru/6388294>.

Об авторах:

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

Сороко Андрей Викторович, доктор экономических наук, заведующий кафедрой информационных технологий в государственном управлении Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About authors:

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

Andrey V. Soroko, D. Sc. (Economics), Head of the Chair of Information Technologies in Public Administration, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

УДК 621.396.99

ЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ В ОХРАННОЙ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Б.А. Заикин

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: halfmazerkin@gmail.com

Статья посвящена оценке качества фильтрации выходных данных в охранной однопозиционной системе. Обоснована актуальность проблемы и предложен подход к описанию оценки качества фильтрации. Приведено геометрическое построение охранной однопозиционной системы, её математическое описание и модель в виде марковской последовательности, описывающей движение объекта наблюдения. Для заданной системы даны соотношения, позволяющие определить оценки параметров радиосигналов, а также результаты оценивания выходных данных α - β фильтром, фильтром Винера и фильтром Калмана. Описано определение критерия качества процесса фильтрации, параметры моделирования системы и результаты моделирования. Предложенный критерий качества фильтрации включает выборочное среднее, исправленную выборочную дисперсию и исправленное выборочное среднеквадратическое отклонение ошибок и расстояния между истинными и оцененными значениями координат объекта наблюдения. Установлено, что качество фильтрации улучшается с увеличением отношения сигнал/шум и ширины спектра зондирующего сигнала. Показана наибольшая эффективность фильтра Калмана среди перечисленных выше.

Ключевые слова: линейная фильтрация, фильтр Калмана, фильтр Винера, α - β фильтр, оценка качества фильтрации, охранная система.

LINEAR FILTERING OF OUTPUT DATA OF A SINGLE-POSITION SECURITY SYSTEM

B.A. Zaikin

Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: halfmazerkin@gmail.com

Obtaining an estimation of the filtering quality of a single-position security system is described in the paper. A general description of problems of estimation of filtering quality in the system is presented in the introduction. A geometric construction of a single-position security system, its mathematical description and formulas of Markov sequence that describes the motion of an object under observation are given. Descriptions of the processes of estimation with the use of α - β filtering, Wiener filtering, Kalman filtering for the system are presented.

A definition of estimation describes criteria for the quality of filtering process, parameters for modeling the system and the results of the modeling. The suggested criteria for the quality of filtering process include average, variance and standard deviation of filtering errors and interval between the true and filtering values. Initial values for the modeling and the results of the modeling are presented. In conclusion, the filtering improves with increasing spectral width of probing signal and signal/noise ratio. However, Kalman filtering is most effective.

Keywords: linear filtering, Kalman filter, Wiener filter, α - β filter, estimating the quality of filtering, security system.

Введение

Задачи получения оценок параметров радиосигналов и фильтрации выходных данных в радиолокационных системах являются одними из ключевых в радиотехнике. Они формулируются следующим образом: по принятой реализации сигнала необходимо определить значение параметра сигнала с минимальной погрешностью. Что касается фильтрации наблюдаемых параметров, то эта проблема более общая и сложная: предполагается, что оцениваемый параметр наблюдения может меняться во времени, и он также подлежит определению с минимальной погрешностью в течение заданного интервала времени. В радиотехнике указанные задачи нередко дополняют друг друга, причем возможно выбрать такие интервалы наблюдения, при которых измеряемый параметр считается постоянным, и на таких интервалах производят оценку параметра. Далее, объединяя такие интервалы (траекторная обработка), используют различные методы фильтрации. Существует множество подходов к реализации процедур оценки и фильтрации [1–4], однако они дают выражения только в общем виде, а конкретных характеристик качества фильтрации при заданном характере изменения измеряемых параметров и самой технической системы – не дают. Таким образом, возникает задача оценки качества фильтрации в некоторой конкретной радиолокационной системе при использовании различных типов фильтрации.

В настоящей работе рассмотрена охранная однопозиционная система, которая посылает сигнал до объекта наблюдения (ОН) и принимает эхосигнал. Соответственно, принятый эхосигнал зависит от местоположения и характера движения ОН. В качестве модели движения ОН предложена марковская последовательность.

1. Охранная однопозиционная система и объект наблюдения

Как уже отмечалось выше, охранная система представляет собой однопозиционную радиосистему, которая в импульсном режиме облучает ОН и принимает эхосигнал. Она изображена на рис. 1. Система измеряет временную задержку распространения импульсного сигнала τ от охранной системы до объекта и пеленг β , которые, в свою очередь, зависят от положения ОН в декартовой системе координат X и Y . Отсюда можно записать следующие формулы связи между измеряемыми параметрами и координатами ОН при приеме v -го импульса:

$$R^{(v)} = \frac{\tau^{(v)}c}{2}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} R^{(v)} = \sqrt{x^{(v)^2} + y^{(v)^2}}, \\ \beta^{(v)} = \arctg\left(\frac{y^{(v)}}{x^{(v)}}\right), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x^{(v)} = R^{(v)} \cos(\beta^{(v)}) \\ y^{(v)} = R^{(v)} \sin(\beta^{(v)}) \end{cases} \quad (3)$$

где $R^{(v)}$ – расстояние от охранной системы до объекта в v -ый момент времени;
 c – скорость распространения радиоволны.

Отметим также, что в общем случае выражение для пеленга в (2) должно зависеть от того, в каком квадранте находится ОН. В нашем случае подразумевается, что объект находится в первом квадранте (рис. 1).

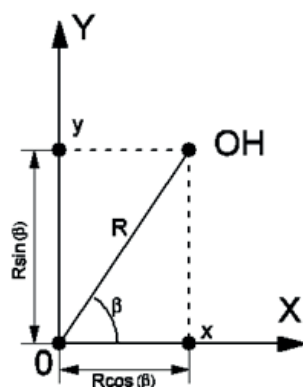


Рис. 1. Геометрическое построение охранной однопозиционной системы.

В качестве модели передвижения объекта наблюдения нами предложена марковская последовательность:

$$\vec{\Lambda}^{(v)} = \Phi^{(v)} \vec{\Lambda}^{(v-1)} + B \vec{N}^{(v)}, \quad (4)$$

где $\vec{\Lambda}^{(v)}$ – вектор состояния ОН на v -ом интервале;

$\Phi^{(v)}$ – матрица перехода от $(v-1)$ -го к v -ому состоянию;

B – матрица диффузии;

$\vec{\Lambda}^{(v-1)}$ – вектор состояния на предыдущем шаге;

$\vec{N}^{(v)}$ – реализация гауссовского случайного вектора с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

В рассматриваемом случае $\vec{\Lambda}^{(v)} = [x^{(v)} \ y^{(v)}]^T$, $\vec{\Lambda}^{(v-1)} = [x^{(v-1)} \ y^{(v-1)}]^T$.

Предположим также, что имеем дело с маломаневренным объектом (например, автомобилем) и $\Phi^{(v)} = I$. Отсюда получаем:

$$\vec{\Lambda}^{(v)} = \vec{\Lambda}^{(v-1)} + B \vec{N}^{(v)}, \quad (5)$$

или в скалярном виде

$$\begin{cases} x^{(v)} = x^{(v-1)} + 3b_x n_{b_x}^{(v)}, \\ y^{(v)} = y^{(v-1)} + 3b_y n_{b_y}^{(v)}, \end{cases} \quad (6)$$

где b_x, b_y – среднеквадратические отклонения (СКО) изменения координат за один такт;
 $n_{b_x}^{(v)}, n_{b_y}^{(v)}$ – гауссовские случайные величины.

Коэффициент 3 в системе уравнений (6) означает, что случайные величины $x^{(v)}, y^{(v)}$ попадают в интервалы $\pm 3b_x, \pm 3b_y$.

2. Получение оценки и фильтрация

Несмотря на то, что в данной работе изменение объекта происходит в декартовой системе координат, подвергаться оцениванию будут первичные параметры, а именно временная задержка $\tau^{(v)}$ и пеленг $\beta^{(v)}$ сигнала (которые образуют вектор $\vec{Q}^{(v)} = [\tau^{(v)} \beta^{(v)}]^T$) с дальнейшим их переводом в декартову систему координат. Как было указано выше, сначала происходит оценка параметра за интервал наблюдения, в течение которого ОН считается неподвижным. Интервал наблюдения будем считать равным одному импульсу. Оценка по одиночному импульсу может быть записана как:

$$\begin{cases} \hat{\tau}_{od}^{(v)} = \tau^{(v)} + 3\sigma_\tau n_{\sigma_\tau}^{(v)}, \\ \hat{\beta}_{od}^{(v)} = \beta^{(v)} + 3\sigma_\beta n_{\sigma_\beta}^{(v)}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\sigma_\tau, \sigma_\beta$ – среднеквадратичные отклонения измерения временной задержки и пеленга, $n_{\sigma_\tau}^{(v)}, n_{\sigma_\beta}^{(v)}$ – гауссовские случайные величины.

Полученные таким образом оценки подвергаются фильтрации. Коэффициент 3 в системе (7) предполагает, что случайные величины $\hat{\tau}_{od}^{(v)}, \hat{\beta}_{od}^{(v)}$ попадают в интервалы $\pm 3\sigma_\tau, \pm 3\sigma_\beta$. Рассмотрим некоторые виды линейных фильтров [5].

α - β фильтр. Данный тип фильтрации подразумевает в общем виде отдельное оценивание координатного параметра (в выражениях фигурирует переменный коэффициент α) и скорости изменения координатного параметра (фигурирует коэффициент β). Под координатными параметрами подразумеваются непосредственно координаты объекта, а также связанные с ним временные задержки, пеленги и пр. Поскольку в рассматриваемой задаче нас интересуют координаты цели, рассмотрим только уравнение фильтрации координатного параметра:

$$\hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v)} = \hat{Q}_3^{(v)} + \alpha(Z^{(v)} - H^{(v)}\hat{Q}_3^{(v-1)}) \quad (8)$$

где $\hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v)}$ – оценённые параметры на текущем шаге;

α – коэффициент фильтрации;

$Z^{(v)}$ – значения измеряемых величин на текущем шаге;

$H^{(v)}$ – матрица, определяющая связь измеряемых величин $Z^{(v)}$ и параметров $Q^{(v)}$ на текущем шаге;

$\hat{Q}_3^{(v)}$ – экстраполяционные (прогнозируемые) оцененные значения параметров на предыдущем шаге.

Матрица $\hat{Q}_3^{(v)}$ может быть вычислена, как:

$$\hat{Q}_3^{(v)} = \Phi_3^{(v)} \hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v-1)}, \quad (9)$$

где $\Phi_3^{(v)}$ – экстраполируемая матрица перехода;

$\hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v-1)}$ – значение оцененного параметра на предыдущем шаге.

В ряде работ было показано, что хорошие показатели оценивания можно получить, если выбирать параметр α в зависимости от номера такта оценивания [5]:

$$\alpha = \frac{2(2v-1)}{v(v+1)}. \quad (10)$$

Уравнения (8) в случае рассматриваемых системы и объекта примут следующий вид:

$$\begin{cases} \hat{z}_{\alpha-\beta}^{(v)} = \hat{z}_{\alpha-\beta}^{(v-1)} + \alpha \left(\hat{z}_{od}^{(v)} - \hat{z}_{\alpha-\beta}^{(v-1)} \right), \\ \hat{\beta}_{\alpha-\beta}^{(v)} = \hat{\beta}_{\alpha-\beta}^{(v-1)} + \alpha \left(\hat{\beta}_{od}^{(v)} - \hat{\beta}_{\alpha-\beta}^{(v-1)} \right), \end{cases} \quad (11)$$

Фильтр Винера. Основное уравнение оценивания с использованием фильтра Винера имеет вид:

$$\hat{Q}_{Wiener}^{(v)} = \hat{Q}_3^{(v)} + K_0 \left(Z^{(v)} - H^{(v)} \hat{Q}_3^{(v-1)} \right) \quad (12)$$

где K_0 – вектор постоянных коэффициентов усиления.

Этот вектор можно вычислить заранее. Матрица $\hat{Q}_3^{(v)}$ вычисляется согласно (9), путем подстановки фильтруемых значений из (12). В рассматриваемом нами случае выражения фильтрации (12) представим в виде:

$$\begin{cases} \hat{z}_{Wiener}^{(v)} = \hat{z}_{Wiener}^{(v-1)} + K_0 \left(\hat{z}_{od}^{(v)} - \hat{z}_{Wiener}^{(v-1)} \right), \\ \hat{\beta}_{Wiener}^{(v)} = \hat{\beta}_{Wiener}^{(v-1)} + K_0 \left(\hat{\beta}_{od}^{(v)} - \hat{\beta}_{Wiener}^{(v-1)} \right), \end{cases} \quad (13)$$

Фильтр Калмана. Основное уравнение оценивания с использованием фильтра Калмана представляется в виде:

$$\hat{Q}_{Kalman}^{(v)} = \hat{Q}_3^{(v)} + K_f^{(v)} \left(Z^{(v)} - H^{(v)} \hat{Q}_3^{(v-1)} \right) \quad (14)$$

где матрица $\hat{Q}_3^{(v)}$ вычисляется согласно (9), путем подстановки фильтруемых значений из (14); $K_f^{(v)}$ – матрица коэффициентов усиления фильтра, равная

$$K_f^{(v)} = K_3^{(v)} + H^{(v)T} \left(H^{(v)} K_3^{(v)} H^{(v)T} + K_q \right). \quad (15)$$

В (15) K_q – ковариационная матрица измерения, $K_9^{(v)}$ – экстраполяционная ковариационная матрица погрешности оценки вектора состояния, которая вычисляется, как:

$$K_9^{(v)} = \Phi_9^{(v)} K_{q\text{ Kalm}}^{(v-1)} \Phi_9^{(v-1)T} + B_q^{(v)}, \quad (16)$$

где $B_q^{(v)}$ – ковариационная матрица, характеризующая стохастическое движение ОН;

$K_{q\text{ Kalm}}^{(v-1)}$ – ковариационная матрица погрешности оценки вектора состояния на предыдущем шаге.

Соответственно, ковариационная матрица оценки вектора состояния на текущем шаге имеет следующий вид:

$$K_{q\text{ Kalm}}^{(v)} = K_9^{(v)} - K_f^{(v)} H^{(v)} K_9^{(v)}. \quad (17)$$

В случае однопозиционной охранной системы уравнения (14) записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{\tau}_{\text{Kalm}}^{(v)} = \hat{\tau}_{\text{Kalm}}^{(v-1)} + K_f^{(v)}(11) \left(\hat{\tau}_{od}^{(v)} - \hat{\tau}_{\text{Kalm}}^{(v-1)} \right) + K_f^{(v)}(12) \left(\hat{\tau}_{od}^{(v)} - \hat{\tau}_{\text{Kalm}}^{(v-1)} \right) \\ \hat{\beta}_{\text{Kalm}}^{(v)} = \hat{\beta}_{\text{Kalm}}^{(v-1)} + K_f^{(v)}(21) \left(\hat{\beta}_{od}^{(v)} - \hat{\beta}_{\text{Kalm}}^{(v-1)} \right) + K_f^{(v)}(22) \left(\hat{\beta}_{od}^{(v)} - \hat{\beta}_{\text{Kalm}}^{(v-1)} \right) \end{cases} \quad (18)$$

где $K_f^{(v)}(11)$, $K_f^{(v)}(12)$, $K_f^{(v)}(21)$, $K_f^{(v)}(22)$ – элементы матрицы (15), которая в нашем случае выглядит так:

$$K_f^{(v)} = \begin{bmatrix} K_f^{(v)}(11) & K_f^{(v)}(12) \\ K_f^{(v)}(21) & K_f^{(v)}(22) \end{bmatrix} = K_9^{(v)} [K_9^{(v)} + K_q]^{-1}. \quad (19)$$

При этом:

$$K_q = \begin{bmatrix} \sigma_\tau^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

Матрица $K_9^{(v)}$ вычисляется здесь в виде:

$$K_9^{(v)} = K_{q\text{ Kalm}}^{(v-1)} + B_q^{(v)}. \quad (21)$$

Матрица $B_q^{(v)}$ имеет некоторую специфику при вычислении, связанную с тем, что ОН движется в декартовой системе координат, причем фильтрация происходит в полярной системе координат. Поэтому необходимо на каждом шаге пересчитывать ковариационную матрицу:

$$B_q^{(v)} = W_{q\lambda} B B^T W_{q\lambda}^T, \quad (22)$$

где B – матрица диффузии из (4):

$$BB^T = \begin{bmatrix} b_x^2 & 0 \\ 0 & b_y^2 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Матрица $W_{q\lambda}$ – матрица первых частных производных первичных параметров по координатам в точке экстраполяции на v -ом шаге:

$$W_{q\lambda} = \begin{bmatrix} \frac{d\tau}{dx} & \frac{d\tau}{dy} \\ \frac{d\beta}{dx} & \frac{d\beta}{dy} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Найдем первые частные производные. Из (1) и (2) получаем:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{2x}{c\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (25)$$

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{2y}{c\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (26)$$

$$\frac{d\beta}{dx} = -\frac{y}{x^2 + y^2}, \quad (27)$$

$$\frac{d\beta}{dy} = \frac{x}{x^2 + y^2}. \quad (28)$$

В конце каждой итерации вычисляется матрица (17), которая в рассматриваемом случае примет вид:

$$K_{q\text{Kalm}}^{(v)} = K_g^{(v)} - K_f^{(v)} K_g^{(v)}. \quad (29)$$

3. Моделирование

Для моделирования необходимо задаться конкретными параметрами рассматриваемой системы, а также определить эффективные критерии оценки качества фильтрации.

Критерии качества фильтрации. В качестве простейшей оценки можно взять точечную ошибку по каждой координате:

$$\begin{cases} e_x^{(v)} = x^{(v)} - \hat{x}_\phi^{(v)}, \\ e_y^{(v)} = y^{(v)} - \hat{y}_\phi^{(v)}, \end{cases} \quad (30)$$

где в качестве $\hat{x}_\phi^{(v)}$, $\hat{y}_\phi^{(v)}$ могут выступать $\hat{x}_{\alpha-\beta}^{(v)}$, $\hat{x}_{Wiener}^{(v)}$, $\hat{x}_{Kalman}^{(v)}$ и $\hat{y}_{\alpha-\beta}^{(v)}$, $\hat{y}_{Wiener}^{(v)}$, $\hat{y}_{Kalman}^{(v)}$, соответственно.

Чтобы дать обобщённую оценку ошибки фильтрации, целесообразно рассмотреть расстояние между истинными значениями координат и значениями, полученными в результате фильтрации:

$$d^{(v)} = \sqrt{\left(x^{(v)} - \hat{x}_{\phi}^{(v)}\right)^2 + \left(y^{(v)} - \hat{y}_{\phi}^{(v)}\right)^2}. \quad (31)$$

Ввиду того, что величины (30) и (31) являются случайными, для численных оценок качества фильтрации возьмем числовые характеристики статистических распределений – выборочное среднее, исправленная выборочная дисперсия и исправленное выборочное среднеквадратическое отклонение [6]:

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n z^{(v)}, \quad (32)$$

$$D_z = \frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n \left(z^{(v)} - \bar{z}\right)^2, \quad (33)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n \left(z^{(v)} - \bar{z}\right)^2}. \quad (34)$$

В (32) – (34) в качестве z могут выступать либо точечные ошибки (30), либо расстояние (31). Суммы в (32) – (34) обычно ограничиваются n – числом импульсов за время наблюдения.

Среднеквадратические отклонения измерений временной задержки и пеленга (СКО). СКО измерения задержки σ_{τ} могут быть рассчитаны по формуле потенциальной точности [5]:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\Delta f_c \sqrt{\frac{2E}{N_0}}}, \quad (35)$$

где Δf – ширина спектра эхосигнала;

$\frac{2E}{N_0}$ – энергетическое отношение сигнал к шуму.

СКО измерения пеленга σ_{β} определим в соответствии с [7]. В антенной решетке для карандашного луча количество излучающих элементов N связано с шириной луча θ на уровне 0.5 по мощности выражением:

$$\theta \approx \frac{100}{\sqrt{N}}. \quad (36)$$

С помощью (36), согласно графикам, которые были построены П. Сверлингом [7], найдем σ_{β} . График представляет собой зависимость величины $\sigma_{\beta} \frac{\sqrt{N}}{\theta}$ от отношение сигнал/шум (ОСШ) в дБ для флуктуирующей и нефлуктуирующей цели. Следовательно, задаваясь числом излучающих элементов N , можно определить σ_{β} для различных ОСШ.

Параметры охранной системы и объекта наблюдения. Зададимся некоторыми конкретными исходными параметрами охранной двухпозиционной радиосистемы координатометрии и объекта наблюдения. В процессе моделирования будем менять некоторые из них, оценивая при этом показатели качества и, таким образом, определяя влияние конкретного параметра на эти показатели качества.

Период следования импульсов брали равным $T_c = 0.001$ с. При этом время наблюдения было ограничено $t_{набл.} = 1$ с, и, соответственно, ограничено количество тактов $n = 1000$. Ширина спектра зондирующего сигнала составила 1 ГГц, а ОСШ = 0 дБ. Отсюда среднеквадратическое отклонение составило $\sigma_\tau = 10^{-9}$ с. Размеры антенной решетки брали 10 на 10 элементов, так что общее число $N = 100$. Значения σ_β принимали одинаковыми и равными 0.9 градусов. Начальные координаты объекта наблюдения выбирали из условия, что ОН в начальный момент находится на расстоянии $R^{(1)} = 1500$ м от охранной системы, а угол $\beta^{(1)} = 45^\circ$. Следовательно, начальные координаты ОН по осям X, Y составили $x^{(1)} = y^{(1)} = 1061$ м. СКО траекторных флуктуаций за интервал наблюдения 1 с (соизмеримый с интервалом корреляции) считали одинаковыми и равными $b_x = b_y = 1$ м. Таким образом, получаем СКО флуктуаций траектории за один такт $b_{xT_c} = b_{yT_c} = 0.001$ м.

Полученные результаты

На рис. 2 приведены графики расстояния между истинным значением и оценёнными значениями (31) в зависимости от времени при фильтрации различными фильтрами с использованием указанных выше параметров. Для всех типов фильтрации взяты одинаковые исходные данные движения ОН.

Остальные результаты моделирования представлены в виде таблицы. В ней указывается тип фильтрации; после чего следует параметр охранной системы или ОН, значение которого было изменено, при этом остальные параметры соответствуют типовому значению; затем следуют полученные численные оценки (32)–(34). Данные получены как усреднённый показатель по 10 реализациям.

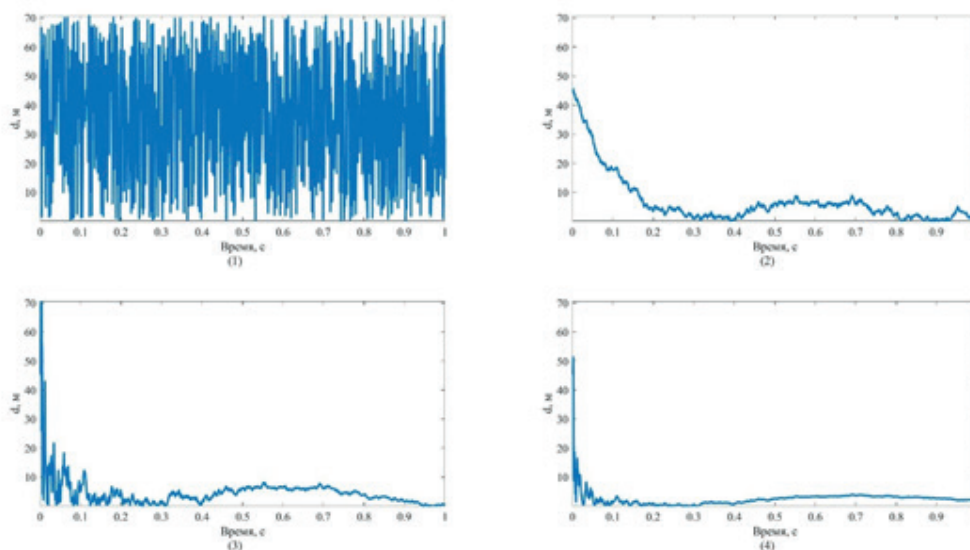


Рис. 2. Результаты работы различных типов фильтрации при одинаковых исходных параметрах.

- (1) – СКО при оценке; (2) – СКО при фильтрации Винера при $K_0 = 0.01$;
(3) – СКО при $\alpha - \beta$ фильтрации; (4) – СКО при фильтрации Калмана.

Численные оценки качества фильтрации для различных типов фильтрации

Тип фильтрации	Параметр, м	$\bar{d}$, м	D_{e_x} , м ²	D_{e_y} , м ²	D_d , м ²	σ_{e_x} , м	σ_{e_y} , м	σ_d , м
Без фильтрации	-	35.46	835.09	835.32	412.86	28.90	28.90	20.32
Винера	$K_0 = 0.01$	5.71	49.49	50.02	86.75	6.61	6.63	8.68
$\alpha - \beta$	-	2.83	29.27	29.32	50.93	5.21	5.22	6.84
Калмана	-	1.69	5.25	5.23	9.83	2.20	2.20	2.99
Винера	$K_0 = 0.001$	25.81	35.28	36.00	71.26	5.15	5.21	7.33
Винера	$K_0 = 0.0001$	36.84	0.72	0.76	1.47	0.74	0.76	1.06
Винера	$K_0 = 0.1$	7.71	45.54	45.67	33.57	6.73	6.74	5.77
Без фильтрации	ОСШ = 3 дБ	23.60	371.18	371.07	185.40	19.26	19.26	13.61
$\alpha - \beta$	ОСШ = 3 дБ	2.08	13.94	14.99	24.96	3.50	3.59	4.57
Калмана	ОСШ = 3 дБ	1.17	1.90	1.89	3.32	1.29	1.29	1.67
Без фильтрации	ОСШ = 5 дБ	17.58	206.24	206.30	103.67	14.36	14.36	10.18
$\alpha - \beta$	ОСШ = 5 дБ	1.67	8.28	8.36	14.62	2.71	2.73	3.55
Калмана	ОСШ = 5 дБ	1.41	1.63	1.61	2.80	1.24	1.24	1.62
Без фильтрации	$\Delta f_c = 3$ ГГц	34.89	813.88	813.79	410.59	28.53	28.52	20.26
$\alpha - \beta$	$\Delta f_c = 3$ ГГц	3.39	39.34	40.77	69.73	5.96	6.07	7.85
Калмана	$\Delta f_c = 3$ ГГц	2.35	5.12	5.11	8.87	2.21	2.21	2.90
Без фильтрации	$\Delta f_c = 5$ ГГц	35.65	841.95	841.30	413.53	29.02	29.00	20.33
$\alpha - \beta$	$\Delta f_c = 5$ ГГц	3.21	26.67	26.62	45.42	4.99	4.97	6.43
Калмана	$\Delta f_c = 5$ ГГц	2.25	4.51	4.53	7.56	2.06	2.07	2.67
Без фильтрации	$R^{(1)} = 1000$ м	23.73	372.87	372.69	182.34	19.31	19.30	13.50
$\alpha - \beta$	$R^{(1)} = 1000$ м	2.27	10.47	10.56	16.31	3.19	3.20	3.94
Калмана	$R^{(1)} = 1000$ м	1.35	2.31	2.24	3.79	1.41	1.39	1.77
Без фильтрации	$R^{(1)} = 2000$ м	46.89	1473.86	1473.18	748.47	38.39	38.38	27.35
$\alpha - \beta$	$R^{(1)} = 2000$ м	4.15	62.77	60.51	108.99	7.52	7.43	9.85
Калмана	$R^{(1)} = 2000$ м	3.25	9.59	9.47	17.54	3.02	3.01	4.04
Без фильтрации	$\beta^{(1)} = 85^\circ$	35.42	1659.76	13.06	418.40	40.74	3.61	20.45
$\alpha - \beta$	$\beta^{(1)} = 85^\circ$	3.47	71.02	1.03	61.67	8.05	0.89	7.42
Калмана	$\beta^{(1)} = 85^\circ$	2.01	10.11	0.08	8.37	3.06	0.28	2.76
Без фильтрации	$\beta^{(1)} = 15^\circ$	35.44	111.92	1553.50	409.37	10.58	39.41	20.23
$\alpha - \beta$	$\beta^{(1)} = 15^\circ$	3.06	4.61	55.22	52.94	2.04	7.17	6.95
Калмана	$\beta^{(1)} = 15^\circ$	2.30	0.62	8.20	8.18	0.75	2.76	2.74
Без фильтрации	$b_x = b_y = 5$ м	35.59	836.78	836.79	408.10	28.92	28.92	20.20
$\alpha - \beta$	$b_x = b_y = 5$ м	3.42	31.14	30.85	52.87	5.35	5.35	6.92
Калмана	$b_x = b_y = 5$ м	2.13	4.66	4.65	7.95	2.08	2.07	2.67
Без фильтрации	$b_x = b_y = 10$ м	35.21	826.89	827.22	414.94	28.75	28.76	20.37
$\alpha - \beta$	$b_x = b_y = 10$ м	3.47	28.38	27.68	45.83	5.10	5.06	6.39
Калмана	$b_x = b_y = 10$ м	2.45	7.09	7.11	12.51	2.59	2.59	3.41

Заключение

В статье определены выражения, позволяющие математически описать процесс оценивания вектора состояния маломаневренного объекта наблюдения в охранной однопозиционной системе с использованием линейных фильтров: $\alpha - \beta$, Винера и Калмана. Ука-

занные выражения позволяют выполнить моделирование с использованием программ математического моделирования. Получены численные оценки качества фильтрации вектора состояния с использованием указанных фильтров в случае их применения в охранной однопозиционной системе. Установлено, что качество фильтрации улучшалось с увеличением ширины спектра зондирующего сигнала и отношения сигнал/шум. При этом наиболее эффективным является оценивание с использованием фильтра Калмана.

Литература:

1. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С., Леховицкий Д.И., Лещенко С.П., Лосев Ю.И., Николаев А.И., Горшков С.А., Москвитин С.В., Орленко В.М. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Белорецкий Д.Л., Васинкин А.С., Зданович Ю.А., Королев А.Н., Котов А.Ф., Кузнецов А.М., Сошников И.А., Унгер А.Ю. Оптимизация обработки сигналов в разностно-доплеровской пассивной многофункциональной радиолокационной системе // Научный вестник МИРЭА. 2010. № 1(8). С. 4–10.
3. Азизов А.Г., Богадаров А.Ю., Заикин Б.А., Калиниченко М.Е., Котов А.Ф., Попонов П.В. Оценивание координат источников излучения в однобазовой МРЛС // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1(6). С. 73–81.
4. Заикин Б.А., Богадаров А.Ю., Котов А.Ф., Попонов П.В. Оценивание координат воздушной цели в дальномерной многопозиционной радиолокационной системе // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 2(11). С. 65–72.
5. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
6. Письменный Д.Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам. 3-е изд. М.: Айрис-пресс, 2008. 288 с.
7. Сколник М.И. [и др.] Справочник по радиолокации. Кн. 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.

References:

1. Shirman Ya.D., Bagdasaryan S.T., Malyarenko A.S., Lekhovitskiy D.I., Leschenko S.P., Losev Yu.I., Nikolaev A.I., Gorshkov S.A., Moskvitin S.V., Orlenko V.M. Radio electronic systems: Bases of making and theory. Handbook. Second edition. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2007. 512 p. (in Russ.)
2. Beloretskiy D.L., Vasinkin A.S., Zdanovich Yu.A., Korolev A.N., Kotov A.F., Soshnikov I.A., Unger A.Yu. Optimization of signal processing in differential Doppler passive multifunctional radar system // Nauchniy vestnik MGTU MIREA (Scientific Herald of MSTU MIREA). 2010. № 1 (8). P. 4–10. (in Russ.)
3. Azizov A.G., Bogadarov A.Yu., Zaikin B.A., Kalinichenko M.E., Kotov A.F., Poponov P.V. Estimating coordinates or radiation source in single-base multi radar station // Vestnik MGTU MIREA (Herald of MSTU MIREA). 2015. № 1(6). P. 73–81. (in Russ.)
4. Zaikin B.A., Bogadarov A.Yu., Kotov A.F., Poponov P.V. Evaluation of coordinates of air target in a two-position range measurement radar // Rossiyskiy technologicheskiy zhurnal

(Russian Technological Journal). 2016. V. 4. № 2(11). P. 66–72. (in Russ.)

5. Dudnik P.I., Kondratenkov G.S., Tatarskiy B.G., Il'chuk A.R., Gerasimov A.A. Aviation radar complexes and systems. Guide for listeners and cadets of University of Air force. Moscow: N.E. Zhukovskiy VVIA Publ., 2006 1112 p. (in Russ.)

6. Pismenniy D.T. Conspectus of lectures on probability theory, mathematical statistics and random processes. Third edition. Moscow: Iris-press Publ., 2008. 288 p. (in Russ.)

7. Skolnik M.I. [et al.] Radar Handbook. Book 1. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2014. 672 p. (in Russ.)

Об авторе:

Заикин Борис Александрович, аспирант кафедры теоретической радиотехники и радиофизики Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д.78).

About+ author:

Boris A. Zaikin, Postgraduate Student, Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Physics, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 53.092, 532.685

**МЕТОД ЗАТУХАЮЩЕГО ПОТОКА В РЕОЛОГИИ
ПОЛИМЕРНЫХ ПОРИСТЫХ ПЛЕНОК, ЗАПОЛНЕННЫХ
ЖИДКИМИ КРИСТАЛЛАМИ**

**С.В. Пасечник[@],
Д.В. Шмелева,
А.В. Торчинская,
О.А. Семина,
А.А. Дюкин**

*Московский технологический университет (Физико-технологический институт),
Москва 119454, Россия*

[@]Автор для переписки, e-mail: s-p-a-s-m@mail.ru

Выполнены исследования реологических свойств нематических жидких кристаллов (НЖК) – двухкомпонентной смеси из 2/3 частей *p-n*-бутил-*p*-метилоксиазоксибензола и 1/3 части *p-n*-бутил-*p*-гептаноилоксиазоксибензола (ЖК-440, МНПО «НИОПИК») и 4-циано-4'-пентилбифенил (5CB, Merck), заполняющих пористую полимерную (ПЭТФ) матрицу с субмикронными диаметрами пор. С использованием метода затухающего потока Пуазейля установлен ньютоновский характер потока и определены значения эффективных сдвиговых вязкостей НЖК для различных температур. Анализ экспериментальных данных выполнен с учетом влияния эффектов слабого поверхностного сцепления на ориентационную структуру жидких кристаллов. Полученные данные могут быть использованы для расчета рабочих характеристик жидкокристаллических устройств фотоники.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, пористая пленка, анизотропные сдвиговые вязкости, поток Пуазейля.

**METHOD OF DECAYING FLOW IN RHEOLOGY OF POLYMERIC
POROUS FILMS FILLED BY LIQUID CRYSTALS**

**S.V. Pasechnik[@],
D.V. Shmeliova,
A.V. Torchinskaya,
O.A. Semina,
A.A. Dyukin**

Moscow Technological University (Physico-Technological Institute), Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: s-p-a-s-m@mail.ru

The rheological properties of nematic liquid crystals (NLC) – a two-component mixture of 2/3 parts of *p-n*-butyl-*p*-methoxyazoxybenzene and 1/3 parts of *p-n*-butyl-*p*-heptanoylazoxybenzene (ZhK-440, NIOPIK) and 4-cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB, Merck) filling a porous polymer (PET) matrix with submicron pore diameters are studied. The experiments were fulfilled using the decaying Poiseuille flow arising in a polymer porous film of 23 μm thickness under the action of hydrostatic pressure gradient decreasing with time. In this case a polymer matrix can be considered as a number of cylindrical capillaries connected by a parallel schema. It results in an essential decrease in the hydrodynamic resistance of the system in comparison with the resistance of each capillary. The Newtonian nature of the flow was established, and the effective shear viscosities of NLC for different temperatures were determined. An analysis of the experimental data was carried out taking into account the effect of weak surface anchoring on the orientational structure of the liquid crystals. The data obtained can be used to calculate the technical characteristics of liquid crystal photonic devices.

Keywords: nematic liquid crystal, porous film, anisotropic shear viscosities, Poiseuille flow.

Жидкие кристаллы (ЖК) относятся к частично упорядоченным средам, характеризующимся промежуточным – относительно изотропных жидкостей и классических кристаллов – типом ориентационного и трансляционного упорядочения. Простейший класс таких сред, а именно нематические жидкие кристаллы (НЖК), отличаются от изотропных жидкостей только наличием дальнего ориентационного порядка, характеризуемого единичным вектором–директором $\mathbf{n}$, а также скалярным параметром порядка S . В то время как директор $\mathbf{n}$ совпадает со средним направлением длинных осей молекул, параметр порядка S характеризует среднюю степень отклонения отдельных осей молекул от директора $\mathbf{n}$. Значение параметра S изменяется от 0 в изотропной (I) фазе до 1 в идеально ориентированной нематической (N) фазе со скачкообразным изменением при температуре T_c фазового перехода нематический жидкий кристалл–изотропная жидкость. Следует подчеркнуть, что при описании некоторых явлений, таких, как, например, рассеяние света в изотропной фазе, приходится рассматривать тензор параметра порядка Q , который включает в себя среднее направление и степень ориентационного порядка [1]. Аналогичный подход применяется также для теоретического исследования некоторых композитных ЖК систем с сильными пространственными ограничениями [2]. К ним относятся и являющиеся предметом описанных ниже исследований пористые полимерные пленки, заполненные жидким кристаллом. Возможность управления оптическими свойствами данных материалов с помощью электрического поля и светового облучения [3, 4] делает их перспективными для использования в устройствах фотоники [5] и микрофлюидики [6]. Прогнозирование рабочих характеристик указанных устройств требует подробной информации о структуре и физических свойствах жидких кристаллов, находящихся в условиях субмикронных пространственных ограничений при которых возможна модификация как равновесных, так и неравновесных параметров жидких кристаллов. К неравновесным параметрам относятся, в частности, анизотропные сдвиговые вязкости ЖК, определяющие сложное реологическое поведение жидких кристаллов в сдвиговых течениях.

Несмотря на отсутствие дальнего порядка в расположении центров масс мезогенных молекул, их трансляционное движение в потоке, задаваемое полем скоростей $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$, свя-

зано с полем директора $\mathbf{n}(\mathbf{r}, t)$. Это приводит к ряду новых гидродинамических эффектов, таких, как ориентация НЖК потоком, зависимость эффективной сдвиговой вязкости от скорости потока (неньютоновское поведение), возникновение специфических гидродинамических неустойчивостей и обратного потока при быстром включении (выключении) электрического поля [7]. Последний эффект имеет практическое значение, так как он может определять существенные изменения в быстродействии жидкокристаллических устройств.

Теоретическое описание упомянутых выше явлений основывается на гидродинамической теории Лесли-Эриксона, которая включает в себя шесть диссипативных параметров (коэффициентов Лесли α_i), связанных одним уравнением. Различные комбинации этих параметров определяют три основных коэффициента сдвиговой вязкости (вязкости Мезовича η_i), соответствующие трем различным ориентациям директора относительно направления скорости потока $\mathbf{v}$ и градиента скорости $\nabla \mathbf{v}$ ($\mathbf{n} \perp \mathbf{v}$, $\mathbf{n} \parallel \nabla \mathbf{v} - \eta_1$; $\mathbf{n} \parallel \mathbf{v}$, $\mathbf{n} \perp \nabla \mathbf{v} - \eta_2$; $\mathbf{n} \perp \mathbf{v}$, $\mathbf{n} \perp \nabla \mathbf{v} - \eta_3$).

Классический метод экспериментального определения вязкостей Мезовича основан на использовании сильных магнитных полей, которые стабилизируют ориентацию НЖК, протекающего через плоский капилляр [8]. В этом случае жидкий кристалл ведет себя как анизотропная ньютоновская жидкость со сдвиговой вязкостью, зависящей от ориентации ЖК. В отличие от изотропных жидкостей, реологическое поведение НЖК в потоке Пуазейля через капилляры с круглым поперечным сечением является более сложным, чем для потоков через плоские капилляры. Тем не менее, ранние эксперименты такого типа обеспечили первую экспериментальную проверку теории Лесли-Эриксона [9]. В частности, предсказанное теорией существование универсальной зависимости эффективной сдвиговой вязкости от диаметра и объемной скорости потока $Q = dV/dT$ (V – перекачиваемый объем) было подтверждено экспериментами с потоком НЖК через капилляры разного диаметра при нормальной поверхностной ориентации жидкого кристалла. Стоит отметить, что детальное теоретическое описание указанных выше потоков возможно лишь путем численного решения нелинейных уравнений гидродинамики НЖК [10].

В описанных ниже экспериментах успешно использован метод затухающего потока Пуазейля, разработанный ранее для измерения вязкости НЖК, стабилизированных внутренними поверхностями плоских капилляров [7]. При этом полимерную пленку, заполненную жидким кристаллом, можно рассматривать как совокупность цилиндрических пор субмикронного диаметра. Отличительной особенностью такой структуры является возможность образования различных типов ориентационных конфигураций внутри поры, что может привести к различным значениям эффективной сдвиговой вязкости. Эффекты слабого поверхностного сцепления и влияние сильных ограничений на диссипативные параметры НЖК могут также иметь важное значение. В частности, условие сильного поверхностного сцепления, допустимое для стеклянных капилляров достаточно большого диаметра (порядка 100 мкм), безусловно, не подходит для пор субмикронных диаметров. Данный факт необходимо принимать во внимание при анализе результатов реологических исследований.

Затухающий поток в измерениях сдвиговой вязкости

В простейшем случае затухающий сдвиговой поток возникает в канале длины L под действием гидростатического градиента давления, который создается с помощью разно-

сти уровней ΔH в открытых трубках диаметра D , соединенных каналом (рис. 1). Поток создается за счет медленно уменьшающейся со временем мгновенной разности давления ΔP :

$$\Delta P(t) = \rho g \Delta H(t), \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Объемная скорость потока $Q = dV/dt$ одинакова в различных сечениях гидродинамического контура и может быть выражена следующим образом:

$$Q = (S/2)(d\Delta H/dt), \quad (2)$$

где $S = \pi D^2/4$ – поперечное сечение открытой трубки.

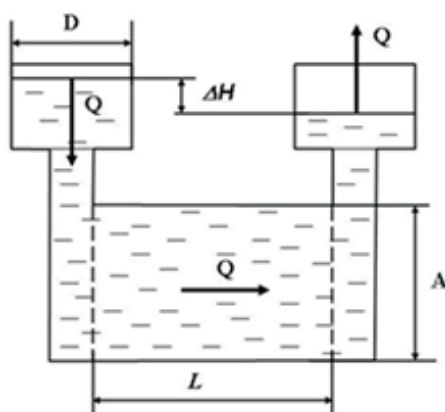


Рис. 1. Схема затухающего потока.

Очевидно, что необходимо определенное время для полного прекращения движения жидкости, которое зависит от эффективной сдвиговой вязкости $\eta_{эфф}$. В случае изотропной ньютоновской жидкости значение $\eta_{эфф}$ равно коэффициенту сдвиговой вязкости η и не зависит от скорости потока. При этом значение характерного времени затухания потока τ можно получить из следующих уравнений:

$$\Delta H(t) = \Delta H_{max} \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

$$\Delta P(t) = \Delta P(0) \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

где характерное время затухания τ пропорционально гидродинамическому сопротивлению канала Z , которое определяется как:

$$Z = \eta / K_c \quad (5)$$

с константой K_c , зависящей только от формы и геометрических размеров канала. Соответствующие выражения для K_c в случаях капилляров с прямоугольным (линейные размеры $d \times A$, $d \ll A$) и круговым (радиус r) сечениями можно записываются в виде:

$$K_c = (d^3 A) / (12L) \quad (6)$$

$$K_c = (\pi r^4) / (8L) . \quad (7)$$

В результате получаем общее уравнение для времени затухания [3]:

$$\tau = [\eta / (2\rho g)] (S / K_c) , \quad (8)$$

где ρ — плотность жидкости.

Выражение (8) справедливо и для исследуемого в данной работе затухающего потока жидкости через образец пористой пленки. Действительно, такой образец можно рассматривать как число N идентичных каналов с круглым поперечным сечением, соединенных параллельно. В этом случае эквивалентное гидродинамическое сопротивление Z_N связано с гидродинамическим сопротивлением Z каждого канала следующим тривиальным выражением:

$$Z_N = Z / N , \quad (9)$$

что позволяет получить простое обобщение представленных выше соотношений.

В частности, соответствующие выражения для K_c^N и τ_N можно записать в виде:

$$K_c^N = (N\pi r^4) / (8L) \quad (10)$$

$$\tau_N = [\eta / (2\rho g)] (S / K_c^N) = [\eta / \rho g] [(D^2 L) / (Nr^4)] . \quad (11)$$

Таким образом, по определенным экспериментально значениям времени затухания τ_N коэффициент сдвиговой вязкости η рассчитывается, согласно выражению:

$$\eta = (\tau \rho g r^4 N) / (D^2 L) . \quad (12)$$

Полученные соотношения (1–6) ранее использовались для исследования реологических свойств нематических жидких кристаллов в плоском сдвиговом потоке [7–10]. В частности, три вязкости Мезовича определяли путем исследования затухающего потока НЖК в плоских каналах с различной ориентацией. Однородная ориентация молекул, необходимая для различных геометрий эксперимента, обеспечивалась за счет соответствующей поверхностной обработки каналов [7, 9] или путем комбинированного воздействия поверхностей и сильных электрических полей [10]. При малых значениях градиента давления, использованных в экспериментах, сдвиговый поток был достаточно слабым и не нарушал первоначальную ориентацию НЖК. Таким образом, имело место ньютоновское поведение жидких кристаллов с постоянным значением эффективной сдвиговой вязкости η_{eff} .

Подобный ньютоновский поток реализован в экспериментах с потоками ЖК через пористые пленки, описываемые в данной работе. Здесь исследование затухающего потока обеспечивает измерение эффективных значений сдвиговой вязкости, которые зависят от ориентационной структуры ЖК внутри пор.

Экспериментальная часть

Конструкция экспериментальной ячейки для исследования затухающего потока представлена на рис. 2. Во многом она схожа с ячейками, ранее использованными для исследований линейных и нелинейных явлений в затухающих потоках жидких кристаллов через плоские капилляры [7–10]. Основным отличием является использование образцов пористой пленки полиэтилентерефтората (ПЭТ) толщиной 23 мкм с цилиндрическими порами постоянного диаметра $d=2\mu\text{m}$, ориентированными нормально относительно пленки. Пористая пленка разделяет две части ячейки, которые связаны открытыми вертикальными трубками диаметра D . Предварительно образцы пленки обрабатывали 1%-ным раствором хлорокомплексной соли хрома и стеариновой кислоты в изопропиловом спирте (хромолан) для создания гомеотропного сцепления жидкого кристалла с внутренними поверхностями пор. После заполнения жидкостью создавался затухающий поток через пленку за счет некоторой начальной разности ΔH_{max} в уровнях менисков, образующейся в открытых трубках, как показано на рис. 1. Движение менисков регистрировали с помощью цифровой камеры. Дальнейший анализ изображений, полученных в разные моменты времени, позволил получать зависимости $\Delta H(t)$, которые сравнивали с теоретической зависимостью (3). Температуру ячейки поддерживали с погрешностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

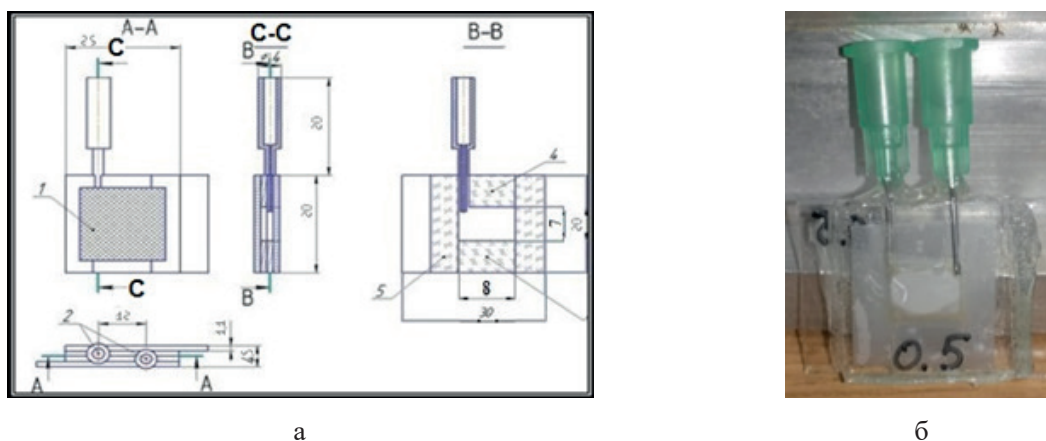


Рис. 2. Экспериментальная ячейка: а) конструкция; б) фотография образца.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе мы исследовали затухающий поток этанола, который является изотропной ньютоновской жидкостью с хорошо изученными реологическими свойствами. Типичные временные зависимости $\Delta H(t)$, полученные для образцов пленок с различными значениями диаметров и плотности пор, показаны на рис. 3.

Во всех случаях экспериментальные кривые соответствуют теоретической зависимости, описываемой уравнением (3). Отметим хорошую повторяемость результатов измере-

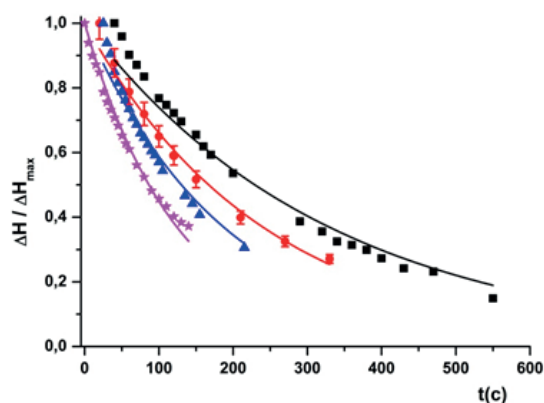


Рис. 3. Временные зависимости относительных разностей уровней для этанола.

Диаметр открытых трубок $D = 3.17$ мм, диаметр пор d :

■ – 0.3 мкм; ● – 0.4 мкм; ▲ – 0.5 мкм; ★ – 0.6 мкм.

ний (рис. 4). Это подтверждает простую теорию метода и позволяет вычислить константы K_c^N , необходимые для определения эффективной вязкости нематического жидкого кристалла. Результат сравнения между экспериментально определенными значениями K_c^N и полученными с помощью уравнения (11) приведены в таблице.

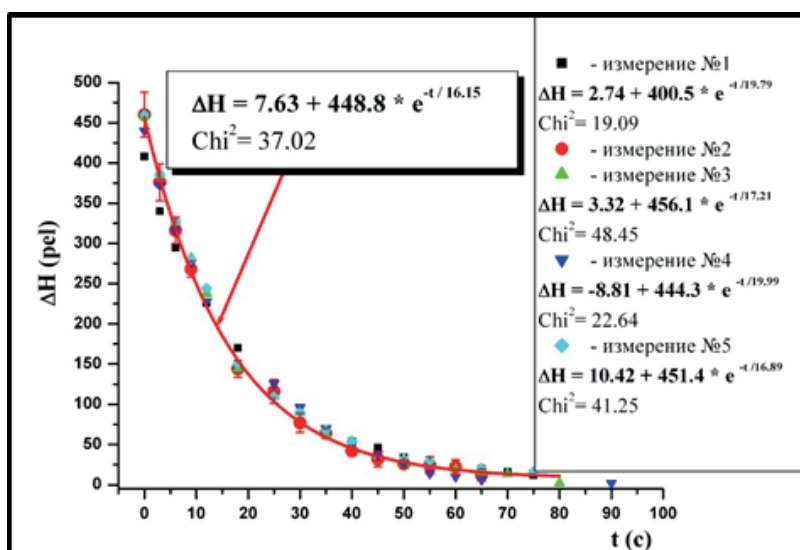


Рис. 4. Временные зависимости изменений уровней менисков для этанола в жидкокристаллической ячейке с плёнкой, где диаметр пор $d = 2$ мкм.

Некоторое несоответствие объясняется возможными ошибками в определении диаметра пор (до 10%), которые могут привести к существенным ошибкам в K_c^N из-за сильной зависимости (r^4) объемной скорости потока от радиуса пор и возможного перекрытия пор. Такая ситуация обычно встречается в традиционных измерениях сдвиговой вязкости с помощью цилиндрических капилляров.

Аналогичные зависимости $\Delta H(t)$ в случае затухающего потока нематического жидкого кристалла (ЖК-440 [11] – 2/3 части *p-n*-бутил-*p*-метилоксиазоксибензола и 1/3 часть *p-n*-бутил-*p*-гептаноилоксиазоксибензола) для двух образцов с различным диаметром пор при двух значениях температуры приведены на рис. 5.

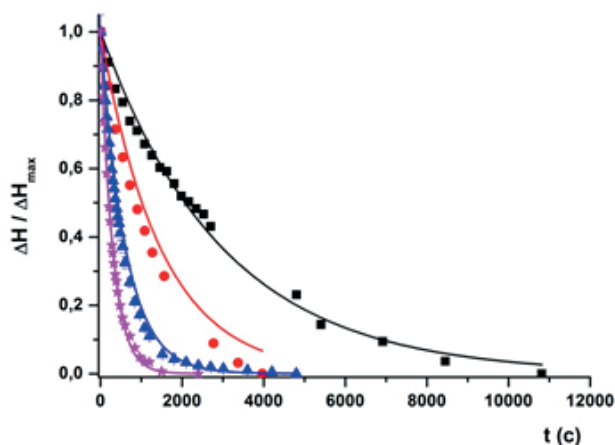


Рис. 5. Временные зависимости относительных разностей уровней для ЖК-440 при различных температурах (Т), диаметрах пор (d) и открытых трубок (D), соответственно
 ■ – 26 °С, 0.6 мкм и 3.17 мм; ■ – 42 °С, 0.6 мкм и 3.17 мм;
 ▲ – 26 °С, 0.4 мкм и 1 мм; ★ – 42 °С, 0.4 мкм и 1 мм.

Как видно из рис. 5, простой экспоненциальный закон (3) хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. Аналогичный вывод можно сделать относительно временных зависимостей, полученных для 5СВ (4-циано-4'-пентилбифенил) (рис. 6).

Таким образом, ньютоновское поведение с постоянным значением эффективной сдвиговой вязкости η_{eff} имеет место также и для потоков НЖК. В свою очередь, это означает, что затухающий поток был достаточно слабым и не нарушал первоначальную ориентационную структуру жидкого кристалла, образованную внутри поры при взаимодействии жидкого кристалла с внутренней поверхностью цилиндрических полостей.

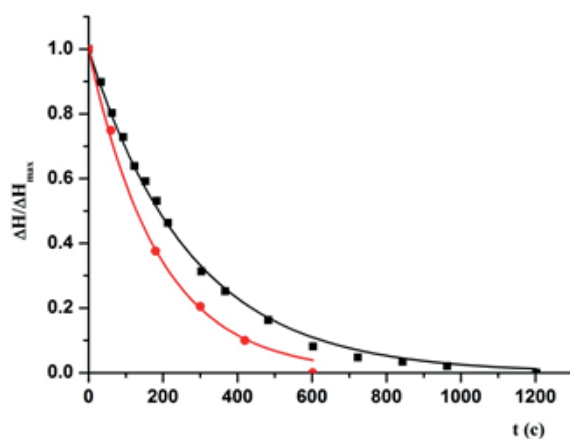


Рис. 6. Временные зависимости разностей относительных уровней для 5СВ: диаметр пор d = 2 мкм, диаметр открытых трубок D = 3.17 мм, температура (Т):
 ■ – 26 °С; ■ – 41 °С.

Экспериментальные зависимости $\Delta H(t)$ и данные о K_c^N , полученные из экспериментов с этанолом и представленные в таблице, могут быть использованы для расчета значений η_{eff} . Результаты выполненных расчетов для различных температур приведены на рис. 7 и 8 для ЖК-440 и 5СВ, соответственно. Данные результаты можно сравнить с темпе-

ратурными зависимостями трех коэффициентов Мезовича, полученными ранее для объемных образцов ЖК 440 и 5CB. Интересно, что температурная зависимость эффективной сдвиговой вязкости η_{eff} близка к зависимости $\eta_3(T)$ в обоих случаях. Такая ситуация может иметь место для планарной поверхностной ориентации директора в плоскости, перпендикулярной к осям пор [7]. Тем не менее, теоретически возможно образование различных ориентационных конфигураций в рассматриваемой системе [12, 13], которые показаны на рис. 7. Прямые ЯМР исследования ориентационной структуры НЖК внутри пор пористых поликарбонатных пленок показали существование – в зависимости от диаметра пор – выходящей из плоскости пленки радиальной (ER) конфигурации с точечными дефектами (ERPD) и планарной полярной конфигурации (PP) [14]. Кроме того, предварительная обработка пористой пленки 1%-ным раствором ориентанта (хромолан) в изопропанол, обеспечивает нормальное поверхностное сцепление, что может вызвать переходы между различными конфигурациями, упомянутыми выше. Приведенные данные целесообразно использовать для объяснений результатов наших экспериментов. В частности, компьютерное моделирование конфигурации ER, образованной внутри поры [15] и отмеченной как (г) на рис. 7, показало, что эффекты слабого сцепления должны быть приняты во внимание при типичных значениях силы сцепления и малых диаметрах пор. В частности, они несут ответственность за отклонение поверхностного полярного угла θ_r от значения $\theta_r = \pi/2$, соответствующего идеальному сильному сцеплению. Аналитическое выражение для θ_r , полученное при одинаковых значениях модулей упругости Франка ($K_{11} = K_{33} = K$), имеет вид:

$$\sin^2 \theta_r = (\sigma^2 - 1) / \sigma^2, \quad (13)$$

где параметр сцепления σ определяется следующим образом:

$$\sigma = (rW / K) + (K_{24} / K) - 1 \quad (14)$$

В этом выражении r – радиус пор, W – полярная сила сцепления, K_{24} – специфический модуль упругости для седлообразной деформации продольного изгиба (saddle-splay).

Результаты сравнения значений $K_c N$, полученных с помощью теоретического выражения (10) и вычисленных из экспериментальных данных по τ для ЖК-440

Диаметр пор, d, мкм	Время затухания τ , с	Число идентичных каналов, N	K_c^N с теор.	K_c^N с эксп.
0.3	330.8	$1.792 \cdot 10^8$	$0.00155 \cdot 10^{-12}$	$0.00169 \cdot 10^{-12}$
0.4	239.8	$0.84 \cdot 10^8$	$0.00230 \cdot 10^{-12}$	$0.00233 \cdot 10^{-12}$
0.5	187.9	$0.448 \cdot 10^8$	$0.00299 \cdot 10^{-12}$	$0.00297 \cdot 10^{-12}$
0.6	124.8	$0.224 \cdot 10^8$	$0.00310 \cdot 10^{-12}$	$0.00448 \cdot 10^{-12}$

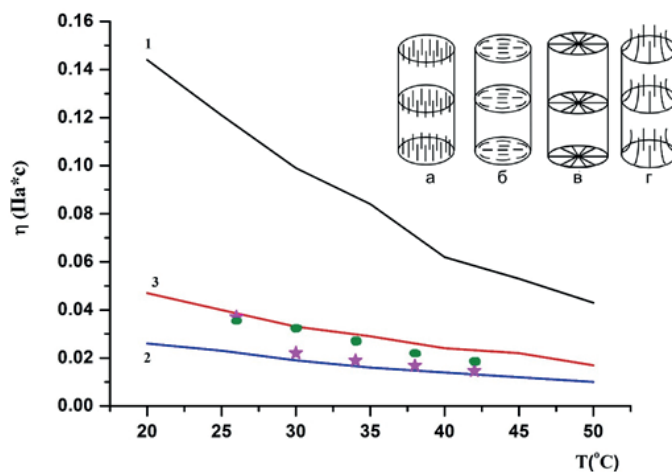


Рис. 7. Температурные зависимости η_{eff} , полученные из экспериментальных данных для τ при различных значениях диаметров пор d и открытых трубок D , соответственно:

★ – 0.6 мкм и 3.17 мм; ● – 0.4 мкм и 1 мм.

Сплошные линии отвечают результатам независимых измерений вязкостей Мезовича (1 – η_1 , 2 – η_2 , 3 – η_3) [11]. Вставка – различные типы конфигурации директора: а) аксиальная; б) планарная полярная; в) планарная радиальная; г) с выходом директора из плоскости пленки.

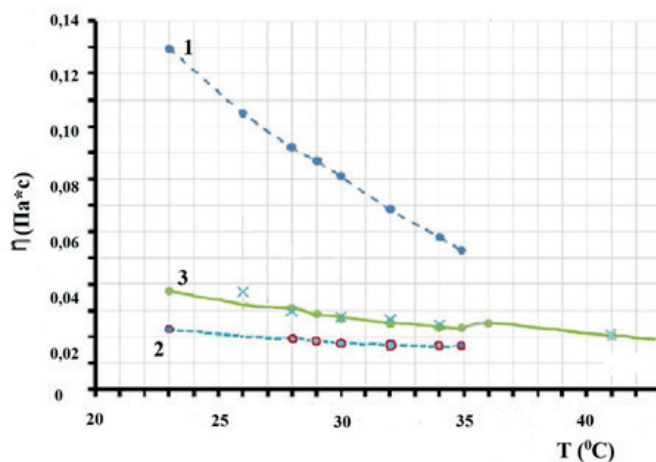


Рис. 8. Температурные зависимости η_{eff} , полученные из экспериментальных данных для τ и пленки с диаметром пор $d=0.8$ мкм (X) для 5CB.

Сплошные линии соответствуют результатам независимых измерений вязкостей Мезовича (1 – η_1 , 2 – η_2 , 3 – η_3) [16].

Предыдущие исследования динамического рассеяния света ПЭТ-пленками, заполненными НЖК (5CB) [17], показали, что типичные значения силы сцепления находятся в диапазоне 1 ... 5 Дж/м². Принимая значения $W = 3.5 \cdot 10^{-5}$ Дж/м², $K = K_{33} = 11$ pN [11], $K_{24} \approx 2$ К (что примерно справедливо для нематической смеси четырехкомпонентного соединения 4-циано-4'-пентилбифенил* (5CB, 51%, Merck), 4-гептил-4'-цианобифенил* (7CB, 25%, Merck), 4-октилокси-4'-цианобифенил* (8OCB, 16%, Merck) и 4-циано-4'-пентилтерфенил* (5CT, 8%, Merck) – E7 (Merck) [15]), можно оценить значения θ_r , которые составляют

для 60° и 51° при $d = 0.6$ и 0.4 мкм соответственно. Зависимость θ_r от r должна приводить к соответствующему уменьшению эффективной сдвиговой вязкости при уменьшении r . Такой эффект может быть ответственным за некоторые различия между зависимостями $\eta_{\text{eff}}(T)$, полученными для образцов с различными значениями диаметра пор. Действительно, в случае ER конфигурации локальное значение сдвиговой вязкости зависит только от полярного угла θ в соответствии с хорошо известным выражением [19]:

$$\eta(\theta) = \eta_2 \cos^2 \theta + (\eta_1 + \eta_{12} \cos^2 \theta) \sin^2 \theta, \quad (15)$$

где обычно значение параметра η_{12} существенно меньше, чем значения η_1 и η_2 .

В свою очередь, угол θ монотонно убывает от значения $\theta = \theta_r$ на внутренней поверхности поры до значения $\theta = 0$ в центре поры.

Таким образом, можно ожидать, что значение эффективной вязкости η_{eff} окажется в интервале между $\eta(\theta_r) \approx \eta_1 \sin^2 \theta_r$ и $\eta(0) = \eta_2$. В рамках одноконстантного приближения можно получить следующее выражение для среднего значения $\sin^2 \theta$:

$$\langle \sin^2 \theta \rangle = 2[(1 + \sigma)/(\sigma - 1)] \left[\ln 2\sigma / (\sigma + 1) - ((\sigma - 1)/2\sigma) \right]. \quad (16)$$

Расчет, выполненный в соответствии с (16) при использовании значений параметров, представленных выше, приводит к значениям $\langle \sin^2 \theta \rangle$, равным 0.22 и 0.17 для $d = 0.6$ и 0.4 мкм, соответственно. Подставляя эти значения в уравнение (15) и используя данные независимых измерений вязкости в ЖК-440 $\eta_1 = 0.12$ Па·с, $\eta_2 = 0.02$ Па·с [11], можно рассчитать значения средней вязкости при комнатной температуре $\langle \eta \rangle = 0.44$ Па·с, и 0.39 Па·с для $d = 0.6$ и 0.4 мкм, соответственно. Эти значения близки к значениям эффективной сдвиговой вязкости, представленным выше. Тем не менее, принимая во внимание типичные ошибки эксперимента в определении η_{eff} (около 5 ... 10%) трудно подтвердить довольно слабую теоретическую зависимость $\langle \eta \rangle$ от d . Кроме того, ранее [18] было обнаружено увеличение сдвиговой вязкости с уменьшением d для заполненных жидкими кристаллами пористых пленок ПЭТ, что связывалось с прямым воздействием эффектов сильного пространственного ограничения на диссипативные параметры жидких кристаллов. Отметим, что данные эксперименты проведены для пленок без предварительной обработки поверхности при более интенсивных сдвиговых потоках. Таким образом, для детальной экспериментальной проверки теоретических предположений необходимо проведение дальнейших исследований.

Заключение

Получены первые результаты реологических свойств изотропной жидкости (этанол) и двух НЖК (ЖК440 и 5СВ) при затухающем потоке Пуазейля через пористые ПЭТ пленки. Установлено, что вытекающий из теории ньютоновских жидкостей простой экспоненциальный закон, описывающий динамику затухающего потока, выполняется в обоих упомянутых выше случаях. В случае НЖК он соответствует постоянному значению эффективной сдвиговой вязкости. Выявлены температурные зависимости эффективной

сдвиговой вязкости для образцов пористых пленок с различными диаметрами пор и выполнен анализ экспериментальных данных с учетом возможного существования различных ориентационных структур НЖК внутри пор субмикронного диаметра.

***Благодарность:** работа поддержана грантом РФФИ № 16-33-00802 мол_а.*

Литература:

1. де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с.
2. Kutnjak Ž., Kralj S., Lahajnar G., Žumer S. Calorimetric study of 8CB liquid crystal confined to controlled-pore glasses // *Phys. Rev.* 2003. E 68. P. 021705-1–021705-11.
3. Semerenko D.A., Shmeliova D.V., Pasechnik S.V., Murauskii A.V., Tsvetkov V.A., Chigrinov V.G. Optically controlled transmission of porous polyethylene terephthalate films filled with nematic liquid crystal // *Optics Lett.* 2010. V. 35. № 13. P. 2155–2157.
4. Chopik A.P., Pasechnik S.V., Semerenko D.A., Shmeliova D.V., Dubtsov A.V., Srivastava A.K., Chigrinov V.G. Electro-optical effects in porous PET films filled with liquid crystal: new possibilities for fiber optics and THZ applications // *Optics Lett.* 2014. V. 39. № 6. P. 1453–1456.
5. Chigrinov V.G. *Liquid Crystal Devices: Physics and Applications*. Artech House, 1999. 357 p.
6. Pasechnik S.V., Chopik A.P., Shmeliova D.V., Drovnikov E.M., Semerenko D.A., Dubtsov A.V., Zhangb W., Chigrinov V.G. Electro-kinetic phenomena in porous PET films filled with liquid crystals // *Liquid Cryst.* 2015. V. 7. P. 1537–1542.
7. Pasechnik S.V., Chigrinov V.G., Shmeliova D.V., Tsvetkov V.A., Voronov A.N. Anisotropic shear viscosity in nematic liquid crystals: new optical measurement method // *Liquid Cryst.* 2004. V. 31. P. 585–592.
8. Пасечник С.В., Крехов А.П., Шмелева Д.В., Насибуллаев И.Ш., Цветков В.А. Ориентационная неустойчивость в нематическом жидком кристалле в затухающем пуазейлевском потоке // *ЖЭТФ*. 2005. Т. 127. №. 4. С. 907–914.
9. Pasechnik S.V., Semina O. A., Shmeliova D. V., Dubtsov A.V., Chigrinov V. G., Jatong D. V. Sun photocontrolled surfaces in rheology of liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2015. V. 611. P. 81–89.
10. Pasechnik S.V., Shmeliova D.V., Semerenko D.A., Voronov A.N., Semina O.A. Modified optical method for measurements of anisotropic shear viscosities of nematic liquid crystals // *Liquid Crystals and Their Appl.* 2011. V. 3(37). P. 41–46.
11. Barnik M.I., Belyaev S.V., Grebenkin M.F., Rumyantsev V.G., Seliverstov V.A., Tsvetkov V.A., Shtykov N.M. Electrical, optical and visco-elastic properties of the liquid crystal mixture of azoxy // *Crystallography*. 1978. V. 23(4). P. 805–810.
12. Bradac Ž., Kralj S., Zumer S. Molecular dynamics study of nematic structures confined to a cylindrical cavity // *Phys Rev.* 1998. E. 58(6). P. 7447–7454.
13. Crawford G.P., Allender D.W., Doane J.W. Surface elastic and molecular-anchoring properties of nematic liquid crystals confined to cylindrical cavities // *Phys. Rev.* 1992. V. 45. P. 8693–8708.
14. Allender D.W., Crawford G.P., Doane J.W. Determination of the liquid-crystal surface elastic constant K₂₄ // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 67. P. 1442–1445.
15. Tkachenko V., Dyomin A.A., Tkachenko G.V., Abbate G., Sukhoivanov I.A. Electrical

reorientation of liquid crystal molecules inside cylindrical pores for photonic device applications // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2008. V. 10. P. 055301–055306.

16. Беляев В.В. Вязкость нематических жидких кристаллов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 224 с.

17. Maksimochkin G.I., Shmeliova D.V., Pasechnik S.V., Dubtsov A.V., Semina O.A., Kralj S. Orientational fluctuations and phase transitions in 8CB confined by cylindrical pores of the PET film // Phase Transitions. 2016. V. 89. P. 846–855.

18. Tsvetkov V.A. Attempt of direct measuring of near surface shear viscosity // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2005. V. 436. P. 1157–1170.

19. Pasechnik S.V., Chigrinov V.G., Shmeliova D.V. Liquid Crystals: Viscous and Elastic Properties in Theory and Applications. New York: Wiley, 2009. 424 p.

20. Knepe H., Shneider F. Determination of the viscosity coefficients of the liquid crystal MBBA // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. V. 65. P. 23–28.

21. Fisher J., Frederickson A. G. Interfacial effects on the viscosity of a nematic mesophase // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1969. V.8. P. 267–284.

22. Tseng H.C., Silver D.L., Finlayson B. A. Application of the continuum theory to nematic liquid crystals // Phys. Fluids. 1972. V. 15. P. 1213–1222.

References:

1. de Gennes Pierre Gilles. The Physics of Liquid Crystals. Oxford University Press, 1974. 346 p.

2. Kutnjak Ž., Kralj S., Lahajnar G., Žumer S. Calorimetric study of 8CB liquid crystal confined to controlled-pore glasses // Phys. Rev. 2003. E 68. P. 021705-1–021705-11.

3. Semerenko D.A., Shmeliova D.V., Pasechnik S.V., Murauskii A.V., Tsvetkov V.A., Chigrinov V.G. Optically controlled transmission of porous polyethylene terephthalate films filled with nematic liquid crystal // Optics Lett. 2010. V. 35. № 13. P. 2155–2157.

4. Chopik A.P., Pasechnik S.V., Semerenko D.A., Shmeliova D.V., Dubtsov A.V., Srivastava A.K., Chigrinov V.G. Electro-optical effects in porous PET films filled with liquid crystal: new possibilities for fiber optics and THZ applications // Optics Lett. 2014. V. 39. № 6. P. 1453–1456.

5. Chigrinov V.G. Liquid Crystal Devices: Physics and Applications. Artech House, 1999. 357 p.

6. Pasechnik S.V., Chopik A.P., Shmeliova D.V., Drovnikov E.M., Semerenko D.A., Dubtsov A.V., Zhangb W., Chigrinov V.G. Electro-kinetic phenomena in porous PET films filled with liquid crystals // Liquid Cryst. 2015. V.7. P. 1537–1542.

7. Pasechnik S.V., Chigrinov V.G., Shmeliova D.V., Tsvetkov V.A., Voronov A.N. Anisotropic shear viscosity in nematic liquid crystals: new optical measurement method // Liquid Cryst. 2004. V. 31. P. 585–592.

8. Pasechnik S.V., Krekhov A.P., Shmeleva D.V., Nasibullaev I.Sh., Tsvetkov V.A. Orientational instability in a nematic liquid crystal in a decaying poiseuille flow // J. Exp. & Theor. Phys. 2005. V. 100. № 4. P. 804–810.

9. Pasechnik S.V., Semina O. A., Shmeliova D. V., Dubtsov A.V., Chigrinov V. G., Jatong D. V. Sun photocontrolled surfaces in rheology of liquid crystals // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2015. V. 611. P. 81–89.

10. Pasechnik S.V., Shmeliova D.V., Semerenko D.A., Voronov A.N., Semina O.A. Modified

optical method for measurements of anisotropic shear viscosities of nematic liquid crystals // Liquid Crystals and Their Appl. 2011. V. 3(37). P. 41–46.

11. Barnik M.I., Belyaev S.V., Grebenkin M.F., Rumyantsev V.G., Seliverstov V.A., Tsvetkov V.A., Shtykov N.M. Electrical, optical and visco-elastic properties of the liquid crystal mixture of azoxy // Crystallography. 1978. V. 23(4). P. 805–810.

12. Bradac Ž., Kralj S., Zumer S. Molecular dynamics study of nematic structures confined to a cylindrical cavity // Phys Rev. 1998. E. 58(6). P. 7447–7454.

13. Crawford G.P., Allender D.W., Doane J.W. Surface elastic and molecular-anchoring properties of nematic liquid crystals confined to cylindrical cavities // Phys. Rev. 1992. V. 45. P. 8693–8708.

14. Allender D.W., Crawford G.P., Doane J.W. Determination of the liquid-crystal surface elastic constant K₂₄ // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 1442–1445.

15. Tkachenko V., Dyomin A.A., Tkachenko G.V., Abbate G., Sukhoivanov I.A. Electrical reorientation of liquid crystal molecules inside cylindrical pores for photonic device applications // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2008. V. 10. P. 055301–055306.

16. Belyaev V.V. Viscosity of nematic liquid crystals. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 224 p. (in Russ.).

17. Maksimochkin G.I., Shmeliova D.V., Pasechnik S.V., Dubtsov A.V., Semina O.A., Kralj S. Orientational fluctuations and phase transitions in 8CB confined by cylindrical pores of the PET film // Phase Transitions. 2016. V. 89. P. 846–855.

18. Tsvetkov V.A. Attempt of direct measuring of near surface shear viscosity // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2005. V. 436. P. 1157–1170.

19. Pasechnik S.V., Chigrinov V.G., Shmeliova D.V. Liquid Crystals: Viscous and Elastic Properties in Theory and Applications. New York: Wiley, 2009. 424 p.

20. Knepe H., Shneider F. Determination of the viscosity coefficients of the liquid crystal MBBA // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. V. 65. P. 23–28.

21. Fisher J., Frederickson A. G. Interfacial effects on the viscosity of a nematic mesophase // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1969. V. 8. P. 267–284.

22. Tseng H.C., Silver D.L., Finlayson B. A. Application of the continuum theory to nematic liquid crystals // Phys. Fluids. 1972. V. 15. P. 1213–1222.

Об авторах:

Пасечник Сергей Вениаминович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой биокрибернетических систем и технологий Института кибернетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» (119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Шмелева Дина Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры биокрибернетических систем и технологий Института кибернетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» (119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Торчинская Александра Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» (107996, Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Семина Ольга Александровна, младший научный сотрудник Проблемной лаборатории молекулярной акустики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» (119435, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1).

Дюкин Алексей Александрович, магистрант кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» (107996, Москва, ул. Стромынка, д. 20).

About authors:

Sergey V. Pasechnik, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Chair of Biocybernetics Systems and Technologies, Cybernetics Institute, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Dina V. Shmelyova, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Chair of Biocybernetics Systems and Technologies, Cybernetics Institute, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Aleksandra V. Torchinskaya, Ph.D. (Physics and Mathematics), Chair of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, Physico-Technological Institute, Moscow Technological University (20, Stromynka St., Moscow, 107996, Russia).

Olga A. Semina, Junior Researcher of Problem Laboratory of Molecular Acoustics, Moscow Technological University (1, Malaya Pirogovskaya St., Moscow, 119435, Russia).

Aleksey A. Dyukin, graduate student, Chair of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, Physico-Technological Institute, Moscow Technological University (20, Stromynka St., Moscow, 107996, Russia).

УДК 519.8

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ
ПОЛЯ В УПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ**

**И.А. Джемесюк,
С.Г. Горбунов[@]**

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

[@]Автор для переписки, e-mail: gos-g@bk.ru

В статье рассмотрены дифференциальные уравнения теплопроводности в частных производных параболического типа для бесконечной пластины в области $x > 1$, возникающие в теории теплопроводности для различных режимов нагрева границы. Для нахождения закона распределения температуры по толщине пластины получены точные аналитические решения трех задач теплопроводности со следующими граничными условиями: 1) температура на границе меняется мгновенно, но однократно; 2) температура на границе изменяется плавно с учетом времени релаксации на левой границе; 3) температура на границе мгновенно периодически меняется. Краевые задачи сначала приводили к безразмерному виду, а потом решали операционным методом с помощью интегрального преобразования Лапласа. С помощью полученных аналитических решений построены графики, характеризующие распределение температуры в пластине с учетом процессов релаксации на левой границе.

Ключевые слова: время релаксации, уравнение теплопроводности, интегральное преобразование Лапласа.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE
OF RELAXATION PROCESSES ON THE TEMPERATURE
FIELD IN AN ELASTIC HALF-SPACE**

**I.A. Dzhemesyuk,
S.G. Gorbunov[@]**

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

[@]Corresponding author e-mail: gos-g@bk.ru

The article examines the relaxation processes that occur in an elastic solid medium when it is heated and cooled, especially their influence on the temperature field. Besides, we considered in this paper the heat equation of parabolic type arising in the theory of thermal conductivity for different modes of heating the border. We present a solution of the boundary value problem of nonstationary heat conduction for an infinite plate with the following regimes of loading the boundaries: a single slow temperature change at the border, a single instantaneous temperature variation at the border, and, finally, multiple instantaneous changes of temperature at the border. In order to solve these three heat problems, they were brought to a dimensionless form. Then the operational calculus method was applied. The essence of the method consists in the following. According to the obtained analytical solutions three-dimensional graphics characterizing the relaxations processes were built in the computer algebra system Wolfram Mathematica for different ranges of the Fourier criterion.

Keywords: relaxation time, mathematical modeling, dimensionless variables, integral Laplace transform.

Метод интегральных преобразований нашел широкое распространение при решении уравнения теплопроводности в конечных и бесконечных областях классического типа: бесконечные пластины, длинный тонкий однородный стержень и т.д. Он позволяет получать аналитические решения тепловых задач по стандартной схеме [1]:

1. Применение преобразования Лапласа: переход от известных и неизвестных функций их изображениям, запись уравнения в изображениях [1], соответствующих решаемой задаче Коши [2];
2. Решение полученного уравнения, т.е. нахождение изображения искомого решения;
3. Применение обратного преобразования Лапласа: нахождение оригинала [3] для полученного в п. 2 изображения решения.

Применим метод для решения ряда задач, представляющих интерес в технических приложениях.

В обычной феноменологической теории теплоты предполагается, что скорость распространения тепла в среде бесконечно велика. Однако тепло как одна из форм, равно как и механическая форма движения, имеет конечную скорость распространения. Вследствие сложной молекулярной структуры вещества, тепловой инерции, а также дефектов в материале, происходит запаздывание во времени изменения температуры. Этот промежуток времени – время релаксации.

Пусть в начальный момент времени распределение температуры по толщине бесконечной пластины $x > l$ равно $T(x, t)|_{t=0} = T_0$. На левой границе произошел скачок температуры, описываемый следующей функцией $T(x, t)|_{x=l} = T_0 + (T_c - T_0)\eta(t - t_0)$ [4, с. 199],

(рис. 1), где $\eta(t - t_0)$ – функция Хевисайда [5], которая определяется как: $\eta(t - t_0) := \begin{cases} 0, & t \leq t_0; \\ 1, & t > t_0. \end{cases}$

(доопределена значением 0 в точке t_0), $t_0 \neq 0$. Чтобы найти закон распределения температуры по толщине пластины, рассмотрим следующую задачу:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, & x > l, t > 0; \\ T(x, t)|_{t=0} = T_0, & x \geq l; \\ T(x, t)|_{x=l} = T_0 + (T_c - T_0)\eta(t - t_0), & t \geq 0; \\ |T(x, t)| < \infty, & t \geq 0, x \geq l; \end{cases}$$

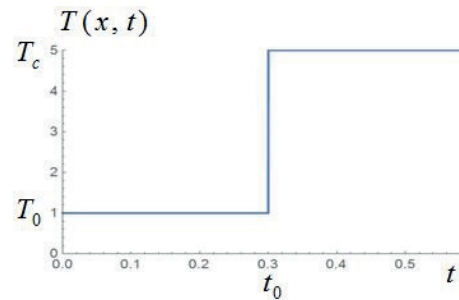


Рис. 1. График температурной функции (температура на границе изменяется мгновенно).

Используя замену: $z = \frac{x-l}{l}$, $Fo = \frac{at}{l^2}$ (критерий Фурье), $W(z, Fo) = \frac{T - T_0}{T_c - T_0}$, получим

задачу в безразмерном виде (рис.2):

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}, & z > 0, Fo > 0; \\ W|_{Fo=0} = 0, & z \geq 0; \\ W|_{z=0} = \eta(t - t_0^*), & Fo \geq 0; \\ |W(z, Fo)| < \infty, & z \geq 0, Fo \geq 0; \end{cases}$$

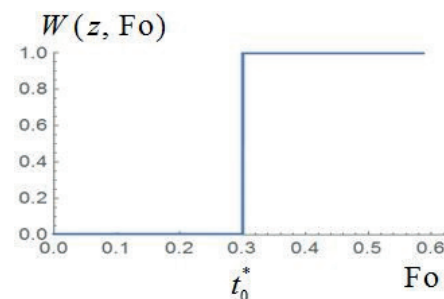


Рис. 2. График безразмерной температурной функции (температура на границе изменяется мгновенно).

Для решения этой краевой задачи воспользуемся интегральным преобразованием Лапласа. Необходимые формулы выпишем из таблиц, приведенных в [3]:

$$A \xrightarrow{\cdot} A \frac{1}{p}, \quad (1)$$

$$\frac{df}{dt} \xrightarrow{\cdot} p\bar{f}(p) - f(0), \quad (2)$$

$$\eta(t - t_0) \xrightarrow{\cdot} e^{-t_0 p}, \quad t > t_0, \quad (3)$$

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{t}}\right) \xrightarrow{\cdot} \frac{e^{-z\sqrt{p}}}{p}, \quad (4)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ – дополнительная функция ошибок, которая определяется как [6]:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt.$$

Для перевода нашей безразмерной задачи в пространство изображений по Лапласу воспользуемся формулами (1) – (3). Операционная задача имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \overline{W}}{dz^2} - p \overline{W} = 0; z > 0; \\ \overline{W}|_{z=0} = \frac{1}{p} e^{-pt_0^*}; \\ |\overline{W}| < \infty, z \geq 0; \end{cases}$$

Таким образом, мы получили задачу Коши для однородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами [2]. Её общее решение имеет вид: $\overline{W} = C_1 e^{-z\sqrt{p}} + C_2 e^{z\sqrt{p}}$; из условия ограниченности константу C_2 принимаем равной нулю.

Найдём константу C_1 , исходя из граничного условия: $\overline{W}|_{z=0} = \frac{1}{p} e^{-pt_0^*}$. Тогда $C_1 = \frac{1}{p} e^{-pt_0^*}$.

Подставив C_1 в выражение для общего решения однородного уравнения, получим операционное решение тепловой задачи [1]: $\overline{W}(z, p) = \frac{1}{p} e^{-pt_0^*} e^{-z\sqrt{p}}$;

Чтобы перевести полученное решение из пространства изображений в пространство оригиналов, нам понадобится формула (4) и теорема запаздывания (5) [1]:

$$f(t - t_0^*) \xrightarrow{\bullet} e^{-pt_0^*} \bar{f}(p) \quad (5)$$

В пространстве оригиналов [1] по Лапласу решение имеет вид:

$$W(z, Fo) = \begin{cases} 0 & (Fo \leq t_0^*) \\ \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{Fo - t_0^*}}\right) & (Fo > t_0^*) \end{cases}$$

В системах компьютерной алгебры *Wolfram Mathematica* и *Mathcad* построена серия графических зависимостей $W(z, Fo)$ для различных сечений z и различных значений безразмерного времени Fo ($Fo \in [0; 1]$). Вид некоторых из них представлен ниже на рис. 3–5.

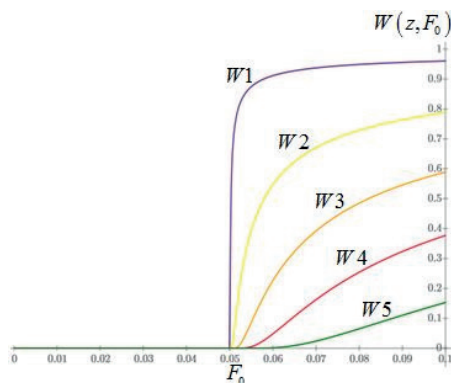


Рис. 3. График зависимости безразмерной температуры $W(z, Fo)$ от Fo при фиксированных значениях z : $W_1 = W(0,01, Fo)$; $W_2 = W(0,085, Fo)$; $W_3 = W(0,18, Fo)$; $W_4 = W(0,27, Fo)$; $W_5 = W(0,45, Fo)$.

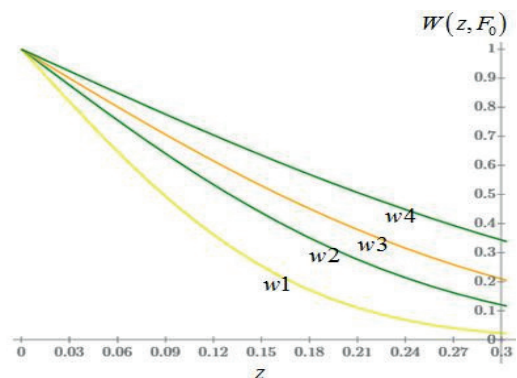


Рис. 4. График зависимости безразмерной температуры $W(z, Fo)$ от z при фиксированных значениях Fo : $w_1 = W(z, 0,2)$; $w_2 = W(z, 0,5)$; $w_3 = W(z, 0,8)$; $w_4 = W(z, 0,1)$.

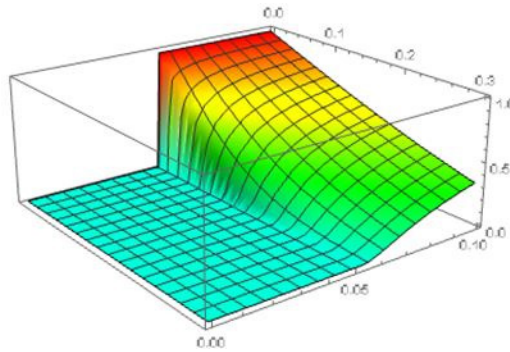


Рис. 5. Трехмерный график зависимости безразмерной температуры $W(z, Fo)$ от z и Fo : $z \in [0; 1]$, $Fo \in [0; 0.4]$ (температура на границе изменяется мгновенно).

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1) при малых значениях критерия Фурье безразмерная температура имеет максимум на левой границе и постепенно убывает по толщине пластины, тем самым при больших z имеет наименьшее значение;

2) с ростом критерия Фурье (с увеличением времени) температура в пластине стремится к температуре на левой границе, т.е. выравнивается, причем выравнивание тем быстрее, чем меньше z .

Сравним случаи, когда на границе произошел резкий скачок температуры и температура на границе меняется плавно (по линейному закону) от T_0 до T_c за время t_0 (время релаксации [7]).

Пусть в начальный момент времени распределение температуры по толщине пластины равно $T(x, t)|_{t=0} = T_0$. Если на левой границе происходит плавное повышение температуры, описываемое следующей функцией [4, с. 199] $T(x, t)|_{x=l} = T_0 + \frac{T_c - T_0}{t_0} (t - (t - t_0)\eta(t - t_0))$, где $\eta(t - t_0)$ – функция Хевисайда [5] (рис. 6), тогда, чтобы найти закон распределения температуры по толщине пластины, рассмотрим следующую задачу:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x > l, t > 0; \\ T(x, t)|_{t=0} = T_0, x \geq l; \\ T(x, t)|_{x=l} = T_0 + \frac{T_c - T_0}{t_0} (t - (t - t_0)\eta(t - t_0)), t \geq 0; \\ |T(x, t)| < \infty, t \geq 0, x \geq l. \end{cases}$$

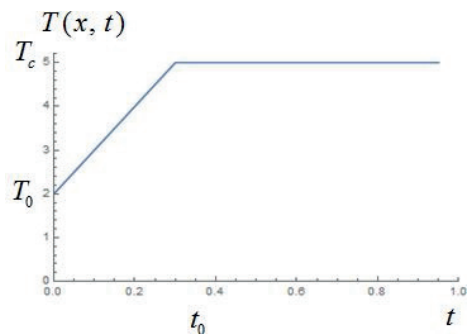


Рис. 6. График температурной функции на границе (температура изменяется плавно, с учетом времени релаксации).

Используя замену $z = \frac{x-l}{l}$, $Fo = \frac{at}{l^2}$ (критерий Фурье), $W(z, Fo) = \frac{T - T_0}{T_c - T_0}$, имеем задачу в безразмерном виде (рис. 7):

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}, z > 0, Fo > 0; \\ W|_{Fo=0} = 0, z \geq 0; \\ W|_{z=0} = \frac{Fo - (Fo - t_0^*)\eta(t - t_0)}{t_0^*}, Fo \geq 0; \\ |W(z, Fo)| < \infty, z \geq 0, Fo \geq 0, \end{cases}$$

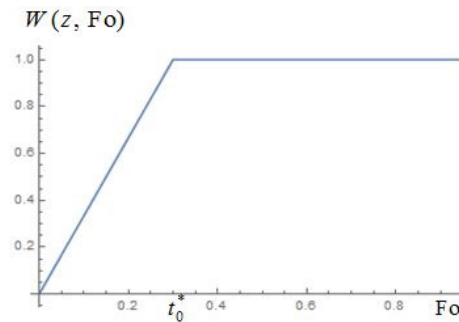


Рис. 7. График безразмерной температурной функции на границе (температура меняется плавно с учетом времени релаксации).

Воспользуемся здесь интегральным преобразованием Лапласа [1] (формулы 1–3). Операционная задача имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{W}}{dz^2} - p\bar{W} = 0; z > 0; \\ \bar{W}|_{z=0} = \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{t_0^* p^2}; \\ |\bar{W}| < \infty, z \geq 0; \end{cases}$$

Очевидно, что мы получили задачу Коши для однородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами [2]. Её общее решение имеет вид: $\bar{W} = C_1 e^{-z\sqrt{p}} + C_2 e^{z\sqrt{p}}$; из условия ограниченности константу C_2 положим равной нулю. Найдём C_1 , исходя из граничного условия: $\bar{W}|_{z=0} = \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{t_0^* p^2}$. $C_1 = \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{t_0^* p^2}$.

Подставив C_1 в выражение для общего решения однородного уравнения [2], получим решение тепловой задачи в пространстве изображений [1]: $\bar{W}(z, p) = \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{t_0^* p^2} e^{-z\sqrt{p}}$.

Чтобы перевести полученное решение из пространства изображений в пространство оригиналов, нам понадобится формула (6) и теорема запаздывания (5) (см. выше).

$$\frac{e^{-z\sqrt{p}}}{p^2} \xrightarrow{\cdot} \left(Fo + \frac{z^2}{2} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{Fo}} \right) - z \sqrt{\frac{Fo}{\pi}} e^{-\frac{z^2}{4Fo}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{1+q} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n q^n \quad (7)$$

Оригинал полученного решения имеет следующий вид:

$$W'(z, Fo) = \frac{-1}{t_0^*} \left[\left(Fo + \frac{z^2}{2} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{Fo}} \right) - z \sqrt{\frac{Fo}{\pi}} e^{-\frac{z^2}{4Fo}} \right];$$

$$W(z, Fo) = \begin{cases} 0 & (Fo \leq 0) \\ W'(z, Fo) & (0 < Fo \leq t_0^*) \\ W'(z, Fo) - W'(z, Fo - t_0^*) & (t_0^* < Fo). \end{cases}$$

Серия графических зависимостей $W(z, Fo)$ для различных сечений z от безразмерного времени Fo ($Fo \in [0; 1]$) и наоборот (некоторые из них представлены ниже) построены в системах компьютерной алгебры *Wolfram Mathematica* и *Mathcad* (рис. 8–10).

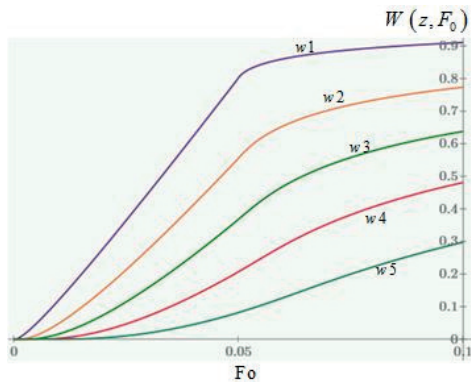


Рис. 8. График зависимости безразмерной температуры $W(z, Fo)$ от Fo при фиксированных значениях z : $w_1=W(0.07, Fo)$, $w_2=W(0.1, Fo)$, $w_3=W(0.18, Fo)$, $w_4=W(0.27, Fo)$, $w_5=W(0.4, Fo)$.

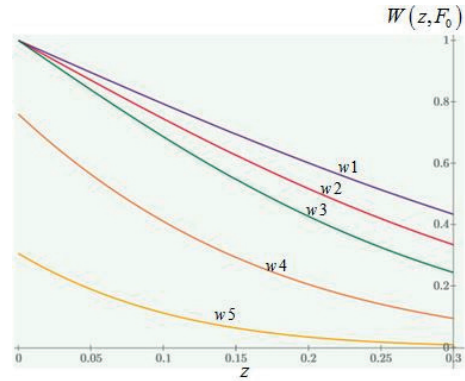


Рис. 9. График зависимости безразмерной температуры $W(z, Fo)$ от z при фиксированных значениях Fo : $w_1=W(z, 0.1)$, $w_2=W(z, 0.075)$, $w_3=W(z, 0.06)$, $w_4=W(z, 0.04)$, $w_5=W(z, 0.01)$.

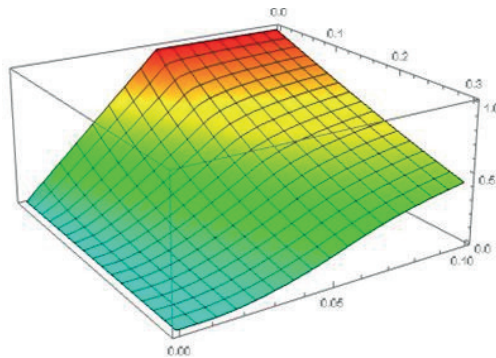


Рис. 10. Трехмерный график зависимости безразмерной температуры $W(z, Fo)$ от z и Fo ; $z \in [0; 1]$, $Fo \in [0; 0.4]$

(температура на границе изменяется плавно с учетом времени релаксации).

Рассмотрение приведенных зависимостей позволяет заключить следующее:

- 1) при малых критериях Фурье безразмерная температура имеет максимум на левой границе и постепенно убывает по толщине пластины, и при больших z имеет наименьшее значение;
- 2) с ростом критерия Фурье (с течением времени) температура в пластине также стремится к температуре на левой границе;
- 3) сравнивая кривую w_5 на рис. 9 с кривой w_4 на рис. 5, можно заметить, что при плавном нагреве, т.е. с учетом времени релаксации на границе пластина прогревается до более высокой температуры.

Далее рассмотрим случай, когда температура на границе меняется мгновенно и многократно. Пусть в начальный момент времени распределение температуры по толщине пластины равно $T(x, t)|_{t=0} = T_0$. На левой границе периодически возникают скачки температуры, описываемые следующим рядом [4, с. 199]:

$$T(x, t)|_{\delta=l} = T_0 + 2(T_c - T_0)q_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \eta(t - nt_0) - \eta(t),$$

где $\eta(t - t_0)$ функция Хевисайда [5].

Соответствующий график приведен на рис. 11.

Чтобы найти закон распределения температуры по толщине пластины, для начала рассмотрим математическую постановку следующей задачи:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x > l, t > 0; \\ T(x, t)|_{t=0} = T_0, x \geq l; \\ T(x, t)|_{x=l} = T_0 + 2q_0 (T_c - T_0) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \eta(t - nt_0) - \eta(t), t \geq 0; \\ |T(x, t)| < \infty, t \geq 0, x \geq l; \end{cases}$$

Используя замену $z = \frac{x-l}{l}$, $Fo = \frac{at}{l^2}$ (критерий Фурье), $W(z, Fo) = \frac{T - T_0}{T_c - T_0}$, получим

эту задачу в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}, z > 0, Fo > 0; \\ W|_{Fo=0} = 0, z \geq 0; \\ W|_{z=0} = 2q_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \eta(F_0 - nt_0^*) - \eta(F_0), Fo \geq 0; \\ |W(z, Fo)| < \infty, z \geq 0, Fo \geq 0; \end{cases}$$

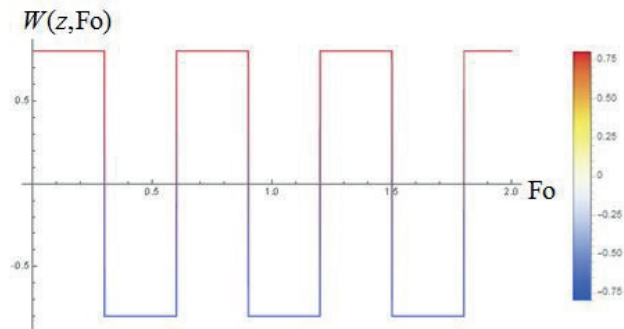


Рис. 11. График зависимости безразмерной температурной функции на границе от критерия Фурье (температура на границе изменяется мгновенно и многократно).

Воспользуемся интегральным преобразованием Лапласа [1] и формулой (7). Преобразованная безразмерная задача в пространстве изображений имеет вид задачи Коши:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{W}}{dz^2} - p \bar{W} = 0; z > 0; \\ \bar{W}|_{z=0} = \frac{q_0}{p} \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{1 + e^{-pt_0^*}}; \\ |\bar{W}| < \infty, z \geq 0; \end{cases}$$

Решаем однородное дифференциальное уравнение второго порядка. Его общее решение имеет вид: $\bar{W} = C_1 e^{-z\sqrt{p}} + C_2 e^{z\sqrt{p}}$; из условия ограниченности константу мы берем равной нулю.

Найдём C_1 , исходя из граничного условия: $\bar{W}|_{z=0} = \frac{q_0}{p} \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{1 + e^{-pt_0^*}}$.

Подставив C_1, C_2 в выражение для общего решения однородного уравнения, получим решение тепловой задачи в пространстве изображений:

$$\overline{W}(z, p) = \frac{q_0}{p} \frac{1 - e^{-pt_0^*}}{1 + e^{-pt_0^*}} e^{-z\sqrt{p}};$$

Чтобы перевести полученное решение из пространства изображений в пространство оригиналов, нам понадобятся формулы (4), (5), (7) и следующая замена:

$$\mathcal{G}(z, \text{Fo} - t_0^*) = \begin{cases} 0 & (\text{Fo} \leq t_0^*) \\ \text{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\text{Fo} - t_0^*}}\right) & (\text{Fo} > t_0^*) \end{cases}$$

Оригинал имеет вид:

$$\begin{aligned} W(z, \text{Fo}) &= 2q_0 \sum_{k=0}^n (-1)^k \mathcal{G}(z, \text{Fo} - kt_0^*) - \mathcal{G}(z, \text{Fo}) = \\ &= q_0 \left[\mathcal{G}(z, \text{Fo}) - 2\mathcal{G}(z, \text{Fo} - t_0^*) + 2\mathcal{G}(z, \text{Fo} - 2t_0^*) - \dots - 2(-1)^n \mathcal{G}(z, \text{Fo} - nt_0^*) \right] \end{aligned}$$

В системах компьютерной алгебры *Wolfram Mathematica* и *Mathcad* построена серия графических зависимостей $W(z, \text{Fo})$ для различных сечений z и Фурье Fo ($\text{Fo} \in [0; 2]$). Вид некоторых из них представлен ниже (рис. 12–14).

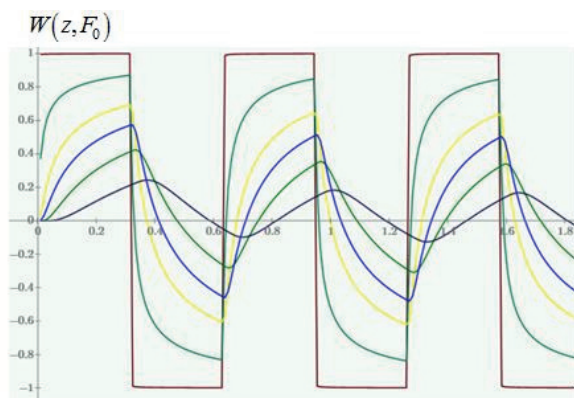


Рис. 12. График зависимости безразмерной температуры $W(z, \text{Fo})$ от Fo при фиксированных значениях: $z = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 0.9\}$.

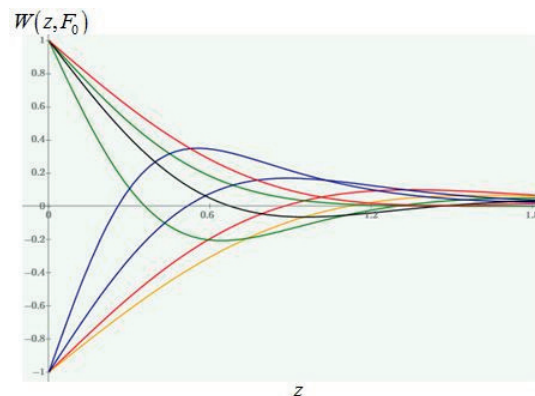


Рис. 13. График зависимости безразмерной температуры $W(z, \text{Fo})$ от z при фиксированных значениях: $\text{Fo} = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 0.9\}$.

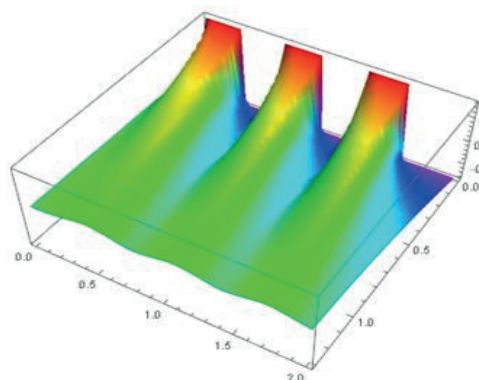


Рис. 14. Трехмерный график зависимости $W(z, \text{Fo})$ от z и Fo ; $z \in [0; 1.3]$, $\text{Fo} \in [0; 2]$ (температура на границе изменяется мгновенно и многократно).

Заключение

При импульсных нагрузках на левой границе безразмерная температура для различных небольших значений z может очень сильно различаться, но постепенно по толщине пластины она выравнивается, и для значений $z > 1.5$ практически не меняется с течением времени.

Литература:

1. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. М.: Наука, 1971. 288 с.
2. Филиппов А.Ф. Сборник задач по дифференциальным уравнениям. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 176 с.
3. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление по двум переменным и его приложениям. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1959. 179 с.
4. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Математические модели теплопроводности и термоупругости: 2-ое издание переработанное и дополненное. Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. 877 с.
5. Волков И.К., Канатников А.Н. Интегральные преобразования и операционное исчисление: Учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 228 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
7. Чертищев В.В., Чертищев В.В. Расчет полей температур и тепловых потоков в неподвижной среде методом конечных элементов // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2011. № 1-2 (69). С.176–180.

References:

1. Doetsch G. Guide to the practical application of Laplace transform and Z-transform. M.: Nauka Publ., 1971. 288 p. (in Russ.).
2. Filippov A.F. Collection of exercises on differential equations. Izhevsk: NIC «Regular and chaotic dynamics», 2000. 176 p. (in Russ.).
3. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. Operational calculus in two variables and its applications. M.: State publishing house of physico-mathematical literature, 1959. 179 p. (in Russ.).
4. Kartashov E.M., Kudinov V.A. Mathematical models of heat conduction and thermoelasticity: 2nd edition revised and expanded. Samara: Samara State Technical University, 2013. 877 p. (in Russ.).
5. Volkov I.K., Kanatnikov A.N. Integral transforms and operational calculus: Textbook for high schools / Under the editorship of B.C. Zarubin, A.P. Krishchenko. 2nd ed. M.: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 228 p. (in Russ.).
6. Korn G., Korn T. Reference book on mathematics (for scientists and engineers). M.: Nauka Publ., 1974. 832 p. (in Russ.).

7. Chertishev V.V., Chertishev V.V. Calculation of the temperature fields and heat fluxes in a stationary environment by finite element method // Izvestiya of Altai State University. 2011. № 1-2 (69). P. 176-180. (in Russ.).

Об авторах:

Джемесюк Ирина Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей и прикладной математики Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д.86).

Горбунوف Сергей Германович, студент кафедры высшей и прикладной математики Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д.86).

About authors:

Irina A. Dzhemesiuk, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair of Higher and Applied Mathematics, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia).

Sergey G. Gorbunov, student, the Chair of Higher and Applied Mathematics, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia).

УДК 541.64:539.3

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАКСВЕЛЛА И КЕЛЬВИНА-ФОГТА

В.Д. Карлов

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

@Автор для переписки, e-mail: nyandude73@gmail.com

В статье предложены новые функциональные соотношения для деформаций и напряжений в рамках линейных реологических моделей Максвелла и Кельвина-Фогта. Полученные соотношения справедливы для всего интервала времени, что позволяет рассмотреть многочисленные частные случаи ползучести и релаксации напряжения, в частности, следующие практические режимы: постоянное напряжение, постоянная деформация, постоянная скорость деформации. Все расчёты основаны на использовании единичной функции Хэвисайда, дельта-функции Дирака и решении задачи Коши, выведенном профессором Э.М. Карташовым. Использование обобщённых функций позволяет рассмотреть и более сложные трёхэлементные модели, например, с двумя пружинами и одним демпфером и наоборот. Принципиальная сторона подхода при этом не меняется, математические выкладки практически не усложняются. Предложенные соотношения могут быть использованы в реологии как обобщающая форма записи, содержащая известные частные случаи. Настоящая работа представляет методический интерес для кафедр полимерного профиля.

Ключевые слова: релаксация, ползучесть, напряжение, деформация, полимеры, модель Максвелла, модель Кельвина-Фогта, задача Коши, упругость, вязкость, дифференциальные уравнения.

NEW FUNCTIONAL RELATIONS FOR LINEAR RHEOLOGICAL MODELS OF MAXWELL AND KELVIN-VOIGT

V.D. Karlov

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

@Corresponding author e-mail: nyandude73@gmail.com

The article proposes new functional relationships for deformations and stresses within the framework of the linear rheological Maxwell and Kelvin-Voigt models. The relations obtained are valid for the entire time interval, which allows one to consider numerous special cases of creep and relaxation tension, in particular the following practical regimes: constant tension, constant deformation, constant strain rate. In calculations, the Heaviside step function, the Dirac delta function, and the solution of the Cauchy problem proposed by E.M. Kartashov were used. Using of generalized functions allows us to consider more complex three-element models, for example, with two springs and one damper and vice versa. At the same time, the principal aspect of the approach does not change, the mathematical calculations are practically not complicated. The proposed relations can be used in rheology as a generalizing form of the record containing known special cases. This work presents a methodological interest for the departments of polymeric profile.

Keywords: relaxation, creep, tension, deformation, polymers, Maxwell model, Kelvin-Voigt model, Cauchy problem, elasticity, viscosity, differential equations.

Введение

Необходимость в построении механических моделей полимерных тел возникла вследствие неприменимости обычных уравнений упругости и вязкости к полимерам. Полимеры в одних случаях ведут себя как упругие тела, а в других – как вязкие жидкости, поэтому их механическое поведение не подчиняется ни закону Гука

$$\sigma = E\varepsilon,$$

ни закону вязкого течения Ньютона

$$\sigma = \eta d\varepsilon/dt,$$

где σ – напряжение [Па];

ε – деформация (безразмерная величина);

E – модуль упругости [Па];

η – коэффициент вязкости [Па·с].

Для описания механического поведения полимерных тел были разработаны соответствующие модели, которые учитывают одновременно протекающие процессы упругого деформирования и вязкого течения [1–3]. При этом под механической моделью материала подразумевается не только набор пружин (упругость) и демпферов (вязкость), но и соответствующие моделям дифференциальные уравнения вида

$$\sum_{k=0}^m a_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = \sum_{k=0}^m b_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k}, \quad t > 0 \quad (1)$$

с заданными начальными условиями для напряжения $\sigma(t)$, либо для деформации $\varepsilon(t)$: здесь a_k, b_k ($k = \overline{1, m}$) – постоянные коэффициенты, которые определяют механические свойства изучаемого материала.

Модельные представления на основе уравнения (1) неизменно излагаются в литературе по механике и физике полимеров [1–4]. И как это ни странно, но в столь, казалось бы, завершенной области реологии еще остались «математические резервы» для переосмысления аналитических решений уравнения (1). Математической формой этих

решений относительно напряжения при заданной деформации или деформации при заданном напряжении традиционно является система кусочно-гладких функций, каждая из которых описывает процесс в своем интервале времени. Однако, по нашему мнению, можно иначе описать эти решения, используя единое функциональное соотношение для всех $t > 0$.

Используем для расчетов обобщенные функции [4]:
единичную функцию Хэвисайда

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

и дельта-функцию Дирака

$$\delta(x) = H'(x).$$

При этом:

$$\int_a^b f(x) \delta(x - x_0) dx = \begin{cases} f(x_0), & x_0 \in (a, b), \\ 0, & x_0 \notin (a, b). \end{cases} \quad (3)$$

Используем также предложенное автором [4] решение задачи Коши

$$\begin{cases} y'(t) + a^2 y(t) = \varphi(t), & t > 0 \\ y(t)|_{t=0} = y_0 \end{cases} \quad (4)$$

в виде компактного соотношения

$$y(t) = y_0 e^{-a^2 t} + \int_0^t \varphi(\tau) e^{-a^2(t-\tau)} d\tau. \quad (5)$$

Модель Максвелла является наиболее простой моделью, описывающей поведение вязкого тела, осложненного упругостью. В модели Максвелла упругие и вязкие элементы соединены последовательно, как это показано на рис. 1, напряжение $\sigma(t)$, приложенное к модели, вызывает деформацию в каждом элементе:

упругую деформацию пружины

$$\varepsilon_1(t) = \sigma(t)/E$$

и деформацию вязкого элемента

$$\varepsilon_2(t) = \left(1/\eta\right) \int_0^t \sigma(\tau) d\tau.$$

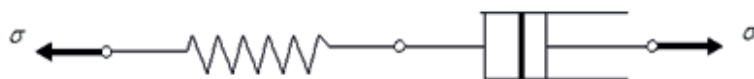


Рис. 1. Последовательное соединение демпфера и пружины.

Общая деформация складывается из деформации элементов $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, то есть

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)/E + \left(1/\eta\right) \int_0^t \sigma(\tau) d\tau,$$

откуда после дифференцирования приходим к уравнению вида (1) для модели Максвелла

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma, \quad t > 0. \quad (6)$$

Рассмотрим частные случаи для уравнения (6).

Постоянное напряжение (модель Максвелла)

Пусть в начальный момент времени (при $t = 0$) приложено постоянное напряжение σ_0 , действующее до момента времени t_0 , после чего строятся графики зависимости напряжения и деформации от времени (рис. 2).

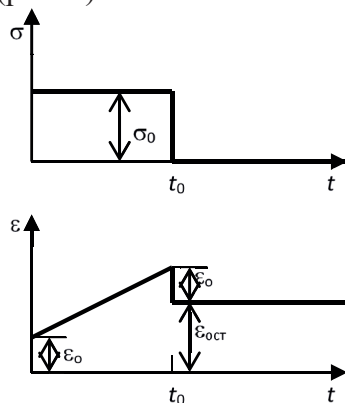


Рис. 2. Графики зависимости напряжения и деформации от времени в случае действия постоянного напряжения на модель Максвелла.

Имеем:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t_0 - t), \quad t > 0. \quad (7)$$

$$\text{Так как } \frac{d\sigma}{dt} = -\sigma_0 \delta(t_0 - t),$$

где $\sigma_0 = E\varepsilon_0$,

ε_0 – величина мгновенной деформации упругого элемента,
то (6) и (7) дают следующую задачу Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon_0 \delta(t_0 - t) + \left(\frac{\sigma_0}{\eta}\right) H(t_0 - t), \quad t > 0 \\ \varepsilon(t)|_{t=0} = \varepsilon_0 \end{cases} \quad (8)$$

решение которой, согласно (5), имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \varepsilon_0 \int_0^t \delta(t_0 - \tau) d\tau + \left(\frac{\sigma_0}{\eta}\right) \int_0^t H(t_0 - \tau) d\tau. \quad (9)$$

При вычислении интегралов в (9) следует проявить особую внимательность: необходимо перевести t_0 в нижний или верхний пределы в зависимости от значений времени t относительно t_0 и далее воспользоваться соотношениями (2) и (3). Если ввести также время релаксации $\tau = \eta/E$ и учесть, что

$$\sigma_0/\eta = \left(\sigma_0/E\right) \cdot \left(E/\eta\right) = \varepsilon_0/\tau,$$

то из (9) окончательно находим:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left\{ H(t_0 - t) + \left(1/\tau\right) \left[t - (t - t_0) H(t - t_0) \right] \right\}, t > 0. \quad (10)$$

Это и есть общая формула, описывающая деформацию в модели Максвелла в полном интервале времени $t > 0$ (рис. 2).

Для интервала времени $0 \leq t < t_0$ имеем из (10):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 (1 + t/\tau).$$

Остаточная деформация после снятия напряжения ($t > t_0$) есть:

$$\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_0 t_0 / \tau;$$

деформация в момент времени t_0 ($t \rightarrow t_0 - 0$, так что $H(t - t_0) \rightarrow 1$) равна

$$\varepsilon(t_0) = \varepsilon_0 (1 + t_0/\tau).$$

Постоянная деформация (модель Максвелла)

Пусть в начальный момент времени (при $t = 0$) модели дана мгновенная постоянная деформация ε_0 , действующая до момента времени t_0 , снимается график зависимости напряжения и деформации от времени (рис. 3).

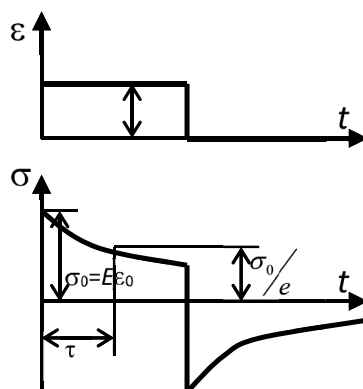


Рис. 3. Графики зависимости напряжения и деформации от времени в случае действия постоянной деформации на модель Максвелла.

Имеем:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t_0 - t), \quad t > 0. \quad (11)$$

Уравнение (6) относительно изменения напряжения $\sigma(t)$ дает следующую задачу Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt} + \left(\frac{E}{\eta}\right)\sigma = -(E\varepsilon_0)\delta(t_0 - t), & t > 0 \\ \sigma(t)|_{t=0} = \sigma_0 \end{cases}, \quad (12)$$

решение которой, согласно (5), имеет вид:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-(E/\eta)t} - \sigma_0 \int_0^t e^{-(E/\eta)(t-\tau)} \delta(\tau - t_0) d\tau. \quad (13)$$

После вычисления интеграла по схеме, изложенной выше, находим соотношение, содержащее полную информацию об изменении напряжения при всех $t > 0$:

$$\sigma(t) = \sigma_0 [1 - H(t - t_0) e^{t_0/\tau}] e^{-(t/\tau)}, \quad t > 0. \quad (14)$$

Для времени $t < t_0$ имеем из (14):

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-(t/\tau)},$$

при $t > t_0$ напряжение

$$\sigma(t) = \sigma_0 (1 - e^{t_0/\tau}) e^{-(t/\tau)},$$

в момент времени t_0 ($t \rightarrow t_0 + 0$) напряжение равно величине

$$\sigma(t_0) = -\sigma_0 (1 - e^{-t_0/\tau}).$$

Модель Кельвина-Фогта в отличие от модели Максвелла учитывает упругость, отличную от гуковской, которая возникает в полимерах за счет разворачивания макромолекул. В этой модели упругий и вязкий элементы соединены параллельно, как это показано на рис. 4. Деформация такой модели является общей для обоих элементов, а напряжение складывается из напряжений в каждом элементе:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2.$$

Дифференциальное уравнение для этой модели имеет вид:

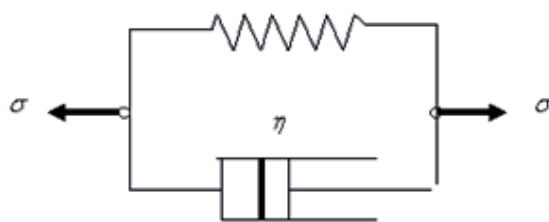


Рис. 4. Параллельное соединение демпфера и пружины.

$$\eta \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon = \sigma, t > 0. \quad (15)$$

Здесь, как и выше, могут быть рассмотрены частные случаи напряжения.

Постоянное напряжение (модель Кельвина-Фогта)

Так как начальное напряжение σ_0 не может вызывать мгновенную деформацию (демпфер не дает пружине мгновенно деформироваться), то задача Коши для уравнения (15) имеет вид (рис. 5):

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon}{dt} + (E/\eta)\varepsilon = (\sigma_0/\eta)H(t_0 - t), & t > 0 \\ \varepsilon(t)|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

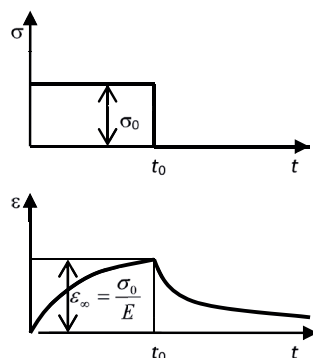


Рис. 5. Графики зависимости напряжения и деформации от времени в случае действия постоянного напряжения на модель Кельвина-Фогта.

Опуская выкладки, приведем конечный результат:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty e^{-t/\tau} \left[\left(e^{t_0/\tau} - 1 \right) - H(t_0 - t) \left(e^{t_0/\tau} - e^{t/\tau} \right) \right], t > 0, \quad (17)$$

где $\varepsilon_\infty = \sigma_0/E$, если учесть, что деформация возрастает по времени, асимптотически стремясь к гуксовой.

Рассмотрим интервалы времени $t < t_0$ и $t \geq t_0$. В первом из них $\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty (1 - e^{-t/\tau})$, во втором – $\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty (1 - e^{-t_0/\tau}) e^{-(t-t_0)/\tau}$.

Так как мгновенные возникновение и сокращение деформации отсутствуют, то при снятии напряжения в момент времени t_0 деформация должна быть непрерывной, что и подтверждают приведенные соотношения (рис. 5).

Постоянная скорость деформации (модель Кельвина-Фогта)

Модель Кельвина-Фогта не допускает мгновенной деформации, однако допускает деформацию с постоянной скоростью v_0 .

Рассмотрим следующий режим нагрузки (рис. 6):

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon}{dt} = v_0 H(t_0 - t), & t > 0 \\ \varepsilon(t)|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

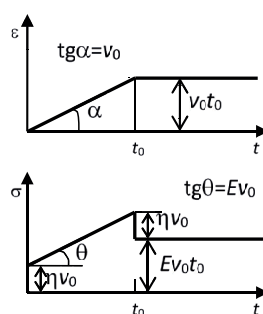


Рис. 6. Графики зависимости напряжения и деформации от времени в случае действия постоянной скорости деформации на модель Кельвина-Фогта.

Уравнения (15) и (18) приводят к соотношениям:

$$\varepsilon(t) = v_0 [t_0 - (t_0 - t)H(t_0 - t)], \quad t > 0, \quad (19)$$

$$\sigma(t) = \eta v_0 H(t_0 - t) + E v_0 [t_0 - (t_0 - t)H(t_0 - t)], \quad t > 0. \quad (20)$$

и в такой же форме позволяют описать напряжение для времени $t < t_0$:

$$\sigma(t) = \eta v_0 + E v_0 t$$

и для времени $t > t_0$:

$$\sigma = E v_0 t_0.$$

Использование обобщенных функций позволяет рассмотреть и более сложные трехэлементные модели, например, с двумя пружинами и одним демпфером и наоборот. Принципиальная сторона подхода при этом не меняется, математические выкладки практически не усложняются.

Предложенные соотношения могут быть использованы в реологии как обобщающая форма записи, содержащая известные частные случаи. Настоящая работа представляет также методический интерес, особенно для кафедр полимерного профиля.

Автор благодарит профессора Карташова Э.М. за предоставленную информацию.

Литература:

1. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Лабиринт, 1994. 366 с.
2. Аскадский А.А. Лекции по физикохимии полимеров. М.: Изд-во МГУ, 2001. 220 с.
3. Куличихин В.Г., Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: Колосс, 2003. 312 с.
4. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.

References:

1. Gul' V.E., Kuleznev V.N. The structure and mechanical properties of polymers. Moscow: Labirint Publ., 1994. 366 p. (in Russ.)
2. Askadskiy A.A. Lectures about physicochemistry of polymers. Moscow: MSU Publ., 2001. 220 p. (in Russ.)
3. Kulichihin V.G., Shramm G. Fundamental of practice rheology and rheometry. Moscow: Koloss Publ., 2003. 312 p. (in Russ.)
4. Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. 550 p. (in Russ.)

Об авторе:

Карлов Вячеслав Дмитриевич, студент кафедры биотехнологии и промышленной фармации Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (86, пр-т Вернадского, Москва, 119571, Россия).

About author:

Vyacheslav D. Karlov, student, Chair of Biotechnology and Industrial Pharmacy, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia)

УДК 517.956.8

АСИМПТОТИКА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДИФфуЗИИ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СРЕДЕ НА БОЛЬШИХ ВРЕМЕНАХ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ К ОЦЕНКАМ УСРЕДНЕНИЯ

С.Е. Пастухова[@],
О.А. Евсеева

Московский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: pas-se@yandex.ru

В R_x^d рассматривается задача Коши для линейного параболического уравнения второго порядка: $\frac{\partial u}{\partial t} - \operatorname{div}(a(x)\nabla u) = 0$, $u|_{t=0} = f(x)$. Матрица коэффициентов $a(x)$ измента, симметрична и 1-периодична по каждой переменной $x_1, \dots, x_d$. Задача моделирует диффузию в неоднородной среде, имеющей периодическую структуру. Решение $u(x, t)$ можно интерпретировать, например, как плотность распределения некоторой случайной величины в момент времени t и тогда подразумевается, что начальное распределение $f(x)$ – неотрицательная функция, интеграл от которой по R^d равен 1. Известно, что при большом значении времени t решение $u(x, t)$ близко к решению $u^0(x, t)$ задачи Коши: $\frac{\partial u^0}{\partial t} - \operatorname{div}(a^0 \nabla u^0) = 0$, $u^0|_{t=0} = f(x)$ с постоянной матрицей диффузии a^0 . Иными словами, при больших t диффузия в периодической среде описывается эффективно через диффузию в однородной среде, которой соответствует постоянная матрица диффузии a^0 , называемая матрицей эффективной диффузии. Недавно была доказана оценка погрешности приближения функции $u(x, t)$ решением в норме лебегова L^p -пространства по сечению $t = \text{const}$ для любого $p \in [1, \infty]$. Эта оценка порядка $O(t^{-1/2})$ при $t \rightarrow +\infty$ и имеет операторный тип. В настоящей работе найдено приближение для решения исходной задачи с оценкой погрешности того же типа, но порядка $O(t^{-1})$ при $t \rightarrow +\infty$. Это приближение оказывается суммой нулевого приближения $u^0(x, t)$ и некоторого корректора. Обоснование проведено при дополнительном условии липшицевости матрицы диффузии $a(x)$. Описанный выше результат используется для построения аппроксимации решения уравнения диффузии с быстро осциллирующими ε -периодическими коэффициентами в норме L^p – пространства на сечении $t = 1$. Погрешность аппроксимации имеет оценку порядка $O(\varepsilon^2)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Результаты работы можно использовать в разных областях, например, при расчете теплового потока в композиционной среде с мелкоячеистой периодической структурой или расчете плотности популяции бактерий в периодической питательной среде.

Ключевые слова: уравнение диффузии, эффективная диффузия, усредненный оператор, фундаментальное решение, задачи на ячейке, асимптотика на больших временах, оценка усреднения в лебеговых нормах.

LARGE-TIME ASYMPTOTIC OF THE SOLUTION TO THE DIFFUSION EQUATION AND ITS APPLICATION TO HOMOGENIZATION ESTIMATES

**S.E. Pastukhova[@],
O.A. Evseeva**

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: pas-se@yandex.ru

The Cauchy problem for a linear second order parabolic equation $\frac{\partial u}{\partial t} - \operatorname{div}(a(x)\nabla u) = 0$ with 1-periodic measurable coefficients is considered R^d , $d \geq 2$. The problem models diffusion in a nonhomogeneous periodic medium. The appropriate diffusion operator A is self-adjoint in $L^2(R^d)$. The large-time behaviour of the solution of the Cauchy problem is of main interest for us. To this end, we study first of all the fundamental solution, in other words, the kernel of the exponential $\exp(-tA)$, more exactly, its large-time asymptotics. Its approximation is found with integral error estimate of order $O(t^{-1})$, as time t tends to $+\infty$.

To construct this approximation and carry out its justification we use

(i) the known fundamental solution to the homogenized diffusion equation (having constant coefficients);

(ii) solutions of so-called auxiliary problems on a periodicity cell, which are formulated in a recurrent way. We substantiate this approximation under additional regularity condition on the diffusion matrix $a(x)$: it should be Lipschitz continuous.

The results of asymptotic behaviour of the fundamental solution are applied to obtain an approximation of order $O(t^{-1})$ for the exponential $\exp(-tA)$ in operator L^p -norms, on the section $t = \text{const}$ as t tends to $+\infty$.

There are also some corollaries of these results to operator estimates for a similar exponential $\exp(-tA_\varepsilon)$, A_ε being a diffusion operator with quickly oscillating ε -periodic coefficients, as ε tends to zero.

This exponential corresponds to the Cauchy problem: $\frac{\partial u^\varepsilon}{\partial t} - \operatorname{div}(a(\varepsilon^{-1}x)\nabla u^\varepsilon) = 0$, $u^\varepsilon|_{t=0} = f(x)$ modelling diffusion in a strongly nonhomogeneous ε -periodic medium. Here ε is a small parameter. We construct approximations of order $O(\varepsilon^2)$ for the exponential $\exp(-tA_\varepsilon)$ in operator L^p – norm on the section $t = \text{const}$ for arbitrary finite fixed t (say, $t=1$). This approximation is a sum of the exponential $\exp(-tA_0)$ with a homogenized operator A_0 and some correcting operator.

The results have a broad range of applications, e.g., for computing heat flow in a periodic composite medium with a small periodicity cell or for bacterial density estimation in a periodic culture medium.

Keywords: diffusion equation, effective diffusion, homogenized operator, fundamental solution, cell problems, large-time asymptotic, homogenization estimates in Lebesgue norms.

Введение

В настоящей работе изучается задача Коши для функции $u = u(x, t)$, $x \in R^d$, $t \geq 0$,

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - \operatorname{div}(a(x)\nabla u) = 0, t > 0, \\ u|_{t=0} = f \in C_0^\infty(R^d) \end{cases} \quad (1)$$

с измеримой вещественной симметрической матрицей $a(x)$ такой, что

$$\nu \xi^2 \leq a(x) \xi \cdot \xi \leq \nu^{-1} \xi^2, \forall \xi \in R^d, \nu > 0. \quad (2)$$

Задача (1) моделирует диффузию в неоднородной среде, $a(x)$ называют матрицей диффузии. Решение $u(x, t)$ можно интерпретировать, например, как плотность распределения некоторой случайной величины в момент времени t . При этом подразумевается, что начальное распределение $f(x) \geq 0$, $\int_{R^d} f(x) dx = 1$.

На первый взгляд, рассматриваемое уравнение не содержит малого параметра. Малый параметр появляется естественным образом, если изучить поведение решения $u(x, t)$ при больших значениях времени t , т.е. при $t \rightarrow +\infty$.

Задача (1) допускает операторную запись

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + Au = 0, t > 0, \\ u|_{t=0} = f, \end{cases}$$

где A – оператор в $L^2(R^d)$, заданный квадратичной формой

$$\int_{R^d} a \nabla u \cdot \nabla u dx,$$

область определения которой есть соболевское пространство $H^1(R^d)$. Квадратичная форма является замкнутой, а сам оператор A – неотрицательным и самосопряженным. Решение задачи Коши (1) запишется через экспоненту (или полугруппу) оператора A , а именно,

$$u(\cdot, t) = e^{-tA} f.$$

Пусть матрица периодична по каждому переменному $x_1, \dots, x_d$ с периодом 1, единичный куб $\square = \left[-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right)^d$ есть ячейка периодичности. Тогда известно асимптотическое поведение решения $u(x, t)$ при $t \rightarrow +\infty$, и это поведение можно сколь угодно точно описать. Иными словами, известно асимптотическое поведение полугруппы e^{-tA} при большом значении времени.

На больших временах за поведение полугруппы прежде всего отвечает постоянная усредненная матрица диффузии a^0 (формулы для ее отыскания по исходной матрице $a(x)$ ниже, см. (10), (11)), и надо рассматривать усредненную задачу

$$\begin{cases} \frac{\partial u^0}{\partial t} + A_0 u^0 = 0, t > 0, \\ u^0|_{t=0} = f \in C_0^\infty(R^d) \end{cases} \quad (3)$$

с оператором диффузии

$$A_0 = -\operatorname{div}(a^0 \nabla),$$

где матрица диффузии a^0 постоянна.

Оператор A^0 существенно более прост, чем исходный, хотя имеет ту же структуру. В [1] было доказано предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup_{\|f\|_{L^\infty(R^d)} \leq 1} \|u(x, t) - u^0(x, t)\|_{L^\infty(R^d)} = 0,$$

означающее сходимость полугруппы по операторной норме в $L^\infty(R^d)$, т.е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e^{-tA} - e^{-tA_0}\|_{L^\infty(R^d) \rightarrow L^\infty(R^d)} = 0.$$

Позже в [2] удалось установить оценку скорости этой сходимости по времени

$$\|e^{-tA} - e^{-tA_0}\|_{L^\infty(R^d) \rightarrow L^\infty(R^d)} \leq \frac{c}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

с константой, зависящей только от размерности d и постоянной эллиптичности ν .

Кроме того, была доказана оценка

$$\|e^{-tA} - e^{-tA_0}\|_{L^2(R^d) \rightarrow L^2(R^d)} \leq \frac{c}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

с константой такого же типа, что в (4) [3, 4].

Наконец, недавно в работе [5] предложена оценка

$$\|e^{-tA} f - e^{-tA_0} f\|_{L^p(R^d)} \leq \frac{c}{\sqrt{t}} \|f\|_{L^p(R^d)} \quad \forall p \in [1, \infty] \quad (6)$$

с единой константой для всех p . Предыдущие оценки (4) и (5) вытекают отсюда при $p = \infty$ и $p = 2$, для вероятностной интерпретации уравнения диффузии особенно важен случай $p = 1$.

Операторные оценки можно вывести из оценок поточечного характера. Примеры операторных оценок приведены выше (4–6). Примером поточечной является оценка

$$|K(x, y, t) - K_0(x, y, t)| \leq \frac{c}{t^{\frac{d+1}{2}}}, \quad x, y \in R^d, c = \text{const}(d, \nu). \quad (7)$$

Здесь $K(x, y, t)$ – фундаментальное решение для параболического уравнения $\frac{\partial u}{\partial t} + Au = 0$, то есть решение задачи (1), если в качестве начальной функции взять дельта-функцию $\delta(x-y)$, сосредоточенную в точке y (иными словами, K – ядро интегрального оператора e^{-tA}); $K_0(x, y, t)$ – аналогичный объект для усредненного уравнения.

Ввиду постоянства коэффициентов усредненного уравнения можно точно найти K_0 с помощью преобразования Фурье, а именно,

$$K_0(x, y, t) = (4\pi t)^{-\frac{d}{2}} (\det a^0)^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{(a^0)^{-1}(x-y)(x-y)}{4t}}. \quad (8)$$

Из поточечных оценок типа (7) с помощью общих соображений (к ним относится, в частности, экспоненциальная оценка Нэша-Аронсона ([6], гл. II) получается интегральная оценка

$$\int_{R^d} |K(x, y, t) - K_0(x, y, t)| dy \leq \frac{c}{\sqrt{t}}, \quad \forall x \in R^d \quad (9)$$

которая имеет ключевое значение для эффективного описания диффузии в рассматриваемой среде. Из нее на основе леммы Шура об оценке интегрального оператора [7] получается L^p – оценка (6). Интегральная оценка (9) доказана в работе В.В. Жикова [2] 1989 года (см. так же более подробное доказательство её в недавней работе [5]). Естественно поставить вопрос о более точных интегральных оценках, которые отвечают не нулевому, а следующим приближениям для фундаментального решения K .

Цель настоящей работы – построить и обосновать приближение $K_1(x, y, t)$ для фундаментального решения $K(x, y, t)$ с погрешностью в интегральной норме порядка $O(t^{-1})$ при $t \rightarrow +\infty$ и на его основе найти приближение для полугруппы e^{-tA} в операторной L^p – норме ($1 \leq p \leq \infty$) того же порядка точности при большом значении времени. Основные результаты сформулированы в теоремах 1 и 2.

Для доказательства наших результатов используем предложенную в [2] версию *спектрального метода*, в основе которой лежит блоховское разложение функций и блоховское представление операторной экспоненты, точнее, ядра операторной экспоненты, рассматриваемой как интегральный оператор. Этот метод подробно изложен в [5].

Раздел 1

Приведём формулы для определения усредненной (или эффективной) матрицы диффузии:

$$a^0 = \langle a(\cdot)(I + \nabla N(\cdot)) \rangle, \quad (10)$$

где I – единичная матрица;

вектор $N(x) = (N_1(x), \dots, N_d(x))$ составлен из решений задач на ячейке

$$N_j \in H_{per}^1(\square), \quad \operatorname{div}(a(x)(\nabla N_j + e_j)) = 0, \quad \langle N_j \rangle = 0, \quad j = 1, \dots, d. \quad (11)$$

где $e_1, \dots, e_d$ – канонический базис в R^d ; $N_j \in H_{per}^1(\square)$ – пространство Соболева 1-периодических функций, а угловыми скобками обозначено среднее периодической функции по ячейке $\square$.

В теории усреднения хорошо известно, что матрица (10) симметрична и удовлетворяет оценке

$$a^0 \xi \cdot \xi \geq \nu |\xi|^2 \quad \forall \xi \in R^d$$

с той же константой, что в (2) [6, 8].

Важной особенностью задачи на ячейке (11) является ограниченность решения: $N_j \in L^\infty(\square)$ в силу обобщенного принципа максимума ([9], Приложение В к гл. II).

Раздел 2

До сих пор выписывалось только нулевое приближение для K . Спектральный метод позволяет дать полное асимптотическое разложение K . Ограничимся здесь лишь первым приближением. Используя решения задачи на ячейке (11), определим первое приближение равенством

$$K_1(x, y, t) = K_0(x, y, t) + (N_j(x) - N_j(y)) \frac{\partial}{\partial x_j} K_0(x, y, t), \quad (12)$$

где по повторяющимся индексам подразумевается суммирование от 1 до d .

Приближение (12) как функция переменной y принадлежит $L^\infty(R^d)$ и $L^1(R^d)$ для всех $x \in R^d$ и $t > 0$ ввиду ограниченности множителей N_j и экспоненциального убывания на бесконечности функции K_0 и ее производных $\frac{\partial}{\partial x_j} K_0$ по пространственным переменным.

Справедлива оценка (ее доказательство дано в [5])

$$|K(x, y, t) - K_1(x, y, t)| \leq \frac{c}{t^{\frac{d+2}{2}}}, \quad c = \text{const}(d, \nu), \quad (13)$$

показывающая, что $K_1(x, y, t)$ доставляет более точное приближение для $K(x, y, t)$ в точечной норме, чем $K_0(x, y, t)$ (7). Дополнительное улучшение точности происходит на порядок $t^{0.5}$. В интегральной норме $K_1(x, y, t)$ дает такой же выигрыш в приближении по сравнению с $K_0(x, y, t)$.

Теорема 1. Пусть матрица $a(y)$ липшицева, т.е. $|a(y) - a'(y)| \leq c_L |y - y'|$ для всех $y, y' \in \square$. Тогда верна интегральная оценка

$$\int_{R^d} |K(x, y, t) - K_1(x, y, t)| dy \leq \frac{c}{t} \quad (14)$$

с константой, зависящей только от ν, c_L, d .

Для доказательства оценки (14) используется второе приближение $K_2(x, y, t)$, в построении которого участвуют решения вспомогательных задач на ячейке, не только первого порядка, т.е. задачи (11), но и выше (см. эти задачи, например, в [9], где они выписываются рекуррентно). Липшицевость коэффициентов матрицы $a(y)$ обеспечивает принадлежность решений всех вспомогательных задач на ячейке пространству L^∞ .

Как следствие из оценки (14), по лемме Шура вытекает

Теорема 2. В предположениях теоремы 1 имеет место оценка для первого приближения операторной экспоненты e^{-tA} :

$$\|e^{-tA} - (e^{-tA_0} + N(\cdot) \cdot \nabla e^{-tA_0} - e^{-tA_0} \nabla^* \cdot N(\cdot))\|_{L^p(R^d) \rightarrow L^p(R^d)} \leq \frac{c}{t} \quad \forall p \in [1, \infty] \quad (15)$$

с единой константой $c = \text{const}(d, \nu, c_L)$, где ∇ – градиент по пространственным переменным, $\nabla^* = \text{div}$.

Раздел 3

Рассмотрим задачу Коши для функций $u^\varepsilon = u^\varepsilon(x, t), x \in R^d, t \geq 0$,

$$\begin{cases} \frac{\partial u^\varepsilon}{\partial t} + A_\varepsilon u^\varepsilon = 0, t > 0, \\ u^\varepsilon|_{t=0} = f, \end{cases}$$

с малым параметром $\varepsilon > 0$, где

$$A_\varepsilon = -\operatorname{div}(a_\varepsilon \nabla), a_\varepsilon(x) = \left(\frac{x}{\varepsilon} \right)$$

и $a(y)$ – 1-периодическая измеримая симметрическая матрица, удовлетворяющая условию (2). Имеем здесь оператор диффузии с быстро осциллирующими ε -периодическими коэффициентами. Оператор A_ε сильно неоднородный. Встает задача об его усреднении, то есть о его замене на оператор с постоянными коэффициентами, который в определенном смысле близок к нему.

Автомодельная замена

$$y = \frac{x}{\varepsilon}, \tau = \frac{t}{\varepsilon^2}$$

сводит задачу с ε -периодической матрицей $a\left(\frac{x}{\varepsilon}\right)$ к задаче с 1-периодической матрицей $a(y)$. Именно, функция

$$z^\varepsilon(y, \tau) = u^\varepsilon(\varepsilon y, \varepsilon^2 \tau)$$

есть решение задачи Коши

$$\begin{cases} \frac{\partial z^\varepsilon}{\partial \tau} + A z^\varepsilon = 0, \tau > 0, \\ z^\varepsilon|_{\tau=0} = f_\varepsilon, f_\varepsilon(y) = f(\varepsilon y). \end{cases}$$

Тогда $z^\varepsilon(y, \tau) = e^{-\tau A} f_\varepsilon$, или в обозначениях раздела *введение*.

$$z^\varepsilon(y, \tau) = \int_{R^d} K(y, y', \tau) f(\varepsilon y') dy'. \quad (16)$$

Обозначим через $K_\varepsilon(x, x', t)$ фундаментальное решение для оператора $\frac{\partial}{\partial t} + A_\varepsilon$, т.е. ядро интегрального оператора e^{-tA_ε} . Тогда

$$u^\varepsilon(x, t) = \int_{R^d} K_\varepsilon(x, x', t) f(x') dx'.$$

С другой стороны,

$$u^\varepsilon(x, t) = z^\varepsilon\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) \stackrel{(16)}{=} \int_{R^d} K\left(\frac{x}{\varepsilon}, y', \frac{t}{\varepsilon^2}\right) f(\varepsilon y') dy' = \int_{R^d} K\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) f(x') \varepsilon^{-d} dx',$$

следовательно,

$$K_\varepsilon(x, x', t) = \varepsilon^{-d} K\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right). \quad (17)$$

Непосредственно из формулы (8) видно, что

$$\varepsilon^{-d} K_0\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) = K_0(x, x', t). \quad (18)$$

Поэтому из оценки (7) выводим

$$\left| K\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) - K_0\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) \right| \leq c \frac{\varepsilon^{d+1}}{t^{\frac{d+1}{2}}}, \quad \left| \varepsilon^{-d} K\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) - \varepsilon^{-d} K_0\left(\frac{x}{\varepsilon}, \frac{x'}{\varepsilon}, \frac{t}{\varepsilon^2}\right) \right| \leq \varepsilon \frac{c}{t^{\frac{d+1}{2}}},$$

откуда в силу (17) и (18),

$$|K_\varepsilon(x, x', t) - K_0(x, x', t)| \leq \varepsilon \frac{c}{t^{\frac{d+1}{2}}}.$$

Аналогично из (9) вытекает интегральная оценка

$$\int_{R^d} |K_\varepsilon(x, x', t) - K_0(x, x', t)| dx' \leq \varepsilon \frac{c}{\sqrt{t}},$$

из которой по лемме Шура уже можно вывести операторную оценку погрешности усреднения

$$\|e^{-tA_\varepsilon} - e^{-tA_0}\|_{L^p(R^d) \rightarrow L^p(R^d)} \leq \varepsilon \frac{c}{\sqrt{t}} \quad \forall p \in [1, \infty] \quad (19)$$

с единой константой для всех p .

Справедливы также аналоги оценок (15) и (14) для близости экспоненты e^{-tA_ε} и ее ядра $K_\varepsilon(x, x', t)$ к соответствующим аппроксимациям.

Выводы

При дополнительном предположении о липшицевости исходной матрицы диффузии $a(x)$ установлены:

(i) интегральная оценка (14) для разности фундаментального решения $K(x, y, t)$ исходной задачи (1) и его первого приближения $K_1(x, y, t)$, заданного в (12);

(ii) оценка разности решения задачи (1) и его первого приближения в L^p – нормах по сечениям $t = \text{const}$, а именно,

$$\|e^{-tA} f - (e^{-tA_0} f + N \cdot \nabla e^{-tA_0} f - e^{-tA_0} \text{div}(Nf))\|_{L^p(R^d)} \leq \frac{c}{t} \|f\|_{L^p(R^d)}, \quad 1 \leq p \leq \infty,$$

с единой константой для всех p .

Полученные результаты можно использовать в различных прикладных областях, например, при расчете теплового потока в композите с мелкоячеистой периодической структурой или расчете плотности популяции бактерий в периодической питательной среде.

Литература:

1. Жиков В.В. Асимптотическое поведение и стабилизация решений параболического уравнения второго порядка с младшими членами // Труды Московского математического общества. 1983. Т. 46. С. 69–98.
2. Жиков В.В. Спектральный подход к асимптотическим задачам диффузии // Дифференциальные уравнения. 1989. Т. 25. № 1. С. 44–50.
3. Суслина Т.А. Об усреднении периодических параболических систем // Функциональный анализ и его приложения. 2004. Т. 38. Вып. 4. С. 86–90.
4. Zhikov V.V., Pastukhova S.E. Estimates of homogenization of parabolic equation with periodic coefficients // Russian Journal of Math. Physics. 2006. V. 13. Iss. 2. P. 224–237.
5. Жиков В.В., Пастухова С.Е. Об операторных оценках в теории усреднения // Успехи мат. наук. 2016. Т. 71. Вып. 3. С. 27–122.
6. Жиков В.В., Козлов С.М., Олейник О.А. Усреднение дифференциальных операторов. М.: Физматлит. 1993. 464 с.
7. Коротков В.Б. Интегральные операторы. Новосибирск: Наука, 1983. 224 с.
8. Bensoussan A., Lions J.L., Papanicolaou G. Asymptotic Analysis for Periodic Structure. Amsterdam: North-Holland, 1978. 699 p.
9. Киндерлерер Д., Стампацкья Г. Введение в вариационные неравенства и их приложения. М.: Мир, 1983. 256 с.
10. Pastukhova S.E. Approximations of the exponential of an operator with periodic coefficients // Journal of Mathematical Sciences. 2012. V. 181. № 5. P. 668–700.

References:

1. Zhikov V.V. Asymptotic behavior and stabilization of solutions of a second-order parabolic equation with lowest terms // Trudy Moskovskogo Matematicheskogo Obshchestva (Proceedings of Moscow Mathematical Society). 1983. V. 46. P. 69–98. (in Russ.).
2. Zhikov V.V. Spectral approach to asymptotic diffusion problems // Differ. Uravn. (Partial Differential Equations). 1989. V. 25. № 1. P. 44–50. (in Russ.).
3. Suslina T.A. On Homogenization of Periodic Parabolic Systems // Funktsional. Anal. i Prilozhen. (Functional Analysis and Its Applications). 2004. V. 38. Iss. 4. P. 86–90. (in Russ.).
4. Zhikov V.V., Pastukhova S.E. Estimates of homogenization of parabolic equation with periodic coefficients // Russian Journal of Math. Physics. 2006. V. 13. Iss. 2. P. 224–237.
5. Zhikov V.V., Pastukhova S.E. Operator estimates in homogenization theory // Uspekhi Mat. Nauk (Russian Mathematical Surveys). 2016. V. 71. Iss. 3. P. 27–122. (in Russ.).
6. Zhikov V.V., Kozlov S.M., Oleinik O.A. Averaging of differential operators. Moscow: Fizmatlit. 1993. 464 p. (in Russ.).
7. Korotkov V.B. Integral operators. Novosibirsk: Nauka, 1983. 224 p. (in Russ.).
8. Bensoussan A., Lions J.L., Papanicolaou G. Asymptotic Analysis for Periodic Structure. Amsterdam: North-Holland, 1978. 699 p.

9. Kinderlehrer D., Stampacchia J. An introduction to variational inequalities and their applications. Moscow: Mir, 1983. 256 p. (in Russ.).

10. Pastukhova S.E. Approximations of the exponential of an operator with periodic coefficients // Journal of Mathematical Sciences. 2012. V. 181. № 5. P. 668–700.

Об авторах:

Пастухова Светлана Евгеньевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики 2 Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, д. 78).

Евсеева Ольга Алексеевна, старший преподаватель кафедры высшей математики 2 Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, д. 78).

About authors:

Svetlana E. Pastukhova, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of Higher Mathematics 2, Physico-Technological Institute, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Olga A. Evseeva, Senior Teacher of of the Chair of Higher Mathematics 2, Physico-Technological Institute, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

УДК 37; 378.09; 378.3; 378.11

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА
В ПЕРИОД «ОТТЕПЕЛИ»: ПРОРЫВЫ
И ПРИЧИНЫ ТОРМОЖЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ**

**Е.В. Бодрова^{1, @},
В.В. Калинов²**

¹Московский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Российский государственный университет (НИУ) нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва 119991, Россия

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

На основе анализа научной литературы, а также опубликованных и неопубликованных документов обосновывается вывод о том, что благодаря мощному научно-техническому потенциалу, верному в целом выбору приоритетов в области развития науки и техники, наличию общенационального проекта, «оттепели», активизировавшейся на предприятиях работе по организации массового движения рационализаторов и изобретателей, популяризации достижений новаторов производства, СССР сумел успешно преодолеть первый этап научно-технической революции, осуществить настоящие технологические прорывы, обеспечить высокие темпы экономического роста. Подчеркивается, что интеграции науки и производства препятствовали: ведомственный подход, недостатки плановой системы с ее жесткой регламентацией и централизмом, ориентацией, прежде всего, на объемы выпускаемой продукции, но не на внедрение новой техники и модернизацию производства. Объемы производства обеспечивались в основном за счет строительства многих тысяч крупных заводов и фабрик, причем создавались крупные машиностроительные комплексы со вспомогательным производством, характеризующиеся низкой экономической эффективностью. Автоматизация в большинстве отраслей охватывала единичные, не связанные между собой агрегаты и процессы. Слабо внедрялось в промышленность дистанционное управление и телемеханизация производства. В гражданских отраслях в полной мере не использовался опыт военно-промышленного комплекса в сфере обеспечения интеграции производства и науки.

Ключевые слова: научно-техническая политика, изобретение, внедрение, модернизация.

**STATE SCIENTIFIC-TECHNICAL POLICY IN THE PERIOD
OF "THAW": A BREAKTHROUGH AND THE REASONS
FOR THE DECELERATION OF MODERNIZATION**

**E.V. Bodrova^{1, @},
V.V. Kalinov²**

¹Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

²Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow 119991, Russia

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

On the basis of the analysis of scientific literature, published and previously unpublished documents studied by the authors in the Russian state archive of economy, the Russian state archive of contemporary history, the State archive of the Russian Federation, a study of the problem of the evolution of the state scientific-technical policy of the USSR during the "thaw" was carried out. An attempt was made to identify the factors that determined the technological breakthroughs and the causes that impeded the modernization process. It is concluded that due to the powerful scientific and technical potential and, in general, correct selection of priorities in the development of science and technology, social optimism, the Soviet Union managed to successfully overcome the first stage of the scientific-technological revolution. However, the integration of science and production was hampered by the departmental approach, the shortcomings of the planning system with its strict regulation and centralism focused primarily on production volumes and not on the introduction of new technology, modernization of production. The volume of production was achieved mainly due to the construction of many thousands of large plants and factories. Moreover, large machine-building complexes with auxiliary production characterized by low economic efficiency were created. Automation in most industries covered individual, unrelated units and processes. Remote management and remote control of production were sparsely implemented in the industry. In the civilian sectors, the experience of the military-industrial complex in the sphere of ensuring the integration of production and science was not fully used.

Keywords: scientific-technical policy, invention, implementation, upgrading.

На новом этапе российской модернизации и критической значимости для России технологического рывка мы полагаем важным и актуальным переосмысление различных сюжетов отечественной истории советского периода, включая эволюцию государственной научно-технической политики (ГНТП).

Этап в эволюции государственной научно-технической политики, начавшийся с середины 1950-х гг. и продолжавшийся до начала 1960-х гг., исследователями справедливо выделяется как отдельный и весьма эффективный. Традиционно его начало связывают с влиянием научно-технической революции. Отличался он и активным ростом научно-исследовательской деятельности, и изменением приоритетов, и поиском наиболее эффективных форм и структур управления. Еще в июле 1955 г. президент АН СССР академик А.Н. Несмеянов на очередной сессии Академии заявил: «Мы накануне величайшей технико-экономической революции» [1]. Однако, в действительности, далеко не все партийные лидеры и ученые разделяли эту точку зрения. Тем не менее, пристальное внимание к информационному обмену в науке, проблемам формирования научных кадров, созданию прослойки технически образованной интеллигенции характерно для всех съездов и пленумов партии в 1950-е гг. В сфере фундаментальных наук в этот период обозначились такие тенденции, как расширение кооперации, в том числе международной. Так, в 1956 г. советские физики приняли участие в Международном конгрессе по теоретической физике (США), в Совещании по физике космических лучей, в Международном коллоквиуме по спектроскопии (Голландия), в Международной конференции по люминесценции кристаллических веществ (Франция), в Симпозиуме на тему «Электромагнитные явления в космической физике» (Швеция) и др. Советских ученых направили для участия в конференции Международного кристаллографического союза [2].

Полагаем, что рубежными событиями, определившими изменения курса, стали Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 28 мая и Пленум ЦК партии 4–12 июля 1955 г. [3]. Им предшествовало Всесоюзное совещание работников промышленности, прошедшее в середине мая 1955 г., на котором председатель Совета Министров Н.А. Булганин, заметив, что мир живет в условиях быстрого развития науки и техники, одновременно указал на низкую производительность труда в СССР [4]. В закрытом письме, распространенном до совещания, отставание в процессе внедрения передовой техники объяснялось «самоуспокоенностью, зазнайством многих работников промышленности», «утратой ими чувства ответственности перед государством за порученное дело», «забвением перспективы и ориентировки в технической политике», партийных директив о необходимости «постоянного развития техники, без которого невозможно развитие социалистического производства» [4]. На совещании констатировалось также «запущенное состояние» дел с изобретательством: «рассмотрение изобретений и рационализаторских предложений нередко растягивается на годы» [4]. В числе факторов торможения назывались и недостатки в системе управления предприятиями, и иждивенческие настроения их руководителей. В качестве важнейшей задачи определялись: «быстрейшая» разработка и внедрение передовой техники.

Сразу же после Всесоюзного совещания работников промышленности ЦК КПСС и Совет Министров СССР 28 мая 1955 г. приняли Постановление «Об улучшении дела изучения и внедрения в народное хозяйство опыта и достижений передовой отечественной и зарубежной науки и техники» [3]. Был образован Государственный комитет Совета Министров СССР по новой технике. В Постановлении июльского (1955 г.) Пленума ЦК КПСС невыполнение заданий по росту производительности труда объяснялось медленным внедрением новой и плохим использованием имеющейся техники, неудовлетворительной организацией производства, неупорядоченностью нормирования труда и заработной платы, а также нарушениями трудовой и производственной дисциплины [5]. Пленум осудил как ошибочную «теорию» об отсутствии морального износа техники в условиях социализма, получившую в то время широкое хождение. Подчеркивалось, что главная линия в развитии промышленности – «...всемерное повышение технического уровня производства. Основным условием решения этой задачи должно быть резкое повышение темпов технического совершенствования во всех отраслях промышленности на базе электрификации, комплексной механизации и автоматизации» [6].

В результате на предприятиях резко активизировалась работа по организации массового движения рационализаторов и изобретателей, популяризации достижений новаторов производства, повышению теоретических и специальных знаний, оказанию практической помощи в разработке и внедрении предложений. Например, только на железнодорожном транспорте в 1955 г. были проведены: общественный смотр «постановки дела изобретательства и рационализации», 232 конкурса, 559 конференций, 3177 собраний, свыше 32500 лекций, 11600 бесед, было издано более 1250 технических бюллетеней по обмену опытом, информационных писем, брошюр, сборников, альбомов [7]. Однако результаты подобной активности не свидетельствовали о технологических прорывах. Проверяющие, направленные Госкомитетом по изобретениям, вынуждены были констатировать: «Абсолютное большинство предложений, поступающих на предприятия, представляют собой

рационализаторские и технические усовершенствования, а изобретений поступает крайне мало – единицы предложений» [8]. Наибольшую тревогу вызывала проблема внедрения изобретений в производство. Так, по Министерству электротехнической промышленности в 1955 г. было принято 175 изобретений, а внедрено – всего 24 изобретения, или 14%. Срок внедрения изобретений по Министерству электротехнической промышленности в ряде случаев достигал 5–8 лет. Подобное положение наблюдалось и в Министерстве автомобильной промышленности. В ряду причин специалистами называлась крайне медленная разработка и изготовление опытных образцов [9]. Для ускорения процесса внедрения создавались экспериментальные цехи и бригады. «Однако их очень мало и работают они по-разному, – писали авторы отчетов. – При таком планировании внедрения изобретений потребуется более 20 лет, чтобы реализовать хотя бы половину». Проверки вскрывали также факты нарушения инструкций о выплате вознаграждений и ущемления авторских прав изобретателей [9].

Широко в этот период использовалась практика изучения и использования зарубежных достижений. За 1955–1957 гг. было закуплено и завезено в Советский Союз около 3500 наименований образцов различных машин, станков, приборов, аппаратуры и материалов, представляющих большой интерес для отечественной промышленности. Однако изучение, испытание и использование завезенных из-за границы образцов техники, а также внедрение предложений, разработанных по материалам командировок в зарубежные страны, осуществлялось чрезвычайно медленно, многие образцы, признанные лучшими по сравнению с отечественными образцами, длительное время не внедрялись в производство [10].

В 1957 г. началась реформа системы управления в промышленности и строительстве. Децентрализация управления влекла за собой более тесное взаимодействие предприятий на местах, принадлежащих разным отраслям, т.е. требовала преодоления существующих ведомственных барьеров. Вторая проблема была гораздо сложнее первой, поскольку корпоративная культура министерств и ведомств предполагала закрытость, особенно в сфере ВПК. Поэтому ведомственные барьеры проще всего было просто сломать, отобрав предприятие у ведомства и передав его другой структуре. Но как только совнархозы укрепили свои позиции, бюрократизм пророс в новые структуры. Уже в 1959 г., спустя два года с момента организации совнархозов, началось их укрупнение, количество совнархозов было доведено до 47 [11].

Оценивая эффективность советской государственной промышленной политики в рассматриваемый период, исследователи обращают внимание на невозможность в настоящее время руководствоваться данными официальной советской статистики и приводят совершенно различные цифры и характеристики. Согласно найденным нами данным Госплана СССР, приведенным в закрытом докладе ЦК КПСС и Совету Министров СССР от 28 августа 1964 г., ныне рассекреченном, среднегодовые темпы прироста промышленной продукции в СССР за 1954–1963 гг. составили 10,5% [12], то есть были очень высокими!

Отличаются крайней противоречивостью и оценки развития научно-технической сферы и реорганизации управления ею в этот период: часть исследователей говорит об «имитационном», «заимствующем» характере советской экономики, другие – о наличии достойной собственной научно-технической базы.

Полагаем, что для этого этапа в эволюции ГНТП характерно большее внимание со стороны партийных органов к развитию информационного обмена в науке, проблеме формирования научно-технических кадров. Тогда принимались решения о лучшей координации в работе научно-исследовательских центров, укреплении их связей с производством. Возросла самостоятельность отраслевых министерств, в том числе, и при принятии решений относительно научных разработок. В течение 1959–1975 гг. опытно-промышленная, исследовательская и экспериментальная база появилась на всех предприятиях. Целый ряд партийно-правительственных постановлений предопределил трехкратное увеличение сети отраслевых НИИ и их филиалов, а также объемов финансирования, выделяемых на проведение НИОКР [13]. В результате появилось значительное количество новых институтов, не имеющих, впрочем, достаточных для нормального функционирования ресурсов. Так, численность научных учреждений и, в частности, научно-исследовательских институтов к 1959 г. выросла более, чем в полтора раза по сравнению с 1940 г., составив 3197 и 1319 организаций, соответственно (в 1940 г. насчитывалось научных учреждений всего 1821, НИИ – 756). Наиболее значительным был рост научных учреждений в РСФСР – 3197 организаций и в УССР – 488 организаций [14].

Еще весной 1955 г. было признано необходимым создание на базе Госкомитета по внедрению новой техники в народное хозяйство Государственного комитета Совета Министров СССР по новой технике (Гостехника СССР), которому вменялось в обязанность разрабатывать предложения об основных направлениях научно-технического прогресса по отдельным отраслям, перспективные планы внедрения новых технических достижений и технологий, осуществлять контроль за их выполнением. Создавались госкомитеты по технике и в союзных республиках. В 1957 г. они стали подчиняться Государственному научно-техническому комитету СССР, созданному на базе Гостехники СССР. При Совете Министров СССР появились Государственные комитеты для обеспечения научно-технического руководства авиационной техникой, автоматизацией, машиностроением, радиоэлектроникой и т.д.

В этот период значительное внимание стало уделяться активизации работы научно-технических обществ, конструкторских, технологических бюро и групп экономического анализа, действовавших на общественных началах. Достаточно активно поддерживалось и развивалось движение изобретателей и рационализаторов: за 1955–1957 гг. ими было представлено 5 миллионов предложений, из которых свыше 3.7 млн. изобретений, технических усовершенствований и рационализаторских предложений оказалось внедренными в народное хозяйство [15].

Академия наук СССР все более превращалась в центр, координирующий научно-исследовательскую деятельность в масштабах государства. Ее авторитет подкреплялся тем, что в начале 1950-х гг. в номенклатуру ЦК партии вошло 312 ее руководящих работников, включая членов Президиума АН СССР, директоров институтов, председателей филиалов и их заместителей [16]. В середине 1950-х гг. специально для решения проблем интенсификации процесса освоения сибирских территорий было создано Сибирское отделение Академии наук СССР [17]. Это направление оставалось в ряду приоритетных на всем протяжении позднесоветского периода отечественной истории. С того же времени действовали комплексные экспедиции, которые изучали производительные силы Красноярского края и Бурятской автономной республики [18].

Существовали проекты, которые предполагали сосредоточение усилий АН в основном на фундаментальных проблемах, а отраслевых и межотраслевых научно-исследовательских институтов, специальных кафедр вузов – на прикладных. Однако в 1959 г. Академия наук подверглась резкой критике со стороны руководства страны. Н.С. Хрущев поставил вопрос о ее разделе на несколько структур и передаче ее филиалов в ведение совнархозов [19]. В апреле 1961 г. было принято специальное Постановление ЦК партии и Совмина СССР «О мерах по улучшению координации научно-исследовательских работ в стране и деятельности Академии наук СССР» [20], в соответствии с которым сфера деятельности АН ограничивалась естественными и гуманитарными науками, из ее состава выводился ряд институтов, прежде всего технического профиля, с целью их передачи в ведение государственных комитетов, министерств и ведомств. Филиалы Академии наук переподчинялись Государственному комитету Совета Министров Российской Федерации по координации научно-исследовательских работ. Такой же комитет общесоюзного уровня создавался в соответствии с этим же Постановлением на базе Научно-технического комитета [21]. Данный орган сложно назвать координационным, так как действовал он «по согласованию» с отраслевыми ведомствами и совнархозами, реальные рычаги управления и распределения средств у него отсутствовали. Предпринимались попытки усилить его влияние, но по справедливому замечанию Е.Т. Артемова [22], его роль сводилась к экспертизе поступающих в правительство предложений и лишь оформлению направляемых от ведомств планов. Приоритеты научной деятельности, темпы, региональные и отраслевые пропорции развития научного потенциала определялись отраслевыми ведомствами, Академией наук и совнархозами после согласования с Госпланом и Минфином.

Академия наук СССР к 1963 г. потеряла половину научных учреждений, в том числе 51 институт и 7 филиалов, в которых работала треть ее сотрудников [23], хотя и оставалась важнейшим научным центром. В ее составе сохранилось 9 отделений, имеющих в своем непосредственном ведении 63 института, научные учреждения СО АН СССР. Академия осуществляла научно-методическое руководство многими институтами. В то же время не имеет смысла переоценивать ее роль в те годы: научно-техническая политика определялась партийно-государственными структурами, а не научными учреждениями, которые получали уже готовые программы для разработки. Особенно это касалось отраслевых НИИ. Подавляющая часть вопросов о деятельности АН, требовавших решения на общегосударственном уровне, проходила через Совмин СССР. Высшие партийные органы принимали окончательное решение при проведении выборов, назначении руководства Академии наук, установлении международных научных связей [24]. Заметим также, реализуемая в рассматриваемый период модель экстенсивного типа и не предполагала какой-либо самостоятельности науки.

В целом экономика страны в 1950-е гг. развивалась, действительно, достаточно быстрыми темпами. Форсировалось развитие атомной, химической, радиоэлектронной промышленности, приборостроительной отрасли и авиастроения. В этот период были построены тысячи новых промышленных предприятий, сформирован мощный научно-технический комплекс. Началось освоение космоса, появилась первая в мире атомная электростанция, создавалась мощная энергетическая база страны, получила развитие отечественная электроника. Паровозы уступили место тепловозам и электровозам. Триумфом советской науки и техники явилось

создание под руководством С.П. Королева и М.В. Келдыша первого в мире искусственного спутника Земли и выведение его на орбиту 4 октября 1957 г., что стало возможным благодаря средствам, выделенным на реализацию стратегической ракетно-ядерной программы. В целом же объем производства обеспечивался преимущественно за счет строительства многих тысяч крупных заводов и фабрик, а не повышения эффективности использования имевшегося потенциала, углублялись структурные диспропорции. Приоритет в государственной экономической политике отдавался темпам экономического роста и объемам произведенного, причем создавались крупные машиностроительные комплексы со вспомогательным производством. Руководствуясь вектором, определенным высшим руководством страны и всей системой партийно-государственного управления промышленной сферой, Госплан СССР вводил в план показатели, определявшие преимущественный рост тяжелой промышленности. Начиная с 1957 г., темпы экономического роста стали замедляться. Причиной торможения явилось во многом технологическое отставание, ставшее результатом стратегических просчетов. Автоматизация в большинстве отраслей охватывала единичные, не связанные между собой агрегаты и процессы. Слабо внедрялось в промышленность дистанционное управление и телемеханизация производства. Годовые государственные планы внедрения автоматизации за 1956 и 1957 гг. оказались в значительной степени невыполненными в большинстве отраслей промышленности [25]. Так, в 1956 г. планировался выпуск 4752 новых станков, но было выпущено лишь 926 (19.5%). Планом 1957 г. намечалось освоение 12 типов новых станков – было освоено только 9 типов. Такое же положение наблюдалось с разработкой и внедрением на производстве высокопроизводительных автоматических линий, специальных и агрегатных станков. Выпуск автоматических линий в 1956–1957 гг. находился на уровне 1946–1947 гг., а выпуск специальных и агрегатных станков в 1957 г. значительно уменьшился по сравнению с 1956 г. [25]. За 1956–1957 гг. на машиностроительных предприятиях в соответствии с планами было модернизировано более 40 тыс. станков. Однако на многих заводах качество модернизации оборудования оказалось невысоким, а получаемый эффект – малым. Во второй половине 1950-х гг. проводилась активная работа по внедрению средств малой автоматизации и механизации на машиностроительных предприятиях. В целом их было внедрено несколько тысяч (только в 1957 г. – более 6 тыс.). Внедрялись автоматические и полуавтоматические приборы для контроля геометрических размеров деталей и изделий. Это позволяло в 2–3 раза поднять производительность труда, но запросы по специальным станкам удовлетворялись менее, чем на 50%. Кроме того, машины, приборы и механизмы, выпускаемые как для внутренних нужд, так и на экспорт, нуждались в качественной декоративной отделке и предохранении их от коррозии различными видами защитных покрытий.

Изученные архивные документы подтверждают, что автоматизация производственных процессов так и не стала приоритетом для Госплана. В апреле 1957 г. была подготовлена справка Гостехники СССР о разногласиях с Госпланом СССР по основным заданиям технического прогресса в 6-м пятилетии, в которой указывалось, что работы по автоматизации производственных процессов проводились во всех отраслях промышленности, но в таких отраслях, как химическая, нефтедобывающая, угольная, цветная металлургия, промышленность строительных материалов, они велись «совершенно

неудовлетворительно». Автоматизированные производства, указывалось в справке, еще не играли значительной роли в экономике страны. Между тем (и это для руководства страны было серьезным аргументом!) в США на тот момент как технически, так и экономически для автоматизации было подготовлено 16% всей промышленности. На нее там выделялись значительные суммы. Размер капиталовложений на автоматизацию в ряде отраслей промышленности СССР в лучшем случае составлял не более 3–4% от общих капиталовложений, в то время как в промышленности США он доходил до 16% (во время Второй мировой войны процент капиталовложений на автоматизацию технологических процессов в США составлял всего 1–3%). Между тем результатом внедрения автоматизации в некоторых отраслях промышленности, по подсчетам специалистов, могло бы стать сокращение численности обслуживающего персонала:

- на электростанциях до 15–20%;
- в черной металлургии – до 25%;
- в химической промышленности – до 20%.

Выпуск продукции мог бы увеличиться:

- в черной металлургии и в химической промышленности на 10–15%.

Снижение себестоимости продукции составляло бы:

- на электростанциях 20–25%;
- в черной металлургии – до 20%;
- в химической промышленности – до 10–15%.

Тем не менее поточных линий было крайне мало. Госпланом в основных заданиях по развитию и внедрению новой техники в народное хозяйство СССР на 1956–1960 гг. и в заданиях по автоматизации производственных процессов не была включена часть заданий по разработке и внедрению новых образцов автоматического оборудования и машин для машиностроительных министерств, а также задания на работы по новой технологии производства, неразрывно связанные с использованием механизированных и автоматизированных установок. Ввод автоматизированных объектов в эксплуатацию был намечен лишь в последние годы пятилетки. Руководство Гостехники СССР делало вывод: «В результате внедрения всех мероприятий, намеченных основными заданиями, уровень автоматизации отдельных производств будет значительно повышен. Однако в целом современный уровень автоматизации производственных процессов передовых капиталистических стран и, особенно США, не будет достигнут» [25].

Большое значение для воссоздания подлинной картины результатов реорганизации управления промышленной сферой, оценки ее эффективности и результатов внедрения новейших образцов в производство во второй половине 1950-х гг. представляет изученная нами в Российском государственном архиве новейшей истории (РГАНИ) подготовленная Государственным научно-техническим комитетом в январе 1958 г. докладная записка о техническом прогрессе в промышленности в свете выполнения решений июльского Пленума ЦК КПСС 1955 г. и XX съезда КПСС, направленная в отдел машиностроения ЦК. В документе были перечислены всем известные достижения в науке и технике тех лет, но одновременно указывалось на факты невыполнения планов по новой технике промышленными предприятиями, научно-исследовательскими институтами и проектно-конструкторскими организациями. В частности, машиностроительными министерствами из

392 заданий по созданию новых образцов машин и механизмов, предусмотренных в плане развития и внедрения новой техники на 1955 г., было выполнено лишь 289 заданий. Планировалось проведение испытаний 232 типов машин, а закончены и были испытаны только 97. Министерствами добывающей промышленности и тяжелой индустрии было выполнено 384 задания по новой технике из 627, предусмотренных планом; министерствами перерабатывающей промышленности – 307 из 722 заданий. В числе причин невыполнения заданий назывались:

- сосредоточенность руководителей министерств, ведомств и промышленных предприятий, главным образом, на выполнении заданий по производству промышленной продукции, устанавливаемых годовыми государственными планами развития народного хозяйства;
- недостаточное внимание к внедрению новой техники; в отличие от прошлых лет, единый государственный план развития и внедрения новой техники на 1957 и 1958 гг. не утверждался;
- в республиканских планах на 1958 г. не предусматривался ряд важнейших заданий по развитию и внедрению новой техники или они намечались в объемах, значительно меньших, чем они были установлены в решениях Правительства на 1956–1957 гг.;
- совершенно недостаточными явились проекты по автоматизации производственных процессов;
- задания по механизации были предусмотрены только по отдельным республикам;
- не предусматривались задания по созданию важнейших видов металлургического оборудования, расширению ассортимента важнейших видов синтетических материалов, предусмотренных решениями Правительства;
- не были отражены в проектах основные технические направления в развитии приборостроения [26].

Эти и другие изученные нами материалы и документы свидетельствуют не только о существенном торможении по одному из важнейших направлений развития промышленного комплекса страны – автоматизации и механизации производства, но и об отсутствии у власти точного варианта решения этой задачи.

Определенные достижения наблюдались во второй половине 1950-х гг. в такой значимой в условиях научно-технической революции отрасли, как приборостроение, но и она развивалась в СССР слишком медленными темпами. Были созданы новые приборостроительные научно-исследовательские институты и опытно-конструкторские бюро, однако многие приборы, регуляторы и комплектные устройства, необходимые для автоматизации, вообще не производились или выпускались в ограниченном количестве.

Не был выполнен план по внедрению новой техники за 1957 г. и в электротехнической промышленности. Отсутствие ряда новых типов электрооборудования приводило к удорожанию электроустановок, усложнению эксплуатации и понижению надежности электроснабжения потребителей. Эксперты Гостехники в январе 1958 г. вынуждены были констатировать, что многие типы электрооборудования находились на уровне 30-х годов и резко отставали по своим характеристикам от оборудования лучших зарубежных фирм. В качестве причин определялись: просчеты бывшего Министерства электротехнической промышленности в области планирования, обеспечения новыми материалами

и изделиями; отсутствие необходимой производственной и научно-исследовательской базы; слабость конструкторских бюро и заводских лабораторий, а также отсутствие в необходимых количествах новейших электроизоляционных и магнитных материалов.

В материалах июньского (1959 г.) и июльского (1960 г.) Пленумов ЦК КПСС признавалось техническое отставание в ряде отраслей. Надежды возлагались на распространение в промышленности поточных линий. В условиях нарастающих темпов НТР требовалось все большее внимание к такому направлению, как обеспечение условий для активизации НИОКР и «приближения науки к производству». Однако план по капитальным вложениям в оборудование был выполнен в 1959 г. лишь на 88%. Как признавал на июльском Пленуме В.А. Трапезников, опора на собственные технические достижения предполагала наличие эффективной системы внедрения, которую в гражданском секторе экономики во многом необходимо было создавать заново [27].

Причины торможения – предмет острых дискуссий историков и экономистов в настоящее время. Ряд исследователей делает акцент в этой связи на сложность условий, в которых тогда приходилось работать предприятиям: многочисленность управляющих инстанций, склонности органов власти к волюнтаризму, завышенность плановых заданий и противоречивость показателей, бюрократизм и излишняя регламентация, искаженность экономических мотиваций [28]. Удачно составленные отчеты были для предприятий важнее реальных экономических результатов [29]. Методами адаптации советских предприятий к подобным условиям называют занижение реальных производственных возможностей; завышение уровня издержек и фактического уровня выпуска (приписки); умышленное использование ресурсоемких технологий производства; нарушение технологической дисциплины, невыполнение требований по качеству; выстраивание системы приоритетов при выполнении плановых заданий; накопление ресурсов «про запас»; прямое (без каких-либо указаний сверху) сотрудничество предприятий между собой; манипуляции с номенклатурой и ценами выпускаемой продукции; установление неформальных, личных отношений с представителями различных органов власти [29].

Исследователь Г.И. Ханин не очень высоко оценивает и эффективность работы отраслевых НИИ, выполняющих, по его мнению, «чаще всего функции подсобного персонала отраслевых министерств либо конструкторских бюро» [30]. Их слабость была обусловлена не только оторванностью от производства, низкой «остепененностью» сотрудников, но и существовавшей системой показателей. Научно-технические объединения и НИИ в их составе оценивались, прежде всего, по производственным показателям предприятий. Более результативной была деятельность научных учреждений в оборонной отрасли, весьма плодотворным был научно-технический шпионаж. Автор достаточно жестко оценивает неумение использовать в гражданских отраслях опыт ВПК в сфере эффективной интеграции производства и науки, оценивая его как очередной просчет «бездарного советского руководства 60-80-х гг.» [30].

Архивные документы позволяют нам составить более объективную картину возможности тиражирования достижений ВПК в гражданских отраслях. 15 января 1964 г. доцентом В.И. Коротковым были направлены в ЦК КПСС «Докладная записка и предложения по автоматизации производства на базе широкого внедрения стандартных и нормализованных узлов и агрегатов», в которой констатировалось, что опыт работы авиационной

и оборонной промышленности по созданию прогрессивной нормализованной технологической оснастки так и не стал достоянием всех отраслей промышленности [31]. В документе был представлен и сравнительный анализ, как это было тогда принято, с США. Автором указывалось, что в СССР мало специализированных предприятий, занятых производством инструмента. Это создавало серьезные трудности в механизации и автоматизации производства. В США специализированным производством инструмента было занято более 1600 предприятий, в СССР – 39 заводов и 121 специализированный участок. В США машиностроительные фирмы предпочитали не иметь у себя инструментальные цеха при освоении новых машин, а заказывать технологическую оснастку и инструмент специализированным заводам. Это оказалось более эффективно [32].

Отсюда представляют интерес рассуждения современного эксперта, руководителя ООО «АЛТ Мастер» Р.Х. Дианова о производстве в настоящее время в стране электроники [33], оценивающего созданные еще в советское время и ныне действующие заводы в качестве «старорежимных», не изменившихся с организационно-технической точки зрения, причем речь идет не только о государственных, но и о частных. Для них было и остается характерным стремление к полному циклу внутри предприятия (собственные гальваника, механическая обработка, сборочное производство и т.п.). Каждое из этих подразделений в советское время было загружено на 5–10%, что совершенно нецелесообразно. «С течением времени такая ситуация приводит прежде всего к потере компетенций при смене поколений, – полагает известный специалист. – Поэтому уже к середине 1980-х годов наблюдалась существенная технологическая деградация.... Существовавшая модель производства была крайне неэффективна». Отечественную электронику все равно ждал бы кризис [33].

Впрочем, уже в 1950-е гг. специалисты Гостехники отмечали отставание по очень перспективным направлениям и называли вполне объективные причины. В частности, констатировалась сложная ситуация с печатными схемами: «...Несмотря на то, что о печатном способе нанесения проводников на диэлектрик (о печатных схемах) в СССР было известно уже с 1937 г., до 1948 г. в этой области ничего не делалось ...Опытные и научно-исследовательские работы... проводятся неорганизованно и в малых масштабах. Внедрение печатных схем в аппаратуру и приборы происходит недопустимо медленно» [34]. Причиной отставания СССР в этой сфере являлась чрезмерная бюрократизация процесса внедрения новой техники, недостаточная компетенция руководящих структур, отсутствие в Министерстве радиотехнической промышленности единого плана опытных и исследовательских работ по печатным схемам, ведомственная разобщенность НИИ и конструкторских бюро. То есть, наличие блокирующих факторов признавалось, их перечень для специалистов и тогда был очевидным.

Таким образом, выводы об «имитационной», «заимствующей модели» экономики в 1950-60-е гг. нам представляются не совсем объективными. Советская научная школа по праву в этот период считалась одной из самых авторитетных в мире. Благодаря указанному обстоятельству и верному выбору приоритетов в области развития науки и техники, СССР сумел в целом успешно преодолеть первый этап научно-технической революции, осуществить настоящие технологические прорывы, обеспечить высокие темпы экономического роста. Чем еще был обусловлен подобный рывок после разорительных военных лет? Полагаем, что во многом – Победой, наличием общенационального проекта, со-

циальным оптимизмом, «оттепелью». Подтверждением служат воспоминания академика Н.Н. Моисеева: «Вообще пятидесятые и первая половина шестидесятых годов были очень светлым временем для нашей научно-технической интеллигенции. Ее энергия, ее способности, умение – все это было нужно народу, нужно стране, нужно государству. Причины тому хорошо известны, они были известны и нам, но это несколько не снижало нашего рабочего энтузиазма. Наоборот, мы чувствовали свою причастность к становлению Великого Государства. Что может сравниться с ощущением востребованности, нужности? ... В те годы я много ездил по заграницам, читал циклы лекций, выступал с докладами и всюду читал их по-русски – кроме Франции, поскольку говорил по-французски. Аудитории всегда были большими и заинтересованными. Я видел, что в той области науки, где я работал, мы идем, по меньшей мере, вровень с Америкой. И мне порой казалось, что я увижу, как однажды русский язык утвердится в роли второго интернационального языка научного общения. Иллюзия – все-таки хорошая вещь, она рождает веру в будущее, энергию и увлеченность, а значит и новые стимулы. И новые идеи. Но симптомы неблагополучия появились уже тогда, более чем за тридцать лет до начала перестройки. Мы их увидели очень рано, но надеялись, что они еще не говорят о смертельном недуге и верили в то, что есть надежда, что они постепенно могут быть устранены волею тех, от которых зависят судьбы страны» [35].

В конце исследуемого периода перед страной стояла весьма сложная задача – сформировать оптимальную стратегию научно-технического развития при смене технологического уклада. Архивные документы свидетельствуют о том, что власти не могли не обратить внимания на весьма тревожные результаты, свидетельствующие о серьезном торможении с внедрением новой техники в производство. И управляющими органами, и исполнителями вполне осознавалось наличие блокирующих факторов, несмотря на достижение мощных прорывов – атомного, ракетного, космического. Но государственная научно-техническая политика главным образом была направлена на сохранение технико-экономической независимости от ведущих держав мира и обеспечение военно-стратегического паритета в условиях «холодной войны». Развитие науки и техники было определено в качестве одного из приоритетных направлений, однако практика планового и централизованного управления рассматривалась как единственно эффективная. Упор по-прежнему делался на преимущественное развитие тяжелой промышленности. Что же касается научной сферы, то, кроме деклараций, речь шла, скорее, о количественных показателях – росте числа НИИ и т.п. Полноценной интеграции науки и производства препятствовали ведомственный подход, недостатки плановой системы с ее жесткой регламентацией и централизмом, ориентацией, прежде всего, на объемы выпускаемой продукции, но не на модернизацию производства. Явным просчетом государственной экономической и научно-технической политики этого периода стало недостаточное внимание к внедрению научных достижений вне оборонного комплекса, отработке самих механизмов внедрения, что, в конечном счете, предопределило отставание по ряду направлений.

Переосмысление отечественной истории советского периода, основанное на документах и фактах, но не на навязываемых публицистами и рядом историков, экономистов в 1990-е гг. исключительно негативных представлений об эволюции и «гибели империи», исключительно важно для современной России. Оно позволяет аккумулировать позитив-

ный опыт и извлекать уроки во избежание повторения прежних ошибок.

Литература:

1. Лельчук В.С. Научно-техническая революция и промышленное развитие СССР. М.: Наука, 1987. 285 с.
2. Российский государственный архив экономики (РГАЭ). Ф. 9480. Оп. 2. Д. 98. Л. 100.
3. КПСС в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК. Изд. 9-е. Т. 8. М.: Политиздат, 1986. С. 582.
4. Материалы Всесоюзного совещания работников промышленности, созванного ЦК КПСС и Советом Министров СССР, 16-18 мая 1955 г.: Стенографический отчет. М., 1955. 169 с.
5. Директивы КПСС и Советского правительства по хозяйственным вопросам 1917–1957 гг.: в 4-х т. М.: Госполитиздат, 1957-1958. Т. 4. 1958. 863 с.
6. КПСС в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК (1955-1959 гг.). М.: Политиздат, 1971. Т. 7. 574 с.
7. РГАЭ. Ф. 373. Оп. 1. Д. 4548. Л. 27.
8. РГАЭ. Ф. 373. Оп. 1. Д. 4548. Л. 8.
9. РГАЭ. Ф. 373. Оп. 1. Д. 4548. Л. 15.
10. РГАЭ. Ф. 373. Оп. 1. Д. 4548. Л. 6.
11. Шестаков В.А. Социально-экономическая политика советского государства в 1950-е – середине 1960-х годов. М.: Наука, 2006. 296 с.
12. Российский государственный архив новейшей истории (РГАНИ). Ф.5. Оп. 40. Д. 207. Л. 11.
13. Порохня В.С. Борьба партий за совершенствование и техническое перевооружение цветной металлургии страны в условиях развитого социализма: дис. ... д-ра ист. наук. М., 1984. 345 с.
14. РГАЭ. Ф. 9480. Оп. 9. Д. 97. Л. 13, 14.
15. РГАНИ. Ф. 5. Оп. 40. Д. 93. Л. 6.
16. Докладная записка Отдела агитации и пропаганды ЦК КПСС М.А. Суслову «О подборе и расстановке кадров в Академии наук СССР // Сталин и космополитизм. 1945–1953. Документы Агитпропа ЦК / под общ. ред. акад. А.Н. Яковлева. Сост. Д.Г. Наджафов, З.С. Белоусова. М.: МФД: Материк, 2005. С. 596.
17. Лукьяненко Н.И. Проблемы материального благосостояния трудящихся в деятельности парторганизаций Красноярского края в условиях формирования и развития индустриально-производственных комплексов: автореф. дис. ... канд. ист. наук. М, 1990. 16 с.
18. Левченко С., Горизонтов Б. Изучение перспектив развития производительных сил края // Красноярский рабочий. 1956. 26 июня.
19. Козлов Б.И. Академия наук СССР и индустриализация России: 1925–1941 гг. // За «железным занавесом»: мифы и реалии советской науки: сборник / Ин-т истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН. СПб.: Дмитрий Буланин, 2002. С. 224–225.
20. О мерах по улучшению координации научно-исследовательских работ в стране и деятельности Академии наук СССР. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР. 3 апреля 1961 г. // Справочник партийного работника. 1963. Вып. 4. С. 397–403.

21. Государственный архив РФ (ГАРФ). Ф. А-408. Оп. 1. Д. 20. Л. 85–86.
22. Артемов Е.Т. Научно-техническая политика в советской модели постиндустриальной модернизации. М.: РОССПЭН, 2006. 400 с.
23. Комков Г.Д., Карпенко О.М., Левшин Б.В., Семенов Л.К. Академия наук СССР – штаб Советской науки. М.: Наука, 1968. С. 200.
24. Есаков В.Д. Документы Политбюро ЦК как источник по истории Академии наук // Академия наук в решениях Политбюро ЦК РКП(б)-ВКП(б)-КПСС 1922–1991/ 1922–1952. М., 2000. С. 18. [Электронный ресурс] URL:<http://www.ihst.ru/projects/sohist/an.htm> (дата обращения: 17.05.2017).
25. Бодрова Е.В., Гусарова М.Н., Калинов В.В. Эволюция государственной промышленной политики в СССР и Российской Федерации / под общ. ред. Е.В. Бодровой. М.: РЕГЕНС, 2014. 940 с.
26. РГАНИ. Ф. 5. Оп. 40. Д. 93. Л. 2–73.
27. Пленум ЦК КПСС. 13–16 июля 1960 г. М.: Политиздат, 1960. С. 116.
28. Комаровский А. Месяц в директорском кресле. М.: Политиздат, 1965. 87 с.
29. Кувалин Д.Б. Экономическая политика и поведение предприятий: механизмы взаимного влияния. М.: Макс прес, 2009. 319 с.
30. Ханин Г.И. Экономическая история России. Экономическая история России в новейшее время: монография: в 2-х т. Новосибирск: НГТУ, 2010. Т. 1. 401 с.
31. РГАНИ Ф. 5. Оп. 40. Д. 221. Л. 14.
32. РГАНИ. Ф. 5. Оп. 40. Д. 221. Л. 15–16.
33. Дианов Р.Х. Мы не диктуем условий рынку, мы обеспечиваем его потребности // Электроника. 2017. № 4. С. 125–127.
34. РГАЭ. Ф. 9480. Оп. 2. Д. 140. Л. 10–12.
35. Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня. Свободные размышления. 1917–1993. [Электронный ресурс] URL: <http://nikitamoiseev.livejournal.com/6800.html> (дата обращения: 16.04.2017).

References:

1. Lelchuk B.C. The scientific and technological revolution and industrial development of the USSR. Moscow: Nauka Publ., 1987. 285 p. (in Russ.)
2. Russian State Archive of Economics (RGAE). Coll. 9480. R. 2. D. 98. L. 100. (in Russ.)
3. CPSU in resolutions and decisions of congresses, conferences and plenums of the Central Committee. Ed. 9. V. 8. Moscow: Politizdat Publ., 1986. P. 582. (in Russ.)
4. Materials of all-Union conference of industrial workers convened by the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers of the USSR, 16–18 May 1955: stenographic report. Moscow: Politizdat Publ., 1955. 169 p. (in Russ.)
5. Directives of the CPSU and the Soviet government on economic issues 1917–1957: in 4 vol. Moscow: Politizdat Publ. V. 4. 1958. 863 p. (in Russ.)
6. CPSU in resolutions and decisions of congresses, conferences and plenums of the Central Committee (1955–1959). Moscow: Politizdat Publ. 1971. V. 7. 574 p. (in Russ.)
7. RGAE. Coll. 373. R. 1. D. 4548. L. 27. (in Russ.)
8. RGAE. Coll. 373. R. 1. D. 4548. L. 8. (in Russ.)

9. RGAE. Coll. 373. R. 1. D. 4548. L. 15. (in Russ.)
10. RGAE. Coll. 373. R. 1. D. 4548. L. 6. (in Russ.)
11. Shestakov V.A. The socio-economic policy of the Soviet state from the 1950s to mid - 1960-ies. Moscow: Nauka Publ. 2006. 296 p. (in Russ.)
12. Russian State Archive of Contemporary History (RGANI). Coll. 5. R. 40. D. 207. L. 11. (in Russ.)
13. Porokhnya B.C. The struggle of parties for perfection and technical re-equipment of nonferrous metallurgy of the country in conditions of developed socialism: PhD dissertation. Moscow, 1984. 345 p. (in Russ.)
14. RGAE. Coll. 9480. R. 9. D. 97. L.13, 14. (in Russ.)
15. RGANI. Coll. 5. R. 40. D. 93. L. 6. (in Russ.)
16. Memorandum of the Department of agitation and propaganda of the Central Committee of the CPSU to M.A. Suslov «The selection and placement of personnel in the Academy of Sciences of the USSR» / Stalin and cosmopolitanism. 1945–1953. Documents of the Agitprop of the Central Committee / Under the general editorship of Acad. A.N. Yakovlev. Comp. D.G. Nadzhafov and Z.S. Belousova. Moscow: MFD Materik Publ., 2005. P. 596. (in Russ.)
17. Luk'yanenkova N.I. Problems of material welfare in the activities of party organizations of Krasnoyarsk Region in the conditions of formation and development of industrial and industrial complexes: abstr. PhD dissertation. Moscow, 1990. 16 p. (in Russ.)
18. Levchenko S., Horizontov B. Study on the prospects of development of the productive forces of the region // The Krasnoyarsk worker. 1956. June 26. (in Russ.)
19. Kozlov B.I. Academy of Sciences of the USSR and the industrialization of Russia: 1925–1941. // Behind the "iron curtain": the myths and realities of soviet science. Saint Petersburg: Dmitry Bulanin Publ., 2002. P. 224–225. (in Russ.)
20. On measures to improve coordination of research works in the country and activities of the Academy of Sciences of the USSR. The resolution of the CPSU Central Committee and USSR Council of Ministers. 03 April 1961 // Handbook of the party worker. 1963. V. 4. P. 397–403. (in Russ.)
21. State Archive of the Russian Federation (GARF). Coll. A-408. R. 1. D. 20. L. 85–86. (in Russ.)
22. Artemov E.T. Scientific and technical policy in the Soviet model of post-industrial modernization. Moscow: ROSSPEN Publ., 2006. 400 p. (in Russ.)
23. Komkov G.D., Karpenko O.M., Levshin B.V., Semenov L.K. Academy of Sciences of the USSR – headquarters of the Soviet science. Moscow: Nauka Publ., 1968. P. 200. (in Russ.)
24. Esakov V.D. Documents of the Politburo of the Central Committee as the source for the history of the Academy of Sciences // Academy of Sciences in the decisions of the Politburo of the Central Committee of the RCP(b)-VKP(b)-CPSU 1922–1991/ 1922–1952. Moscow: ROSSPEN Publ., 2000. P. 18. [Electronic resource] URL:<http://www.ihst.ru/projects/sohist/an.htm> (date accessed: 17.05.2017). (in Russ.)
25. Bodrova E.V., Gusarova M.N., Kalinov V.V. Evolution of state industrial policy in the USSR and the Russian Federation / Under the general editorship of E.V. Bodrova. Moscow.: REGENS Publ., 2014. 940 p. (in Russ.)
26. RGANI. Coll. 5. R. 40. D. 93. L. 2-73. (in Russ.)

27. The Plenum of the Central Committee of the CPSU. 13-16 July 1960. Moscow: Politizdat Publ., 1960. 116 p. (in Russ.)
28. Komarovskiy A.B. The month in the director's chair. Moscow: Politizdat Publ., 1965. 87 p. (in Russ.)
29. Kuvalin D.B. Economic policy and the behavior of enterprises: mechanisms of mutual influence. Moscow: Max Press Publ., 2009. 319 p. (in Russ.)
30. Khanin G.I. Economic history of Russia. Economic history of Russia in modern times: monograph: in 2 vol. Novosibirsk: NGTU Publ., 2010. V. 1. 401 p. (in Russ.)
31. RGANI. Coll. 5. R. 40. D. 221. L. 14. (in Russ.)
32. RGANI. Coll. 5. R. 40. D. 221. L. 15–16. (in Russ.)
33. Dianov R.H. We don't dictate terms to the market, we provide his needs // *Elektronika* (Electronics). 2017. № 4. P. 125–127. (in Russ.)
34. RGAE. Coll. 9480. R. 2. D. 140. L. 10–12. (in Russ.)
35. Moiseev N.N. How far is it to tomorrow. Free reflections. 1917–1993. [Electronic resource] URL: <http://nikitamoiseev.livejournal.com/6800.html> (date accessed: 16.04.2017). (in Russ.)

Об авторах:

Бодрова Елена Владимировна, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой истории Института управления и стратегического развития организаций ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Калинов Вячеслав Викторович, доктор исторических наук, доцент, заведующий кафедрой истории Российского государственного университета (национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина, (119991, Москва, Ленинский проспект, 65).

About authors:

Elena V. Bodrova, D.Sc. (History), Professor, Head of the Chair of History, Institute of Governance and Strategic Development of Organizations, Moscow Technological University (78, Vernadsky Pr., Moscow, 119454, Russia).

Vyacheslav V. Kalinov, D.Sc. (History), Associate Professor, Head of the Chair of History, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), (65, Leninsky Pr., Moscow, 119991, Russia).

УДК 330.15

**БИОСФЕРНЫЙ ПОДХОД К ТЕОРИИ
ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА**

**С.М. Сухорукова[@],
А.М. Погорелый**

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

[@]Автор для переписки, e-mail: Sukhorukova@inbox.ru

При внедрении в сферу промышленного производства современных технико-технологических достижений для обеспечения экономического роста необходимо учитывать системную целостность биосферы как природного организма. В условиях международной кооперации при определении объемов производства и его размещения авторы предлагают использовать институт природно-хозяйственного суверенитета. Согласно этому институту, каждая страна может формировать политику экономического роста, отвечающую своим социо-эколого-экономическим интересам, но учитывая лимиты биосферной устойчивости. Это обеспечит сохранение локальных экосистем, сократит глобальные эколого-экономические издержки производства и обеспечит природные условия экономического роста для всех стран мирового сообщества. В отношении теории «зеленого роста» высказывается мнение о необходимости разработки таких технологий, которые изначально отвечают принципу «коэволюции общества и природы». С учетом начавшейся космизации экономики для долговременного сохранения условий экономического роста авторы предлагают рассматривать биосферу как компонент космо-природной системы, что потребует перехода от антропоцентризма к антропокосмическому мировоззрению.

Ключевые слова: теория экономического роста, природно-хозяйственный суверенитет, «зеленая экономика», «коэволюция природы и общества».

**BIOSPHERIC APPROACH TO THE THEORY
OF ECONOMIC GROWTH**

**S.M. Sukhorukova[@],
A.M. Pogorely**

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

[@]Corresponding author e-mail: Sukhorukova@inbox.ru

When implementing the industrial production of technical and technological achievements for economic growth it is necessary to take into account the system integrity of the biosphere as a natural organism. In the conditions of international cooperation, when determining the volume of production and its placement, the authors propose to use the institution of environmental and economic sovereignty. According to the institution every country can shape the politics of economic growth corresponding to their socio-ecological and economic interests, but considering the limits of the biosphere sustainability. This will ensure the preservation of local ecosystems, reduce the global environmental and economic costs of production and provide natural conditions for economic growth for all countries of the world community. In relation to theories of “green growth” it is suggested that it is necessary to develop technologies initially meeting the principle of “co-evolution of the society and nature”. Taking into account the start of economy cosmization, for long-term preservation of conditions for economic growth the authors propose to consider the biosphere as a component of space-natural system that will require a transition from anthropocentrism to anthropocosmic worldview.

Keywords: the theory of economic growth, natural and economic sovereignty, green economy, «the coevolution of nature and society».

Экономическая наука стоит перед необходимостью обновления теории экономического роста, т.к. при использовании современных технико-технологических достижений появляются экологические проблемы, которые препятствуют дальнейшему экономическому развитию. О необходимости учета природного фактора в экономике говорилось и ранее, но это касалось лишь сельского хозяйства и не содержало, как сегодня, требований планетарного уровня. Так, представители школы «физиократов», возникшей во Франции в XVIII веке, считали, что, благодаря природе, в сельском хозяйстве создается «чистый», или «прибавочный», продукт, обеспечивающий экономический рост. Рассматривая экономический рост как природо-экономический процесс, Франсуа Кенэ ввел понятие «естественный кредит», т.е. аванс, который следует возвращать природе, чтобы процесс экономического роста был непрерывным. Как считали физиократы, на промышленных предприятиях «прибавочный» продукт не создается, т.к. там процесс производства сводится лишь к трансформации того вещества, которое ранее было создано природой. Но приближалась эпоха промышленной цивилизации, и в Англии, где в XVIII веке богатство уже отождествлялось с массой промышленных товаров, Адам Смит и Давид Рикардо – основатели школы «классической политэкономии» – стали связывать экономический рост с трудом рабочих в сфере промышленного производства. При этом преимуществом промышленного производства считалось преодоление зависимости от природы: от качества почвы, от сезонных колебаний температуры и пр. Благодаря росту технической оснащенности промышленного производства, объемы выпускаемой продукции стали расти, и скоро возникла проблема ее реализации. Началась борьба за рынки сбыта продукции и, отходя от теории трудовой стоимости, последователи классической политэкономии стали концентрировать внимание на сфере обращения, рассматривая зависимость роста доходов от изменения цен на рынке. Однако К. Маркс в работе «Капитал» показал, что стихия рынка приводит промышленное производство к периодическим кризисам, и рост доходов не может носить постоянного характера. Кроме того, К. Маркс доказал, что при капитализме происходит безвозмездное присвоение «прибавочного продукта», и поэтому экономический рост связан с эксплуатацией рабочих, что неизбежно приведет к социальным конфликтам и также будет способствовать дестабилизации про-

изводства. Устранение причин, препятствующих экономическому росту, К. Маркс связывал с социалистическими преобразованиями, с которыми станет возможным регулировать пропорции промышленного производства, а «прибавочный продукт» посредством государственного бюджета направлять на экономический рост в интересах трудящихся, обеспечивая для них занятость, бесплатное образование, жилье, здравоохранение и т.д. При этом К. Маркс, как теоретик промышленной цивилизации, считал, что условием экономического роста является расширенное производство средств производства. Говоря сегодняшним языком, это означает, что инвестиции следует направлять главным образом в отрасли, обеспечивающие технико-технологическое обновление производства. Экологических лимитов промышленного производства К. Маркс не касался, поскольку в его время существовало убеждение в бесконечности природных ресурсов биосферы, и природный фактор учитывался главным образом при возникновении природной ренты у собственников земли в сельском хозяйстве.

В настоящее время существует несколько моделей экономического роста в рамках классической политэкономии и теории К. Маркса. Идея, объединяющая концепции «неоклассиков», сводится к тому, что эффективно использовать различные факторы экономического роста позволяют только рыночные механизмы. Однако при наступлении мирового экономического кризиса в начале XX века Д.М. Кейнс предложил для восстановления макроэкономического равновесия использовать государство. Современные некейнсианские концепции продолжают развивать идеи привлечения государства к экономике для оживления потребительского спроса и инвестиционной деятельности.

Согласно неомарксистским концепциям экономического роста, привлечение государства к экономике также необходимо, но при условии преодоления социального неравенства и разрешения классовых противоречий капиталистического общества. В XX веке в «развитых» странах, где считается, что факт эксплуатации наемного труда преодолен и принята концепция «социального партнерства», термин «прибавочный продукт» не употребляется. Принято считать, что экономический рост обусловлен движением основных и оборотных средств одновременно с ростом промышленного производства.

С середины XX века, когда объемы промышленного производства заметно возросли, стали увеличиваться и масштабы использования биосферы. Возник феномен ее загрязнения, поскольку изменился и сам характер производства. Все это привело к появлению экологических проблем и потребовало расходов на восстановление разрушенной природной среды. Эколого-экономические издержки производства стали снижать эффективность промышленного производства, и «развитые» страны начали передавать природоёмкие производства на территории стран, располагающих природными ресурсами. При этом рост экологических проблем на уровне биосферы продолжался, и поэтому экологи стали разрабатывать концепции экономического роста, в которых учитывалась системная целостность природной среды. К 1990-м годам в СССР уже была создана научная дисциплина – «Экономика природопользования» с интегральными эколого-экономическими принципами, которые связывали экономическую результативность использования природных ресурсов с экологической безопасностью [1, с. 848–850]. В условиях СССР это позволило бы выйти на создание природно-промышленных комплексов, в которых с учетом экологической емкости территории формировалась система отраслей, ориентированных на последовательную переработку природных ресурсов с их повторным использованием.

В основе этой эколого-экономической теории лежала государственная собственность на природные ресурсы, что позволило бы, концентрируя «прибавочный продукт» в государственном бюджете, решать экологические проблемы одновременно с социальными и экономическими проблемами. Этому могли бы способствовать эколого-экономические принципы, направленные на достижение взаимосвязанных социальных, экологических и экономических результатов. Для конкретных случаев указанные принципы должны были иметь параметры в виде набора показателей, соответствующих конкретным производственным и природным условиям, т.е. критериями эффективности внедрения технологических достижений становились бы не только рост производства, но и сокращение экогенной заболеваемости среди населения, уменьшение расходов на рекультивацию земли, очистку воды, восстановление лесных насаждений. Отечественные ученые разрабатывали также пути сохранения генетического фонда биосферы и методы прогнозирования изменений климата с учетом связей локальных и глобальных экологических проблем [2]. Их теоретические работы можно было бы использовать для организации природо-согласованного хозяйствования на уровне мирового сообщества, но транснациональные корпорации (ТНК), как субъекты глобализации, основывались на либерально-рыночной теории экономики, и их подход к использованию ресурсов биосферы привел к тому, что экологические проблемы стали расти. Решить их до сих пор не удастся, несмотря на все усилия экологической общественности противостоять природоразрушительным тенденциям глобализации. Так, Джозеф Стиглиц в работе «Глобализация: тревожные тенденции», анализируя, почему не оправдались надежды, возлагаемые на глобализацию экономики, писал об опасности возникновения социо-эколого-экономических проблем во многих странах, в частности и в России [3]. Отечественные ученые – А.В. Бузгалин, А.И. Колганов, С.З. Гафуров, А.М. Демидов начали разрабатывать альтернативные варианты глобализации, предупреждающие появление глобальных экологических проблем [4]. В.Г. Горшков в работе «Физические и биологические основы устойчивости жизни» [5] доказывал, что человечество превысило допустимый порог потребления ресурсов биосферы, и она потеряла способность восстанавливать нарушенное равновесие. Поэтому В.Г. Горшков предлагал «жесткий» сценарий перехода к устойчивому развитию, согласно которому экономический рост не мог бы осуществляться при росте заимствования ресурсов биосферы.

Еще ранее внимание к истощению ресурсов биосферы привлекли работы представителей Римского клуба. Донелла Медоуз, Йорген Рандерс и Деннис Медоуз в книге «Пределы роста» (1972 г.) представили модель мирового развития, показав, насколько опасен экономический рост, ориентированный на увеличение объемов природных ресурсов, извлекаемых из биосферы. Эта группа исследователей предложила отказаться от количественных критериев экономического роста в пользу качественных показателей экономического развития. В своей книге «Пределы роста. 30 лет спустя» (2004 г.) ученые написали о том, что для такого перехода требуется «экологическая революция», меняющая ценностные ориентиры технократического общества [6]. Сегодня необходимость изменения этих ориентиров по-прежнему актуальна, поскольку с переходом на стадию постиндустриального – информационного общества считается, что будто бы сырьевой фактор экономического роста перестает быть значимым, т.к. его заменяют информацион-

ные технологии. Но любые технологии обеспечивают экономический рост только тогда, когда при этом решается проблема согласования производства с природными лимитами биосферы. Следовало бы считать, что фактором экономического роста в условиях информационного общества является информация, учитывающая связь социальной, экологической и экономической эффективности технологических инноваций, причем на уровне мировой экономики. Современные достижения в сфере информационных технологий эту информацию могли бы обеспечить, однако воспользоваться такой информацией субъекты хозяйствования пожелают лишь при наличии у них мотивации к природопользованию с установкой на «общее благо». Пока такая мотивация отсутствует, и деградация биосферы продолжается. В докладе ООН «Глобальная экологическая перспектива-6», представленном в 2016 г., показано, что на планете продолжают сокращаться запасы минеральных ресурсов, не останавливается падение биологического разнообразия, сокращение почвенных ресурсов и запасов пресной воды, а также исчезают лесные массивы, растет загрязнение мирового океана и атмосферы [7]. При этом поиски экологически безопасного экономического роста продолжаются. В соответствии с традициями классической политэкономии считается, что экономический рост предполагает превышение доходов над расходами. Но здесь надо понимать, что сегодня понимается под расходами и доходами. Так, последние два десятилетия популяризируется теория «зеленой экономики», в которой «зеленый» рост (green economic growth) будто бы учитывает ущерб, наносимый окружающей среде. Организация Объединенных Наций (программа по окружающей среде, ЮНЕП; экономическая и социальная комиссия для Азии и Тихого океана, ЭСКАТО, и др.), международные организации, такие, как Институт глобального «зеленого» роста (Global Green Growth Institute – GGGI) и многие другие играют активную роль в продвижении концепции «зеленого» роста. В результате во многих странах большое внимание уделяется внедрению «зеленых» технологий для производства экологически чистых продуктов питания (органическое земледелие), для перехода на «зеленый» транспорт, на «зеленое» строительство. Необходимость «зеленого» роста обсуждается и в России. Для его реализации предлагается переход к использованию альтернативных способов получения энергии, сокращение потребления воды, увеличение уровня утилизации отходов, обеспечение роста аграрного производства без снижения плодородия почв. Обсуждению этих вопросов посвящены специальные конференции. 17–19 августа 2017 г. в Санкт-Петербурге прошел XI Международный форум «Зеленая экономика», на котором рассматривались технологические решения по переработке отходов, очистке сточных вод, энергосбережению и повышению энергоэффективности. Для внедрения рассмотренных технологических решений предлагалось использовать экономико-правовые механизмы «зеленой экономики». Но следует учитывать, что экономические и правовые проблемы экологически безопасного природопользования в разных странах мира трактуются по-разному, по-разному строится и сама теория «зеленого роста». В отечественной литературе разрабатывается теория «зеленого роста» применительно к российским условиям [8]. В аспекте данной статьи можно заметить следующее.

Общепринято, что экономический рост в теории «зеленой экономики» осуществляется, благодаря технологическим инновациям, обеспечивающим прекращение истощения биосферы и ее загрязнения. Для каждой ситуации разрабатываются свои контроли-

рующие показатели: нормативы качества воды, воздуха, сохранения биоразнообразия. При этом природная среда при этом рассматривается по аналогии с техникой, и затраты на компенсацию нанесенного ей ущерба определяются аналогично износу техники. Поэтому для восстановления природной среды рекомендуется собирать «амортизационные» отчисления в виде экологических платежей, предполагая, что этим учитываются два природных фактора, лимитирующих экономический рост: сокращение природных ресурсов и рост загрязнения окружающей среды. Недостатком такого подхода, по мнению авторов, является, во-первых, отсутствие учета того, что истощение ресурсов или загрязнение среды негативно влияют на состояние не только данной экосистемы и потому платежи, собираемые в пределах отдельной территории, не компенсируют всего экологического ущерба. Во-вторых, недостатком такой концепции является отсутствие учета связи природных ресурсов, поскольку предлагается их раздельное рассмотрение: отдельно почвы или лесных массивов, отдельно воды или атмосферы, отдельно ландшафта. Но эти ресурсы именно в связи создают ту биогеохимическую систему, которая необходима для эффективной хозяйственной деятельности [9, с. 59–92].

Поэтому, «точечный» подход к разработке отдельных «зеленых» технологий не результативен. К обеспечению «зеленого» роста в России необходим макроэкономический подход с изменением структуры отраслей и их связей в рамках всего народного хозяйства, причем производство должно служить удовлетворению лишь экологически целесообразных потребностей общества [10, с. 189]. В условиях отдельно взятой страны это обеспечить невозможно. Сегодня проблема состоит в том, что биогеохимическая система всей биосферы нарушается, ибо во многих странах используемые природные ресурсы после процесса промышленного производства возвращаются в природную среду в измененном виде и не включаются в естественный кругооборот, поддерживающий стабильность биосферы. Тому способствует ряд обстоятельств: прежде всего, накопление отходов производства с присутствием в них искусственных материалов, не способных включиться в естественный круговорот вещества. С целью решения указанной проблемы разрабатываются технологии для компенсационных и превентивных мероприятий. Однако тут возникает следующая экономически и экологически тупиковая ситуация: т.к. не прекращаются технологические инновации с использованием все новых материалов, то не прекращается изменение и химического состава отходов (выбросов, сбросов). Отсюда следует вывод о необходимости постоянного совершенствования технологий, которые требуются для преодоления экологически негативных последствий технологических инноваций. Процесс непрерывного совершенствования двух типов технологий – для самого процесса производства и для преодоления его экологических последствий – превращается в дурную бесконечность. При этом деградация среды не останавливается, т.к. ни одна технология еще не позволила вернуть, например, такому природному ресурсу, как вода, прежнее состояние, хотя комплекс работ по водоочистке требует расходов на разработку все более сложных технологий и содержание все более сложных очистных сооружений [11]. В Российской Федерации в 2017 г., объявленном годом экологии, поставлен вопрос об очистке тех рек, которые потеряли способность к самоочищению. Необходима модернизация очистных сооружений на предприятиях, сбрасывающих сточные воды. Это потребует значительных средств из федерального и региональных бюджетов, если

представить, что к числу таких рек относится Волга, на берегах которой расположены десятки предприятий. Чрезвычайно затратная ситуация складывается в отношении и другого важнейшего природного ресурса – почвы. На ее рекультивацию также направляются большие средства для разработки технологий по физической, химической и биологической очистке, но прежнее качество почв, тем не менее, не возвращается. Так что биогеохимическая система не восстанавливается, несмотря на рост расходов общества на ее восстановление. Чтобы выйти из экономически разорительной и экологически не результативной цепочки по созданию технологий «производство – очищение», необходимо признать, что экономический рост требует соблюдения эколого-экономического принципа «коэволюции общества и природы» [10, с. 326]. Данный принцип предполагает такое со-развитие элементов системы «общества и природы», при котором она не теряет своей целостности. Это возможно, если технологическая эволюция природопользования будет способствовать сохранению той природной среды, которая эволюционно сложилась за многие миллионы лет и генетически соответствует человеку. Растущие сегодня эколого-экономические издержки производства свидетельствуют об анти-коэволюционной направленности хозяйственной деятельности. Когда хозяйственное использование природной среды приводит к ее разрушению, экономический рост невозможен, т.к. «прибавочный продукт» уходит на погашение эколого-экономических издержек производства. Их предотвращение должны обеспечить инженеры, создающие технологии, изначально направленные на реализацию принципа «коэволюции общества и природы». Инженеров, а также экономистов и юристов к реализации принципа «коэволюции общества и природы» должно подготавливать образование, ориентированное на согласование микро-, макро- и мегаэкономических процессов природопользования, поскольку в силу естественной связи природных ресурсов их использование отдельной страной сказывается на биогеохимической системе всей биосферы. Поэтому использование ресурсов биосферы должно строиться по эколого-экономическому принципу «согласования иерархии экосистем и социально-экономических связей» [10, с. 327].

Таким образом, реализация принципа «коэволюции общества и природы» на уровне биосферы требует сотрудничества многих специалистов и во многих странах, но это невозможно, пока между странами идет борьба за доступ к ресурсам биосферы. Складывающаяся при этом конфронтация стран угрожает вооруженными столкновениями и порождает новые экологические проблемы, связанные с милитаризацией экономики. Несмотря на это война становится стимулом технологического обновления производства военной продукции.

В 2017 г. исполняется сто лет со дня рождения Н.Н. Моисеева, который внес большой вклад в популяризацию концепции коэволюции «общества и природы». Хотелось бы напомнить, что важнейшим условием реализации этой концепции Н.Н. Моисеев считал демилитаризацию экономики. В 1980-х годах, представив на суд мировой общественности смоделированный им сценарий экологических последствий ядерной войны, Н.Н. Моисеев математически доказал, что победителей в этой войне не будет и оставшиеся в живых «будут завидовать мертвым». Н.Н. Моисеев ввел термин «ядерная зима», с наступлением которой, все живое окажется на грани вымирания. Своей работой «Экология человечества глазами математика» он показал экологическую опасность гонки вооружений

[12]. Сегодня холодная война возвращается, и творчество инженеров направляется на создание кибероружия, средств радиоэлектронной войны, лазерной программы. Высокотехнологичное вооружение закупают и государственные, и частные армии, так что военизированный сектор экономики, несмотря на рост экологических проблем, приносит большие доходы. Причина здесь в том, что либерально-рыночная теория позволяет при формировании цен на военную продукцию не учитывать глобальных эколого-экономических издержек ее производства. В XXI веке это касается уже не только нашей планеты: человечество приступило к освоению космоса, где также разворачивается гонка вооружений, ввиду возможности использования ресурсов других планет, то есть могут возникнуть экологические проблемы уже космического масштаба. Чтобы предотвратить их, необходимо следовать принципу «коэволюции общества и природы» и за пределами Земли, не нарушая систему «общество–природа» в масштабах космоприродного единства. Такая космизация теории экономического роста потребует отказа от неприродной – технократической – интерпретации ее экономических категорий, в частности, категории «время».

Категория «время» в теории экономического роста используется для определения производительности труда, измеряемого выработкой продукции в единицу времени. Поскольку в условиях промышленной цивилизации сокращение времени для производства продукции обеспечивают техника и технология, «время» приобрело техноориентированную направленность. Однако с позиции космоприродного единства содержание категории «время» должно коррелироваться со временем восстановления природных систем, разрушенных в ходе хозяйственной деятельности. Значение имеет и область применения техники и технологий, повышающих скорость выполнения производственных операций. Если они используются для производства средств вооружения, то сокращение «времени» производственных операций не может способствовать экономическому росту. Это связано не только с тем, что военная продукция предназначена для разрушения природной среды, как в случае с климатическим оружием. Важно учитывать, что военная техника функционально не участвует в процессе производства и, таким образом, она не может обеспечить его роста. Военная техника в современных геополитических условиях выступает гарантом независимости государства и в этом смысле способствует продолжению хозяйственной деятельности, но к самому процессу экономического роста она отношения не имеет, т.к. способствует только разрушению биосферы. Приверженцы либерально-рыночной теории определяют доходность от производства средств вооружения в рамках краткосрочных целей и не учитывают, что для экономического роста требуются долговременные природовосстановительные процессы. Не следует забывать, что с переходом на новую технологию возможен риск некупаемости морально устаревшей техники, и для предупреждения финансовых потерь используется такая форма, как ускоренная амортизация.

Обновление техники требует новых объемов природных ресурсов (воды, руды, энергоносителей), что приводит к их дефициту и активизации борьбы между промышленно «развитыми» странами за доступ к месторождениям природных ресурсов. Стимулируемая этой борьбой милитаристская направленность экономики становится фактором ее деэкологизации, что не может не препятствовать экономическому росту.

В XXI веке организовать совместное и экологически безопасное использование ресурсов биосферы позволяет экономическая интеграция, принимающая уже не только

континентально-региональный, но и межконтинентальный характер [13]. Все больше стран входит в состав интегративных объединений на континентах Америки и Африки. В Европе в состав ЕС входит двадцать девять стран, а БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай, Южно-Африканская Республика) уже включает страны трех континентов: Азии, Африки и Америки. Масштабность интегративных объединений растет, и Шанхайская организация сотрудничества (ШОС) включает восемь государств, которые составляют почти половину населения Земли. Расширяет сферу деятельности и Евразийский Экономический Союз. Если подобные объединения не рассматривать как изолированные, то можно выйти на формирование мирового сообщества как единой хозяйственной системы, и регулировать использование природных ресурсов так, чтобы сохранять экологическую устойчивость биосферы.

Еще в начале 1990-х гг. Д.С. Львов выступил с предложением о введении общепланетарной ренты и концентрации ее в едином, общепланетарном фонде для компенсации экологического ущерба, причиняемого биосфере. Н.Н. Лукьянчиков, в свою очередь, предложил методику налогообложения стран для сбора ренты [10, с. 265–266]. В 1999 г. Э.Г. Кочетов издал работу по геоэкономике, в которой предложил модель межкорпорационного разделения труда, позволявшую предупредить глобальные экологические проблемы. Ученый исходил из того, что «экология не имеет границ, любое государство подвержено экологическому воздействию со стороны соседей и одновременно само представляет угрозу для других стран, выступает в роли своеобразного «агрессора». Отсюда встает необходимость введения экологической компоненты в доктрины развития» [14, с. 453–454]. Применению подобных теоретических разработок до сих пор препятствуют разногласия по экономическим вопросам использования природных ресурсов, которые возникают именно вследствие отсутствия биосферного подхода к определению условий экономического роста. Это продемонстрировали представители двадцати ведущих стран мира, собравшиеся в июле 2017 г. в Гамбурге, чтобы обсудить, в частности, реализацию Парижского климатического соглашения 2016 г. [15]. Разногласия на саммите были обусловлены тем, что Парижское соглашение призывает к деуглеродизации экономики путем налога на потребление газа и нефти, а это, по мнению некоторых участников саммита, сокращает прибыли предпринимателей. Парижское соглашение затрагивает экономические интересы и тех стран, которые получают доходы от продажи углеводородов. Парижское соглашение вызывает опасения и у транснациональных корпораций, т.к. угрожает сохранению того международного технологического разделения труда, которое приносит им прибыль, превратив ряд стран, располагающих запасами углеводородов, в экологические колонии. В странах–колониях, потерявших возможность использовать свой, традиционно-сложившийся, способ хозяйствования, наблюдается разрушение локальных экосистем, что нарушает экосистему биосферы и препятствует дальнейшему экономическому росту всего мирового сообщества, его переходу к «зеленой экономике». Чтобы противостоять данной тенденции, необходимо в условиях международного сотрудничества учитывать специфику природных и социо-культурных условий отдельных стран. С этой целью авторы данной статьи предлагают институт «природо-хозяйственного суверенитета» [16, с. 40–47], который должен предоставить странам возможность строить политику экономического роста, не нарушая лимиты экологической устойчивости биосферы,

с учетом природных условий своей страны, ее эколого-экономических интересов и социо-культурных традиций. Созданные таким образом государственно-территориальные природохозяйственные комплексы помогут использовать биосферу, сохраняя системную связь ее экосистем. Они будут отвечать и задачам космизации теории экономического роста, поскольку позволят учесть, что экономический рост зависит от состояния биосферы, не теряющей системной связи своих компонентов в определенном их количественном и качественном состоянии, не нарушать положения биосферы, сгармонизированной с мегасистемой космоса, о чем давно писали отечественные ученые [17]. Либерально-рыночная теория не может ставить своей задачей сохранение природно-системной связи ни на уровне биосферы, ни тем более космоса, поскольку она методологически не может принять требований «общей цели». В этом и состоит ее отличие от теории тех российских ученых, которые при рассмотрении проблем экономического роста исходили из принципа «общего блага», понимаемого с позиции антропокосмического мировоззрения [10, с.72–93]. Либерально-рыночная экономическая теория, будучи основана на антропоцентризме, не учитывает состояния биосферы, да еще в ее связи с пространством, выходящим за пределы Земли. В XXI веке достижения в сфере астрофизики, астрохимии, астробиологии доказывают связь биосферы Земли и космоса. Но сегодня теория экономического роста по-прежнему строится без учета того, что наша биосфера эволюционирует в пространственно-временном континууме космоса, поскольку для этого, как писал В.И. Вернадский, требуется мировоззрение, которое позволит вернуть нас к осознанию себя как части Вселенной [18, с. 27].

В настоящее время экономический рост принято оценивать по динамике Валового внутреннего продукта (ВВП). Как показывает статистика, в 2017 г. показатель ВВП вырос [19]. При этом известно, что есть страны, где эти показатели растут за счет объемов природных ресурсов, изымаемых из биосферы, в том числе и для производства вооружения. Возникают глобальные экологические проблемы, препятствующие экономическому росту всех стран мирового сообщества, поскольку сама возможность экономического роста определяется общебиосферными условиями.

Реализация биосферного подхода к сохранению условий экономического роста требует изменения ряда методологических установок в экономической теории. Прежде всего, если ранее каждая экономическая теория служила интересам конкретной социальной группы или совокупности групп в какой-то стране, то биосферный подход к теории экономического роста несовместим с «социально-групповым» подходом. Он должен обеспечить жизнепригодность биосферы для всех социальных слоев мирового сообщества, вне зависимости от имущественного статуса, этнической, конфессиональной принадлежности, и все субъекты хозяйствования обязаны согласовывать свое использование природных ресурсов биосферы, чтобы не нарушать целостности ее, как природного организма.

Отсюда вытекает следующее требование: теория экономического роста должна учитывать природные связи, которые обеспечивают жизнепригодность биосферы, причем как части космоса, развивающегося по законам системного единства. Для этого необходим контакт экономической теории с естественно-научным знанием. В свою очередь естественные науки должны дать научное подтверждение тому, что гармония с миром – это не мечта поэтов, а жесткое требование сохранения космоприродного единства. Оно

позволит обосновать экономическую цель хозяйствования, как направленную на сохранение биосферы для человека, а не для сообщества, состоящего из киборгов, управляемых искусственным интеллектом. Сегодня мы подошли к таким технико-технологическим достижениям, которые скоро позволят роботам посредством искусственных нейронных сетей адаптироваться к условиям среды, в которых человек существовать не может. В таком случае снимется проблема сохранения природных условий для человека, а вместе с ней уйдет и сама проблема экономического роста, поскольку тайна создания «прибавочного продукта» связана с тайной жизнедеятельности именно человека.

В заключение можно сказать следующее. С мнением авторов данной статьи можно не согласиться, но как без коллективного обсуждения важнейших проблем нашего жизнеобеспечения можно создать экономическую науку, адекватную экологическим вызовам XXI века? Как без коллективного со-размышления можно определить ту стратегическую направленность в развитии технологий, которая обеспечит и сохранение жизни людей, и рост их благополучия?

Литература:

1. Глобалистика. Энциклопедия. М.: Радуга, 2003, 1328 с.
2. Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века: Материалы научной конференции, посвященной 85-летию академика А.Л. Яншина. М.: Наука, 1998. 301 с.
3. Стиглиц Дж. Глобализация: тревожные тенденции. М.: Мысль, 2003. 303 с.
4. Альтерглобализм. Теория и практика антиглобалистского движения / под ред. А.В. Бугалина. М.: УРСС, 2003. 256 с.
5. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. 329 с.
6. Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д. Пределы роста. 30 лет спустя: пер. с англ. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 342 с.
7. GEO-6 Assessment for the pan-European region - UNEP Live uneplive.unep.org/media/docs/assessments/GEO_6_Assessment_pan_European_region.1 июня 2016 г. - UNEP website (<http://www.unep.org/publications>) and as an eBook. ; (GEO-6) Regional Assessment for Asia and the Pacific - UNEP Live website (<http://www.unep.org/publications>). (Дата обращения 19.05.2017)
8. Родионова И.А., Липина С.А. Зеленая экономика в России: модель и прогнозы развития // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-24. С. 5462–5466. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38369> (дата обращения: 07.09.2017).
9. Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. М.: Наука, 1994. 672 с.
10. Сухорукова С.М. Эколого-экономическое направление в России (XVIII–XXI вв.). М.: Издательский дом «Орион», 2010. 336 с.
11. Ильин С.Н. Безопасные, отечественные, экологические подходы в работе // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016 № 11 (107). С. 50–58.
12. Моисеев Н.Н. Экология человечества глазами математика. М.: Молодая гвардия, 1988. 255 с.
13. «Мировые экономические союзы и блоки» www.ereport.ru/articles/ecunions.htm. (Дата обращения 21.06.2017)

14. Кочетов Э.Г. Геоэкономика. М.: БЕК, 1999. 480 с.
15. О чем не договорились на саммите G20 в Гамбурге // Gazeta. Ru. 07.07.2017 (Дата обращения 05.07.2017)
16. Сухорукова С.М., Погорелый А.М. Международное технологическое разделение труда и рост глобальных экологических проблем // Вестник МГУ. Секция Геополитика и глобальные проблемы. 2014. № 2. С. 14–20.
17. Чижевский А.Л. На берегу вселенной. Воспоминания о К.Э. Циолковском. М.: «Айрис - Дидактика», 2007. 448 с.
18. Грачев В.А. Ноосферное мировоззрение и устойчивое развитие // Вклад В.И. Вернадского в развитие мировой цивилизации (К 150-летию со дня рождения). М.: Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского, 2013. 220 с.
19. Global – finances. ru – vvp – stran-miro – 2017.

References:

1. Globalistics Encyclopedia. Moscow: Raduga Publ., 2003. 1328 p. (in Russ.).
2. Global environmental problems on the threshold of the XXI century: Materials of the scientific conference dedicated to the 85th anniversary of Academician A.L. Yanshin. Moscow: Nauka Publ., 1998. 301 p. (in Russ.).
3. Stiglitz J. Globalization: disturbing trends. Moscow: Mysl' Publ., 2003. 303 p. (in Russ.).
4. Alterglobalism. Theory and practice of the anti-globalization movement / ed. by A.V. Buzgalin. Moscow: URSS Publ., 2003. 256 p. (in Russ.).
5. Gorshkov V.G. Physical and biological basis of life sustainability. Moscow: VINITI Publ., 1995. 329 p. (in Russ.).
6. Meadows D., Randers J., Meadows D. Limits of growth. 30 years later: transl. from English. Moscow: Akademkniga Publ., 2007. 342 p. (in Russ.).
7. GEO-6 Assessment for the pan-European region - UNEP Live live.unep.org/media/docs/assessments/GEO_6_Assessment_pan_European_region.1 June 2016 - The UNEP website (<http://www.unep.org/publications>) and as an eBook.; (GEO-6) Regional Assessment for Asia and the Pacific - UNEP Live website (<http://www.unep.org/publications>). (Date of access May 19, 2017).
8. Rodionova I.A., Lipina S.A. Green economy in Russia: a model and development forecasts // Fundamental Researches. 2015. № 2-24. P. 5462–5466. URL: <https://fundamental-research.ru/en/article/view?id=38369> (Date of access 07.09.2017).
9. Vernadsky V.I. Living matter and biosphere. Moscow: Nauka Publ., 1994. 672 p. (in Russ.).
10. Sukhorukova S.M. Ecological and economic direction in Russia (XVIII-XXI centuries). M.: Publishing House "Orion", 2010. 336 p. (in Russ.).
11. Ilyin S.N. Safe, domestic, environmental approaches in work // Water treatment. Water treatment. Water supply. 2016 №. 11 (107). P. 50–58. (in Russ.).
12. Moiseev N.N. Ecology of humanity through the eyes of a mathematician. Moscow. Molodaya Gvardiya Publ., 1988. 255 p. (in Russ.).
13. «World economic unions and blocks» www.ereport.ru/articles/ecunions.htm. (Date of access 21.06.2017). (in Russ.).
14. Kochetov E.G. Geo-economics. Moscow: Publishing House «BEK», 1999. 480 p. (in Russ.).

15. What was not agreed at the G20 summit in Hamburg // Gazeta. Ru. 07.07.2017 (Date of access 05.07.2017). (in Russ.).

16. Sukhorukova S.M., Pogorelyi A.M. International technological division of labor and the growth of global environmental problems // Bulletin of the Moscow State University. Section Geopolitics and Global Problems. 2014. № 2. P. 14–20 (in Russ.).

17. Chizhevsky A.L. On the shores of the universe. Memories of K.E. Tsiolkovsky. Moscow: «Iris - Didactics», 2007. 448 p. (in Russ.).

18. Grachev V.A. Noospheric worldview and sustainable development. Vernadsky in the development of world civilization (on the 150th anniversary of his birth). Moscow: The non-governmental ecological foundation named after V.I. Vernadsky, 2013. 220 p. (in Russ.).

19. Global - finances. ru - vvp -stran-miro - 2017.

Об авторах:

Сухорукова Светлана Михайловна, доктор экономических наук, профессор кафедры экологической и промышленной безопасности Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Погорельи Антон Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры экологической и промышленной безопасности Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

About authors:

Svetlana M. Sukhorukova, D.Sc. (Economics), Professor of the Chair of Environmental and Industrial Safety, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia).

Anton M. Pogorelyi, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Environmental and Industrial Safety, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).