

Вестник кибернетики

Proceedings in Cybernetics

№ 2 (34)

12+

2019

**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Вестник кибернетики

Proceedings in Cybernetics

№ 2 (34)

Сургут
2019

Учредитель и издатель
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Гетман А.Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Мальшев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор
Микшина В. С., к. т. н.

Выпускающий редактор

Аширова А. В.

Редактор

Манаева Л. И.

Верстка

Мельниковой Е. А.

Переводчик

Бенская М. О.

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим группам научных специальностей: 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации, 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ЭЛ № ФС 77–63407 от 16.10.2015

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: (3462) 76-29-88, факс: (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: jc.surgu.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Science (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Science (Philosophy)

Prof. Getman A. F., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Science (Philosophy)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Science (Engineering)

Mikshina V. S., Candidate of Science (Engineering)

Publishing Editor

Ashirova A. V.

Editor

Manaeva L. I.

Layout

Melnikova E. A.

Translator

Benskaya M. O.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals

Published in the RF by the Higher Attestation Commission,

which publishes main scientific results of doctor's and candidate's theses, on the following subject groups: 05.13.01 – System Analysis, Data Management and Processing; 05.13.18 – Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes; 05.27.01 – Solid-State Electronics, Radio Electronics, Micro and Nano Electronics, Quantum Instruments

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate EL No. FS 77–63407 dated on 16.10.2015

Published since 2002. 4 issues per year

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenin pr., 1

Tel.: +7(3462) 76-2988, fax: +7 (3462) 76-2929, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Web: jc.surgu.ru

© Surgut State University

© Author

СОДЕРЖАНИЕ

Цибульский В. Р., Соловьев И. Г., Говорков Д. А., Арефьев С. П. Применение популяционной модели лиственницы сибирской для контроля биоразнообразия лесов севера Западной Сибири	6
Семенов О. Ю., Дёмко А. И. Задача конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине в оптическом расходе газе и жидкости	15
Заводовский А. Г. Определение оптимального состава раствора ASP при добыче тяжелой нефти методом вращающейся капли	27
Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Командное проектирование автоматизированной системы управления тепличным комплексом	33
Шошин Е. Л. Измерение длины установленных железобетонных свай и реконструкция металлических включений методом подповерхностного радиолокационного зондирования поляризационно-модулированными сигналами	41
Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Онтология оператора преобразования в теории асимметрии внутреннего времени сложных систем	47

CONTENTS

Tsibulsky V. R., Solovyev I. G., Govorkov D. A., Arefyev S. P. Application of Population Model of Siberian Larch for Forest Biodiversity Control in the North of Western Siberia	6
Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Problem of Convective Heat Transfer on Streamlined Flat Plate in Optical Flow Meter of Gas and Liquid	15
Zavodovskiy A. G. Estimation of Ideal Composition of ASP Solution During Production of Heavy Oil by Rotating Drop Method	27
Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Command Pattern of Automated Control System for Greenhouse Complex	33
Shoshin E. L. Length Measuring of Installed Reinforced Concrete Piles and Reconstruction of Metallic Inclusions by Subsurface Radar Sensing with Polarization-Modulated Signals	41
Ostreikovskiy V. A., Shevchenko E. N. Ontology of Transformation Operator in Theory of Internal Time Asymmetry of Complex Systems	47

УДК 582.475.2(571.1)+630*1(571.1)

ПРИМЕНЕНИЕ ПОПУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСОВ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В. Р. Цибульский¹, И. Г. Соловьев¹, Д. А. Говорков^{1,2}, С. П. Арефьев^{1,3}

¹Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,
v-tsib@yandex.ru, solovyev@ikz.ru

²Тюменский индустриальный университет, dagovorkov@mail.ru

³Тюменский государственный университет, sp_arefyev@mail.ru

Механизмы оценки и прогнозирования ресурсного потенциала лесного фонда северных нефтедобывающих территорий Западной Сибири имеют первостепенное значение в задачах оценки воздействий на окружающую среду. В представленных исследованиях предложено оценивать устойчивость биоразнообразия северных лесных территорий при помощи прогнозных моделей популяций деревьев-эдификаторов, в частности лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb). Впервые разработана и доведена до численных значений проекционная матрица и показана возможность ее идентификации на основе динамических кривых плотности древостоя и урожайности шишек. За основу принят вариант онтогенетических состояний: ювенильного, ауксофазы, генеративного. Дано краткое описание этих состояний: возрастные границы, длительность и их возможные значения для лиственницы сибирской. Поскольку длительность состояний различна, применяется модифицированная модель Л. П. Лефковича с показателями дожития, задержек и рождаемости. Первые два показателя идентифицированы по динамической кривой численности нормального древостоя по материалам, предоставленным Н. В. Выводцевым в справочнике В. В. Загребва, третий – по кривой урожайности шишек по возрастам из работ Е. П. Верховцева применительно к условиям рассматриваемой территории. В результате получены численные значения параметров матрицы, определены максимальное собственное число и индикатор потенциала роста, указывающий на возрастание или сокращение популяции. В рассматриваемом варианте их значения близки к единице, что говорит о равновесности популяции. Кроме того, определена структура древостоя через 20 лет. Полученные результаты могут быть положены в основу мониторинга устойчивости биоразнообразия выделенного участка леса в северных районах с усиленной техногенной нагрузкой, для реализации которого необходимы данные кривых роста численности и урожайности популяции деревьев-эдификаторов, в том числе лиственницы сибирской.

Ключевые слова: биоразнообразие, север, мониторинг, модель, популяция, лиственница.

APPLICATION OF POPULATION MODEL OF SIBERIAN LARCH FOR FOREST BIODIVERSITY CONTROL IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

V. R. Tsibulsky¹, I. G. Solovyev¹, D. A. Govorkov^{1,2}, S. P. Arefyev^{1,3}

¹Tyumen Scientific Centre SB RAS, v-tsib@yandex.ru, solovyev@ikz.ru

²Industrial University of Tyumen, dagovorkov@mail.ru

³Tyumen State University, sp_arefyev@mail.ru

Mechanisms for assessing and predicting the forest resource potential of the northern oil-producing territories of Western Siberia are of great importance in the tasks of environmental impact assessment. The assessment of the biodiversity sustainability of the northern forest areas using predictive population models of tree-edificators (trees as ecosystem engineers), in particular, Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb) is proposed. A projection matrix was first developed and adjusted to numerical values, and the possibility of its identification is shown based on dynamic curves of the tree stand and cones yield. The variant of ontogenetic stages (juvenile, auxophase, generative) is taken as a basis. A brief description of these stages is given including age limits, duration, and their

possible indicators for Siberian larch. Since the duration of the stages is different, the modified Lefkovitch model and indicators of survival, delay and fertility are applied. The first two indicators are identified using the dynamic curve of the normal trees stand (N. V. Vyvodtsev), the third – using the curve of the yield of cones by age as applied to the territory conditions (E. P. Verkhovtsev). As a result, numerical values of parameters of the matrix are obtained, the maximum eigenvalue and an indicator of potential growth are determined, indicating the growth or decline of the population. In the considered variant, their values are close to one, which indicates the stability of the population. Furthermore, the structure of the tree stand in 20 years is determined. The results can be used as a basis for monitoring the sustainability of biodiversity of a designated forest area in the northern regions with increased man-made stress, which requires data on growth curves for the population and yield of edificators, including Siberian larch.

Keywords: biodiversity, north, monitoring, model, population, larch.

Введение. Север Западной Сибири является основным нефтегазодобывающим регионом России уже более 50 лет. С одной стороны – интенсивное освоение нефтегазовых ресурсов практически по всей территории, с другой – недостаточный уровень изученности динамики лесов и средств контроля устойчивости состояния фонда делают задачу экологической безопасности и сохранения биоразнообразия растительных формаций Западной Сибири наиболее актуальной.

Например, до сих пор в атласах флоры России (и СССР) нет специальных карт лесов Западной Сибири, есть лишь неполные описания лесов регионов. В международной программе ICP Forests по сохранению лесов и управлению ими пункты постоянного наблюдения указаны в Мурманске, Санкт-Петербурге, Калининграде, и их нет ни в Западной, ни в Восточной Сибири, ни на Дальнем Востоке.

Это дает основание говорить о необходимости и актуальности мониторинга влияния климатических и техногенных факторов на биоразнообразии лесов в регионах с усиленной антропогенной нагрузкой [1–2]. Устойчивое состояние лесов связано не только с приспособленностью к внешним условиям, но и с вовлеченностью их в систему биотических связей. Логично считать, что уменьшение или исчезновение любой видовой популяции так или иначе отразится на состоянии всего биома и может повлечь за собой цепную реакцию изменения биоразнообразия и трансформации природного комплекса на данной территории [3–4]. Вместе с тем в сложных биологических системах при утрате отдельных компонентов оставшиеся способны компенсировать их функции, что обеспечивает сохранение или восстановление устойчивого функционирования видоизмененной системы в целом. Однако возможность такой компенсации ограничивается спецификой вида (например, в случае утраты видов-эдификаторов), особенно в бедных сообществах. На северном пределе лесной зоны региона лиственница является практически единственным видом, способным образовывать древесный (главный) ярус фитоценоза, ее состояние в наибольшей степени характеризует состояние биологических сообществ с ее участием [5]. Дать оценку устойчивости биоразнообразия и ассоциированного с ним ландшафта позволяет матричная модель популяции вида-эдификатора. Кроме того, она может выступать одним из системообразующих элементов мониторинга состояния растительного покрова в районах нефтегазодобычи при организации постоянных пунктов наблюдений подобно программе ICP Forests [6].

Цель работы: получить простой и достаточный инструментарий для оценки устойчивости биоразнообразия биома основных видов-эдификаторов на северном пределе лесной зоны, максимально приближенной к практике мониторинга состояния окружающей среды в нефтедобывающих регионах Западной Сибири.

В настоящее время многие исследователи строят модели динамики древостоев с целью уточнения влияния изреживания и возрастного умирания на воспроизводимость популяции видов. Для мониторинга биоразнообразия видов, учета стадий произрастания и выживаемости важное значение имеют работы Ю. М. Свиричева, Н. Кейфица, Х. Казуэлла, Д. О. Логофета,

И. Н. Ключковой и др. по построению и использованию моделей в виде популяционных проекционных матриц (ППМ) [7–10].

В литературе известны лишь отдельные попытки разработать такие модели для лесных сообществ и древостоев. Для них обычно при моделировании граф жизненного цикла включают ювенильное, виргинильное и генеративные состояния и не включают суперсенильные и сенильные. Хотя последние могут длиться 100 и более лет, они не влияют на воспроизводимость популяции.

Базовой моделью чаще всего является ППМ с дискретной возрастной структурой. Для лесной популяции это дискретно-временные шаги 10, 20 лет и соответствующие классы роста (плотность на ед. площади) (по В. В. Загрееву их 10). При средней продолжительности жизни хвойных пород 250–350 лет возрастных шагов может быть 12–17. Для «рождаемости» количество шагов ограничено только генеративной стадией, но и в таком случае это 150–200 лет, т. е. 8–10 шагов и пять классов «рождаемости». Например, по Верховцеву, это количество шишек на единицу площади (га) или на одно дерево в среднем для одного класса развития [11].

Таким образом, все методы, критерии, рекомендации имеют возрастную классификацию, но ориентированную на стадии. Исходя из вышесказанного, проще и понятнее с биофизической точки зрения ППМ со стадийной структурой.

Материалы и методика исследований. Одним из вариантов является модель Л. П. Лефковича [7, 12–14], имеющая следующие стадиоспецифические параметры для лесной популяции: b_j – рождаемость, обозначает долю среднего числа шишек на одно дерево в каждой подфазе; s_j – коэффициент дожития, обозначающий долю стволов, перешедших из одной фазы в другую; r_j – доля числа стволов, не перешедших из одной фазы в другую за 1 шаг.

Большое значение с точки зрения технической возможности использования имеет ее порядок, определяемый числом онтогенетических состояний и возрастных классов. В литературе имеется достаточно много описаний отдельных онтогенетических состояний лиственницы сибирской [15–18]. Перечислим их в порядке возрастания: проростки, всходы, ювенильное, имматурное, виргинильное, генеративное, субсениальное и сениальное состояния.

Большинство авторов для сокращения порядка матрицы и упрощения расчетов применяют сокращенный перечень онтогенетических состояний: ювенильное, виргинильное, генеративное [15, 19] или эмбриональное, молодняк (ювенильное), состояния роста (ауксофаза), спелости (зрелости), старости [20]. С точки зрения целей сохранения биоразнообразия важно оценивать баланс роста и генеративных функций, поэтому остановимся на варианте, не учитывающем эмбриональную фазу и фазу старости как не влияющие на баланс матрицы. Получаем следующий набор фаз: ювенильная, ауксофаза, генеративная (зрелости) фаза, причем генеративную разобьем на 3 подфазы (состояния), как это принято в работе [15]. Данные онтогенетические состояния далее будем называть фазами роста, так как некоторые включают в себя несколько традиционно принятых состояний.

На рис. 1 приведена выбранная схема и соответствующий граф жизненного цикла популяции лиственницы сибирской. Приведем краткое описание принятых фаз лиственницы сибирской по следующей схеме: наименование, обозначение, основной процесс роста, признаки конца фазы, усредненная длительность.

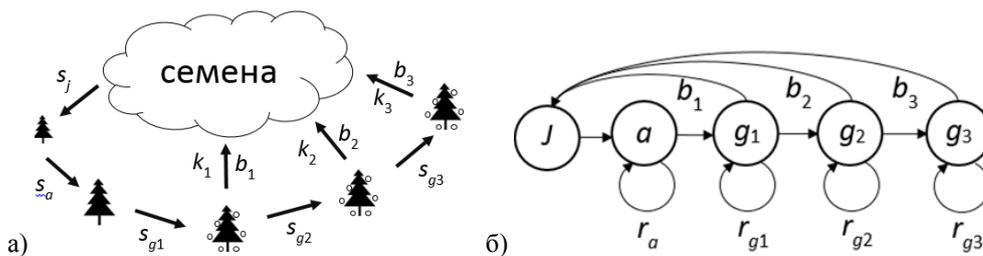


Рис. 1. Схема (а) и граф (б) жизненного цикла (ГЖЦ) лиственницы сибирской (*Larix sibirica*):
 b_1, b_2, b_3 – показатели рождаемости; $s_j, s_a, s_{g1}, s_{g2}, s_{g3}$ – показатели дожития;
 k_1, k_2, k_3 – коэффициенты учета возрастной урожайности шишек

1. Ювенильная фаза (*J*). В нашем случае она включает в себя проростки, всходы, собственно ювенильное состояние и часть имматурного. С одной стороны, эта фаза укоренения и формирования молодого ствола начиная от первой верхушечной почки до высоты 5–10 м при диаметре до 10 см [20]. Длительность этой фазы складывается из времени прорастания проростков через подстилающий покров (1–2 года), ювенильной фазы (2–3 года) и начальной и промежуточной частей имматурной фазы до усиленного роста (2–9 лет). Сюда же может входить время проникновения семян через подстилающий покров (6–7 лет) [17]. По Б. Н. Норину и справочнику по таксации леса [16, 21], эта стадия молодняка в среднем для лиственницы длится 18–20 лет.

2. Ауксофаза (*a*). Это фаза роста, включающая часть имматурного онтогенетического состояния, начало усиленного роста (2–8 лет). Характеризуется сформировавшейся удлиненной кроной с отсутствием сухих боковых ветвей на большей части высоты ствола (до 60 %). При этом иногда ускоряется рост не только центрального, но и боковых побегов. Наблюдается формирование значительного количества мощных боковых корней, размещающихся на глубине 30–50 см в зависимости от близости залегания вечномерзлых грунтов. В конце фазы растения переходят в древесный ярус, появляются мужские и женские стробилы и после опыления – первые шишки. Для популяции сомкнутой кроны это возраст 30–40 лет [17]. Принято считать, что появление первых шишек II класса урожайности является пограничным показателем виргинильной и генеративной фаз, а значит, в нашем случае, ауксо- и генеративной фаз. Показателем состояния этой фазы обычно является скорость роста численности популяции (плотность на 1 га за один шаг времени).

3. Генеративная фаза (*g*). Характерными процессами являются цветение, образование шишек и семян и их распространение на фоне замедления процессов относительного роста. У Б. Н. Норина [16] приведены классы урожайности шишек с I по V, самый высокий – V класс. Максимум смещается в зависимости от подстилающего покрова. Если учитывать, что II класс, имеющий незначительное число шишек на каждом дереве, отнесен нами к ауксофазе, то генеративная фаза длится с III по V класс. При этом каждому классу соответствуют подфазы: g_1, g_2, g_3 . По публикациям многих авторов, генеративная фаза начинается в 60–100 лет и длится около 200 лет. Для лиственницы сибирской генеративные фазы длятся от 60 до 240–300 лет [11, 21] Все три подфазы являются основой второй части баланса популяционной модели – рождаемости. Показателем рождаемости чаще всего служит количество семян на 1 га, зависящее от урожайности шишек, вылета семян с учетом наличия пустых [19]. Также у Б. Н. Норина [16] приведены данные по лиственнице, позволяющие оценить этот показатель в целом для всей генеративной фазы. На практике такой показатель проще оценивать по количеству шишек для разных по возрасту групп деревьев. Эти данные можно получить, привязав классы урожайности к разбивке по ступеням возраста и полноте древостоя [11, 19, 21]. Для упрощения идентификации модели нами принято, что влияние климата, подстилающего покрова, почвы на прорастание семян одинаково для всех генеративных подфаз на выделенном участке и обозначено $k_1 = k_2 = k_3$ (рис. 1). Зависимость урожайности от возраста древостоя, по данным многих авторов [16–17], максимальна в первой подфазе и затем снижается с возрастом. Поэтому с такой же целью принято, что классы развита урожайности III, IV, V соответствуют подфазам 1, 2, 3.

Перейдем непосредственно к разработке проекционной матрицы, базируясь на работах Д. О. Логофета, И. Н. Ключковой и других авторов [7–8, 12–14, 22–25]. Выбранные онтогенетические состояния $S\{J, a, g_1, g_2, g_3\}$ имеют разные длительности по времени, поэтому за основу примем модель Лефковича [7, 12, 14, 24]. Исходя из вышеприведенных описаний, будем считать, что длительность фаз и подфаз кратна одному шагу по времени ($\Delta t = 20$ лет) и равна соответственно: 20, 40, 60, 60, 60 лет.

Пусть $S(t)$ – множество, состоящее из показателей, обозначающих численность популяции на 1 га $\{J(t), a(t), g_1(t), g_2(t), g_3(t)\}$ в момент времени t и $\{J(t + \Delta t), a(t + \Delta t), g_1(t + \Delta t), g_2(t + \Delta t), g_3(t + \Delta t)\}$ через 1 шаг (20 лет), тогда для лиственницы запишем:

$$\begin{Bmatrix} J(t+\Delta t) \\ a(t+\Delta t) \\ g_1(t+\Delta t) \\ g_2(t+\Delta t) \\ g_3(t+\Delta t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & b_1 & b_2 & b_3 \\ s_j & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_a & r_{g_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{g_1} & r_{g_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{g_2} & r_{g_3} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} J(t) \\ a(t) \\ g_1(t) \\ g_2(t) \\ g_3(t) \end{Bmatrix},$$

где b_i – параметр рождаемости ($b_i \geq 0$), обозначающий долю среднего количества потомства, например, шишек для лиственницы на одно дерево в каждой подфазе g_i ;

s_j – параметр дожития $0 < s_j \leq 1$, обозначающий долю численности особей, перешедших из данной фазы или подфазы в другую за 1 шаг;

r_j – задержка в стадии развития, обозначающая долю особей, не перешедших из данной фазы или подфазы в другую за 1 шаг, причем $0 < (s_j + r_j) \leq 1$.

Запишем уравнение для каждой фазы (строки). Для ювенильной фазы

$$J(t+\Delta t) = b_1 \cdot g_1(t) + b_2 \cdot g_2(t) + b_3 \cdot g_3(t), \quad (1)$$

где b_1, b_2, b_3 – доля шишек на одну особь в каждой подфазе. Перепишем уравнение (1) с учетом коэффициента влияния вылета и всхожести семян, климата и пересчета на подрост ювенилов (постоянного для каждой подфазы) – k_i : $J(t+\Delta t) = \bar{b}_1 \cdot g_1(t) + \bar{b}_2 \cdot g_2(t) + \bar{b}_3 \cdot g_3(t)$, где введено обозначение $\bar{b}_i = b_i \cdot k_i$.

Для получения параметров этой строки необходимо по материалам лесоустройства построить динамическую кривую урожайности. Наблюдать в природе такую зависимость можно на посадках.

Ауксофаза у лиственницы включает усиленный рост около 40 лет без генеративных функций, поэтому ее динамика за один шаг определяется по формуле

$$a(t+\Delta t) = s_j \cdot J(t) + r_a \cdot a(t), \quad (2)$$

где r_a – доля особей, оставшихся в ауксофазе и не перешедших в следующую g_1 за 1 шаг $\Delta t = 20$ лет. Генеративные фазы разбиты на три подфазы, причем каждая имеет длительность $3\Delta t$.

$$g_1(t+\Delta t) = s_a \cdot a(t) + r_{g_1} \cdot g_1(t), \quad (3)$$

где s_a – доля особей, перешедших из ауксофазы в стадию генеративную g_1 за 20 лет; r_{g_1} – доля особей, оставшихся в генеративной фазе. Далее по аналогии

$$g_2(t+\Delta t) = s_{g_1} \cdot g_1(t) + r_{g_2} \cdot g_2(t), \quad (4)$$

$$g_3(t+\Delta t) = s_{g_2} \cdot g_2(t) + r_{g_3} \cdot g_3(t). \quad (5)$$

Если полученную на основании уравнений (1)–(5) матрицу перенумеровать, а систему обозначить следующим образом: $X(t+\Delta t) = C \cdot X(t)$, то можно записать

$$C = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & \bar{b}_1 & \bar{b}_2 & \bar{b}_3 \\ s_j & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_a & r_{g_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{g_1} & r_{g_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{g_2} & r_{g_3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{43} & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

В работах Д. О. Логофета и И. Н. Клочковой [7, 12, 13] показано, что матрица Лефковича данного вида неразложима, и это позволяет при оценке роста популяции ограничиться вычислением репродуктивного потенциала $R(c)$ через «стадиеспецифические» параметры.

Для матрицы Лефковича (6) там же предложено выражение для нахождения $R(c)$ через параметры популяции:

$$R(c) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - r_j) + \sum_{i=1}^n l_i b_i \prod_{j=i+1}^n (1 - r_j), \quad (7)$$

где $l_1 = 1$, $l_i = s_1, s_2, \dots, s_{i-1}$.

Используя реальные данные, можно получить собственное число матрицы λ_{\max} и репродуктивный потенциал $R(c)$, устанавливая попарно следующие отношения:

Если $R(c) > 1$, $\lambda_{\max} > 1$ – популяция укрупняется;

при $R(c) = 1$, $\lambda_{\max} = 1$ – находится в равновесном состоянии;

и при $R(c) < 1$, $\lambda_{\max} < 1$ – популяция сокращается.

Этого достаточно, чтобы оценить состояние развития данной популяции.

Результаты исследования и обсуждение. Для идентификации построенной модели популяции необходимо уточнить значения границ фаз роста: переход от ювенильной к ауксофазе и от ауксофазы к генеративной, получить динамические функции (кривые) плотности популяции и урожайности по возрастам с шагом 20 лет.

Выше нами выбраны длительности фаз: 20, 40, 180 лет. Взята кривая плотности для нормального древостоя лиственницы сибирской V бонитета, приведенная в справочнике [21] для Красноярского края, что достаточно близко к лесотундре (рис. 2). Для уточнения выбранных границ длительностей фаз между ювенильной, ауксо- и генеративной фазами применительно к условиям лесотундры были взяты модельные деревья в районе г. Надым [26–27] и по их древесно-кольцевым хронологиям определены их значения по условию равенства нулю второй и третьей производных кривой прироста лиственницы [26, 27]. Начальные фазы роста J от нуля до первого перегиба $\Delta R(t)$ имеют длительность около 22 лет; следующая фаза (a) усиленного роста до второго перегиба $\Delta R(t)$ соответствует точке 68 лет, что довольно близко к выбранным значениям.

На рис. 2 приведена кривая плотности нормальной популяции лиственницы сибирской, взятая в качестве примера из справочника В. В. Загреева [21], на которой отмечены выбранные границы фаз с шагом $\Delta t = 20$ лет. По этой кривой определяются параметры дожития s_j и r_{gj} как доля стволов, перешедших и не перешедших в следующую фазу за один шаг. На рис. 3 представлена динамическая кривая урожайности шишек по Е. П. Верховцеву [11] для Хабаровского края древостоя лиственницы сибирской при полноте 0,8, что практически соответствует нормальному (полнота 1,0). По ней определен показатель рождаемости \bar{b}_l как доля среднего числа шишек в каждой генеративной подзоне, приведенная к единичному (нормированному) значению подроста в ювенильной фазе.

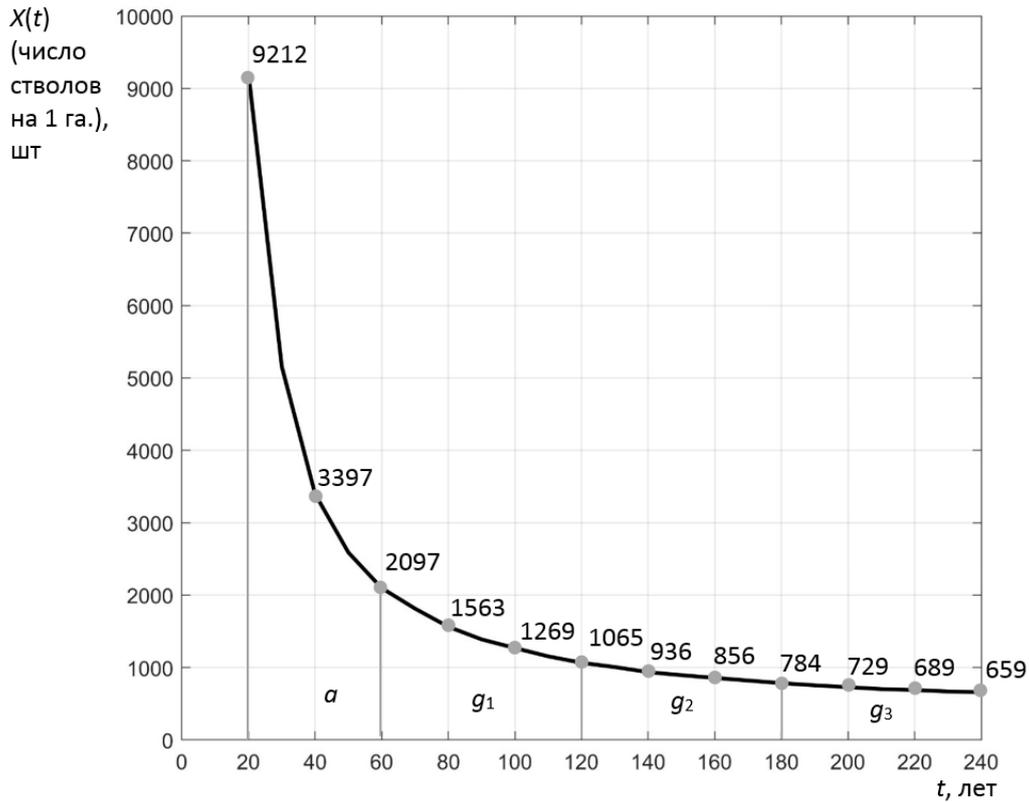


Рис. 2. Кривая плотности популяции для лиственницы (V бонитет) по материалам Н. В. Выводцева, приведенным в справочнике В. В. Загребва [21]

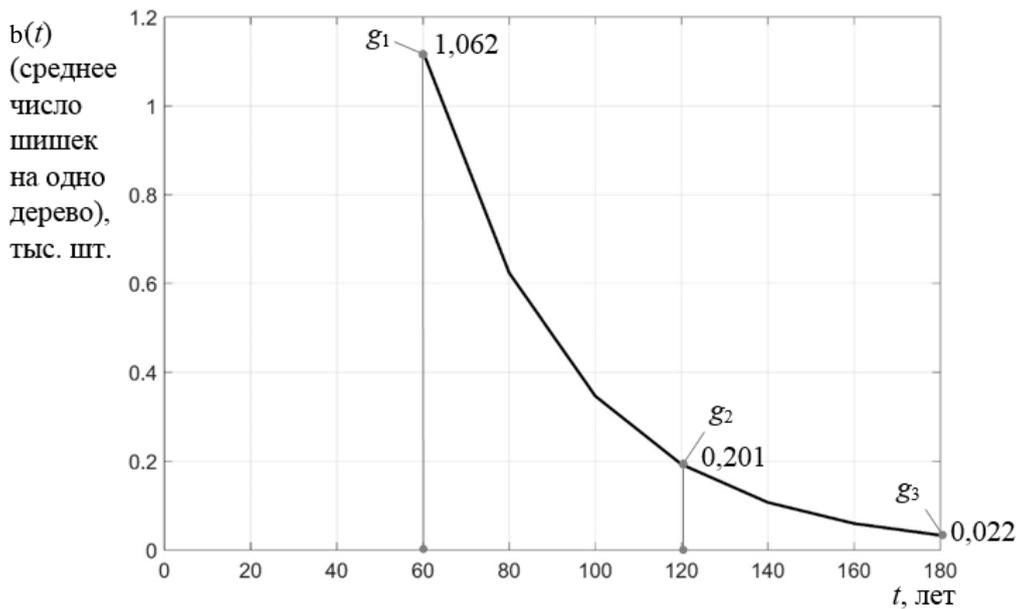


Рис. 3. Снижение урожайности шишек в зависимости от возраста лиственницы сибирской при полноте древостоя 0,8: g_1 , g_2 , g_3 – моменты начала генеративных подфаз; цифрами обозначены значения урожайности шишек

Руководствуясь графиком (рис. 2) и соответствующей таблицей [20, табл. 132], формулами (1)–(6), получим параметры с учетом k_i : $s_j = 0,37$, $s_a = 0,28$, $s_{g1} = 0,24$, $s_{g2} = 0,28$, $r_a = 0,38$, $r_{g1} = 0,6$, $r_{g2} = 0,63$, $r_{g3} = 0,65$, $\bar{b}_1 = 2,16$, $\bar{b}_2 = 0,2$, $\bar{b}_3 = 0,04$.

Исходная численность фаз древостоя $S(t) = \{9212, 5494, 3897, 2556, 2077\}$.

В результате получаем:

$$\begin{pmatrix} J(t + \Delta t) \\ a(t + \Delta t) \\ g_1(t + \Delta t) \\ g_2(t + \Delta t) \\ g_3(t + \Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2,16 & 0,2 & 0,04 \\ 0,37 & 0,38 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,28 & 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,24 & 0,63 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,28 & 0,65 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 9212 \\ 5494 \\ 3897 \\ 2556 \\ 2077 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9012 \\ 5496 \\ 3877 \\ 2546 \\ 2126 \end{pmatrix}.$$

Максимальное собственное число для полученной матрицы равно 0,99. Индикатор потенциального роста (7) для этих же данных $R(c) = 0,92$. Эти результаты говорят о равновесности состояния популяции для выбранного примера нормального древостоя и урожайности по Е. П. Верховцеву [11] для сибирской лиственницы V бонитета.

Выводы:

1. Рассмотренная методика построения популяционной модели древостоя и её анализ на примере лиственницы сибирской – одного из базовых эдификатора растительного покрова северотаежного редколесья могут служить основой для оценки устойчивости биоразнообразия лесных территорий в Северных регионах с интенсивной эксплуатацией нефтегазопромысловых систем.

2. Конструкция популяционно-проекционной матрицы модели фиксирует базовые свойства популяции контролируемого вида древостоя, устанавливая количественные соотношения стадий произрастания и текущие тенденции роста или сокращения зональной популяции вида вследствие природно-климатических или антропогенных факторов.

3. Даны расчетные схемы параметрического конструирования популяционно-проекционной матрицы модели на основе применения и использования данных традиционной таксации лесов, а именно:

- выделение контрольных участков с последующим подсчетом плотности стволов с 10 или 20-летними периодам произрастания;
- визуальная оценка среднего количества шишек для подгрупп деревьев выделенных генеративных фаз;
- получение керна модельных деревьев для определения границ онтогенетических состояний выделенных фаз.

Литература

1. Кирсанова Н. В. Применение методов фитоиндикации при экологическом мониторинге объектов добычи нефти и газа (на примере ЯНАО) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 2. С. 37–43.
2. Петрова Г. И., Терновская И. А., Фатхуллин Р. Р. Научно-методические аспекты совершенствования системы мониторинга окружающей среды при разработке нефтяных месторождений // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 3. С. 31–34.
3. Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Кракснер Ф., Онучин А. А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 3–25.
4. Whittaker R. H. Communities and Ecosystems. 2nd Rev. Ed. MacMillan Publishing Co. New York, 1975. p. 385.
5. Сысуев В. В., Бондарь Ю. Н., Чумаченко С. И. Моделирование структуры ландшафтов и динамики древостоев для планирования устойчивого лесопользования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 39–48.

6. Соловьянов А. А. Наблюдательные сети экологического мониторинга США // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 6. С. 19–28.
7. Логофет Д. О., Ключкова И. Н. Математические модели Лефковича: репродуктивный потенциал и асимптотические циклы // Математическое моделирование. 2002. Т. 14, № 10. С. 116–126.
8. Caswell H., Fujiwara M. Beyond Survival Estimation: Mark–Recapture, Matrix Population Models, and Population Dynamics // Animal Biodiversity and Conservation. 2004. No. 27.1. P. 471–488.
9. Keyfitz N., Caswell H. Applied Mathematical Demography. Springer, 2005. P. 558.
10. Свиричев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М. : Наука, 1978. 352 с.
11. Верховцев Е. П. Плодоношение лиственницы сибирской в Восточных Саянах // Лиственница : сб. ст. Красноярск, 1962. Т. XXIX. С. 82–93.
12. Логофет Д. О. Еще раз о проекционных матрицах: индикатор потенциального роста и польза индикации // Фундаментальная и прикладная математика. 2011/2012. Т. 17, № 6. С. 41–63.
13. Логофет Д. О. Свиричевский принцип замещения и матричные модели динамики популяций со сложной структурой // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71, № 1. С. 30–40.
14. Lefkovitch L. P. The Study of Population Growth in Organisms Grouped by Stages // Biometrika. 1965. No. 35. P. 183–212.
15. Авдеева Е. В., Кузмичев В. В. Специфика онтогенеза и индикаторная роль лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb) в условиях городской среды // Хвойные и бореальные зоны XXIV. 2007. № 4–5. С. 362–367.
16. Норин Б. Н. К познанию семенного и вегетативного возобновления древесных пород в лесотундре // Растительность Крайнего Севера СССР и ее освоение : сб. БИН им. В. Л. Комарова. М. ; Л. : АН СССР. 1958. Вып. 3. С. 154–244.
17. Дылис Н. В. Лиственница. М. : Лесная промышленность. 1981. 96 с.
18. Evstigneev O. I., Korotkov V. N. Ontogenetic Stages of Trees: an Overview // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2016. Vol. 1, No. 2. P. 1–31.
19. Зеленьяк А. К., Июзус А. П. Особенности семеношения лиственницы сибирской на клоновой плантации // Успехи современного естествознания. 2013. № 12. С. 18–22.
20. Lyr H., Polster H., Fiedler H.-J. Geholzphysiologie. Jena : VEB Gustav Fisher Verlag, 1967. 422 S.
21. Загреев В. В., Сухих В. И., Шведенко А. З., Гусев Н. Н., Мошкалев А. Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов : справ. М. : Колос. 1992. 495 с.
22. Akçakaya H. R., Burgman M. A., Ginzburg L. R. Applied Population Ecology. Applied Biomathematics. Setauket, New York, 1999. P. 272.
23. Caswell H. Sunderland M. A. Matrix Population Model. Construction, analysis and interpolation. Sinauer Associates, 1989. 328 p.
24. Harary F., Norman R., Cartwright D. Structural Models: An Introduction to the Theory of Directed Graphs. Wiley, New York, 1965.
25. Jose J. M. Matrix Population Model // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и технич. науки. 2005. Т. 10, № 2. С. 164–170.
26. Цибульский В. Р., Арефьев С. П., Коновалов А. А., Говорков Д. А. Идентификация фаз роста деревьев хвойных пород на основе временных рядов древесно-кольцевых хронологий // Вестник кибернетики. 2016. № 4. С. 18–23.
27. Цибульский В. Р., Соловьев И. Г., Говорков Д. А. Особенности определения границ онтогенетических состояний хвойных пород на примере северной тайги Западной Сибири // Человек и Север : материалы всерос. конф., г. Тюмень, 2–6 апреля 2018 г. Тюмень : ФИЦ ТюмНЦ СО РАН. Вып. 4. С. 596–601.

УДК 536.24:681.121

ЗАДАЧА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ОБТЕКАЕМОЙ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ В ОПТИЧЕСКОМ РАСХОДОМЕРЕ ГАЗА И ЖИДКОСТИ

О. Ю. Семенов, А. И. Дёмко

*Сургутский государственный университет,
ous.tutor.phinma@mail.ru*

Рассмотрена задача конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине в оптическом расходомере газа и жидкости. Предложен способ измерения скорости потока по изменению поперечного градиента температуры. Исследована зависимость углового отклонения луча лазера от скорости потока с учетом закономерностей теплообмена при свободной конвекции. Обнаружено, что распределение температуры очень неустойчиво по отношению к скорости течения воздуха в измерительной ячейке. Показана возможность разработки лазерного расходомера для измерения небольших расходов газа. Определены границы применимости предлагаемого метода измерений.

Ключевые слова: теплообмен, конвекция, диагностика, расходомер, лазер, световой луч, газ, эффект Пельтье, жидкость, оптическая неоднородность.

PROBLEM OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER ON STREAMLINED FLAT PLATE IN OPTICAL FLOW METER OF GAS AND LIQUID

O. Yu. Semenov, A. I. Dyomko

*Surgut State University,
ous.tutor.phinma@mail.ru*

The article considers the problem of convective heat transfer on a streamlined flat plate in an optical flowmeter of gas and liquid. A method for measuring the flow velocity by changing the transverse temperature gradient is proposed. The dependence of the angular deviation of the laser beam on the flow velocity is studied taking into account the laws of heat transfer during free convection. The unstable temperature distribution for the air flow rate in the measuring cell is found. The possibility of developing a laser flow meter for measuring small gas flow rates are shown. The applicability limits of the proposed measurement method are determined.

Keywords: heat transfer, convection, diagnostics, flow meter, laser, light beam, gas, Peltier effect, liquid, optical heterogeneity.

На промышленных предприятиях, в сфере жилищно-коммунального хозяйства и научных исследованиях используются расходомеры различных типов: турбинные преобразователи расхода, вихревые преобразователи на сужающих устройствах, ультразвуковые и др. Каждый из рассматриваемых типов расходомеров имеет свои преимущества и недостатки, связанные с возмущением измеряемого потока и погрешностями измерений. В настоящее время актуальной технической задачей является создание высокоточных приборов для измерения концентрации, объемного расхода, скорости газа и жидкости, которая может быть решена путем использования физических процессов, связанных с конвективным теплообменом вблизи обтекаемой поверхности. Трудностью применения процессов теплообмена является выбор оптимальных размеров измерительного модуля, при которых чувствительность прибора остается высокой, а также учет процессов теплопередачи при переходе течения из ламинарного режима в турбулентный.

Задача применения малогабаритных приборов для обнаружения утечек нефти и газа является важной с точки зрения производственного мониторинга и экологической безопас-

ности работы трубопроводов. Авторами работ [1–25] рассматриваются физические методы и приборы индикации паров углеводородов в местах утечек из нефтегазопроводов; в работах исследованы лазерные оптические методы измерения концентрации и температуры нефти и газов. Оптические методы диагностики потоков достаточно развиты для целей определения физических параметров среды. Под оптической диагностикой газовых потоков понимают способ измерения какого-либо одного из параметров, например, скорости или температуры [1–7]. Для обнаружения и измерения неоднородностей в исследуемом течении жидкости или газа применяются оптические методы диагностики: лазерная доплеровская анемометрия, лазерно-локационные, интерференционные, пирометрические и тепловизионные методы, позволяющие определять распределение этого параметра в большом объеме потока. На практике в основном применяются две конструктивные разновидности оптических расходомеров: доплеровские расходомеры, работа которых основана на фиксации разных частот при отражении светового луча движущимися объектами потока, и расходомеры на эффекте Физо – Френеля, в которых измеряется один из параметров, связанный с зависимостью скорости света в движущейся среде от скорости ее движения.

Рассмотрим режимы и параметры течений при теплообмене стенок трубы с газом или жидкостью. Различные значения температуры обусловлены развитием конвективного теплообмена в движущейся среде. Применение зависимости угла отклонения луча лазера в оптической среде от изменения температуры, показателя преломления и плотности среды дает возможность разработать новый тип расходомеров жидкости и газа. Для вычисления параметров различных сред необходимо иметь систему уравнений, описывающую k количественных связей между искомыми термодинамическими параметрами среды, и одно соотношение, связывающее термодинамический параметр с угловым отклонением луча света. В этом случае погрешность метода диагностики будет складываться из погрешностей оптических измерений, математических соотношений, связывающих k термодинамических параметров среды, и погрешностей в реализации ламинарного или турбулентного течения.

Используем задачу конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине при турбулентном и ламинарном видах течения, определяющую связь скорости потока и градиента температуры [8–17]. Задача заключается в определении закона, описывающего зависи-

мости числа Нуссельта $Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$ от числа Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$ в ламинарном или турбулентном

слое при больших значениях числа Прандтля Nu и числа Рейнольдса $Re = \frac{v_0 l_0}{\nu}$, где величи-

ны α , l_0 , λ , a , ν_0 и ν – коэффициент теплоотдачи, длина обтекаемой поверхности плоской пластины, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, скорость потока и коэффициент кинематической вязкости соответственно. Схема, поясняющая решение данной задачи, представлена на рис. 1.

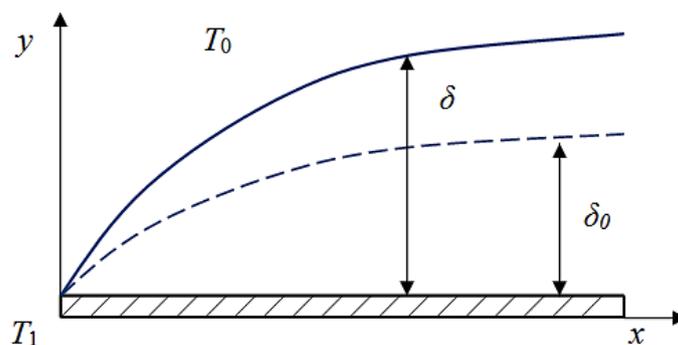


Рис. 1. Схема решения задачи о конвективном теплообмене на плоской поверхности

Для решения данной задачи применим формулу, позволяющую определить толщину пограничного слоя на обтекаемой поверхности пластины δ . При больших числах Прандтля: $a \leq \nu$, толщина теплового пограничного слоя меньше толщины динамического пограничного слоя: $\delta_0 \leq \delta$. При значениях $y = 0 \div \delta_0$ температура меняется в соответствии $T_1 - T_0$. Скорость потока (1) на том же расстоянии испытывает изменение порядка:

$$v = v_0 \frac{\delta_0}{\delta}, \quad (1)$$

При $y = \delta_0$ уравнение теплового пограничного слоя (2) примет вид:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Толщина пограничного слоя (3) на обтекаемой поверхности

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\nu \cdot l_0}{v_0}} = \sqrt{\frac{\nu \cdot l_0^2}{v_0 l_0}} = \frac{l_0}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad (3)$$

порядки величин u и a :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = v_0 \frac{\delta_0}{\delta} \cdot \frac{T_1 - T_0}{l_0}, \quad a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = a \frac{T_1 - T_0}{\delta_0^2}. \quad (4)$$

Сравнивая правые части (4), получим

$$\delta_0^3 = \frac{a \delta l_0}{v_0} = \frac{1}{\text{Pr}} \frac{l^3}{\sqrt{\text{Re}}^3} \quad (5)$$

или

$$\delta_0 \approx \frac{1}{\text{Pr}^{1/3}} \frac{l}{\sqrt{\text{Re}}}. \quad (6)$$

Из выражения (5) следует, что вертикальная составляющая температурного пограничного слоя уменьшается пропорционально обратной величине корня квадратного из числа Рейнольдса. Поток тепла на поверхности пластины равен:

$$\text{Nu} = q \approx \lambda \frac{T_1 - T_0}{\delta_0} = \text{const Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}. \quad (7)$$

Уравнения с величиной δ (5) и (6) определяют прямую связь градиента температуры $\frac{T_1 - T_0}{\delta_0}$ и отклонения лазерного луча в пограничном слое со скоростью потока.

Для создания модели лазерного расходомера важным является расчет его работы в устойчивом режиме, т. к. изменение работы расходомера влечет за собой изменение теплопередачи. При смене режима течения коэффициент теплоотдачи изменяется ступенчато, что обусловлено перестройкой структуры течения [8]. Ламинарный слой становится турбулентным, вследствие чего изменяются толщина пограничного слоя и распределение температуры в этом слое. Если ширина трубы для измерений небольшого диаметра, то тепловой погра-

ничный слой будет сравним с ее поперечными размерами, а градиент температуры будет увеличиваться с увеличением скорости потока газа или жидкости (7).

В ходе работы были решены следующие экспериментальные задачи: разработка методики создания ламинарного течения в измерительной ячейке путем введения в нее струи воздуха от источника, находящегося на различных расстояниях от входной части ячейки; измерение скорости входного потока с помощью стандартного расходомера; опытное исследование влияния определяющих параметров установки от зависимости угла отклонения луча; разработка метода использования модулей Пельтье для проверки зависимости градиента температуры от условий конвективного теплообмена.

В работе использовалась измерительная ячейка расходомера, учитывались ее параметры, а также модули Пельтье. Датчик на основе модулей Пельтье выполняет две функции: первая из них заключается в контроле изменения градиента температур при конвективном теплообмене, вторая – в проверке возможности увеличения напряжения между поверхностями модулей при изменении градиента температур в потоке. В отличие от углового отклонения лазерного луча модули Пельтье обладают большей инерционностью и малой чувствительностью по отношению к колебаниям скорости и температуры в потоке газа. Работа измерительной ячейки определяется ее геометрическими размерами, разностью температур между нагреваемой и охлаждаемой поверхностью пластин, расстоянием между выходной частью ячейки и экраном, а также скоростью потока воздуха в пространстве между поверхностями ячейки.

Эксперименты проводили в два этапа: первый заключался в определении необходимых параметров установки для проведения измерений скорости потока; второй – в непосредственном измерении скорости воздуха, продуваемого через измерительную ячейку. Для решения вопроса с фактором неопределенности характера течения в измерительном канале-трубе была поставлена задача конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине при малых числах Рейнольдса, т. е. необходимо было определить предельный закон зависимости числа Нуссельта от числа Прандтля, равного единице при небольших числах Рейнольдса при ламинарном пограничном слое в измеряемом объеме.

Измерения коэффициента теплоотдачи производят с помощью закона Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha(T_0 - T), \quad (8)$$

где q – тепловой поток на переходе «твердое тело – среда – газ или жидкость», α – коэффициент теплоотдачи, T_0 и T – температуры поверхности тела и среды.

Коэффициент теплоотдачи также равен:

$$q = c_p \rho v_0 (T_0 - T). \quad (9)$$

Тепловые потоки вычисляются на основании закона Фурье:

$$q = \chi \frac{dT}{dx}, \quad (10)$$

где χ – коэффициент теплопроводности.

Приравняв выражения (8) и (9) для тепловых потоков, получим

$$\alpha \approx c_p \rho v_0. \quad (11)$$

Полученное соотношение (11) определяет возможность проведения измерений коэффициента теплоотдачи, так как очевидна прямая связь между скоростью потока в измерительной ячейке и коэффициентом теплоотдачи с учетом тепловых потоков (10).

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для лазерного измерения скорости потока.

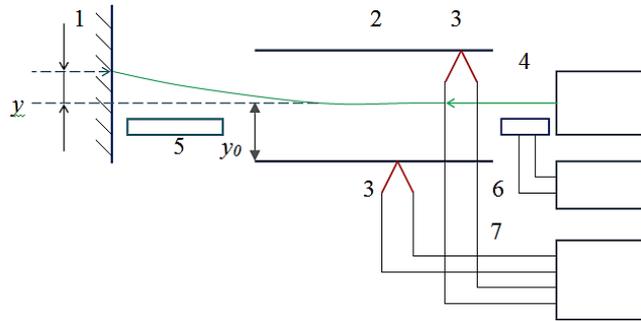


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для лазерного измерения скорости потока:
 1 – измерительный экран; 2 – измерительная ячейка; 3 – термопары;
 4 – лазер; 5 – компрессор; 6 – термоанемометр; 7 – источник питания термопар

Экспериментальная установка состоит из измерительного экрана, находящегося на расстоянии 3 м от измерительной ячейки (большое расстояние обеспечивало большее отклонение луча и, соответственно, меньшую погрешность измерения углового отклонения); измерительной ячейки (была собрана из прямоугольного канала-трубы с подогреваемой снизу стенкой); термопары (установлена на внутренних поверхностях стенок трубы-канала); оптического лазера; эталонного измерителя скорости потока – модуля Пельтье или термоанемометра; источника э.д.с. для питания термопар; компрессора, создающего проток воздуха в измерительной ячейке.

Нижняя сторона измерительной ячейки и луч оптического лазера устанавливались параллельно нижней стенке изучаемого канала-трубы. В экспериментах использовались перемещения лазерного луча в перпендикулярном направлении к нижней стороне канала-трубы, что позволяло измерять градиент температуры в различных сечениях трубы. Температуру нижней стенки в измеряемом канале регулировали с помощью изменения подаваемого напряжения на нагревателе. Отклонение луча лазера в сторону холодных слоев воздуха фиксировали с помощью миллиметровой измерительной шкалы.

Измерительная ячейка представляла собой прямоугольную трубу длиной 1,320 м. Поперечное сечение трубы равно $0,014 \times 0,038$ м. Размеры измерительной ячейки были равны $\sqrt{0,014 \cdot 0,0275} \approx 0,02$ м, а вязкость воздуха принята равной $4 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда критическое число Рейнольдса $Re = 2\ 400$ будет достигаться при скорости, равной 0,28 м/с.

Модули Пельтье состояли из трех прижатых друг к другу пластин. Схема их соединения показана на рис. 3. Верхняя поверхность модуля с меньшей температурой T_1 располагалась со стороны охлаждаемой стенки измерительной ячейки, а поверхность модуля с большей температурой T_2 располагалась со стороны нагреваемой стенки. При таком соединении и расположении модулей в потоке достигали наибольшей разницы температур на крайних поверхностях модулей и наибольшей разности потенциалов на среднем модуле, что позволяло увеличить чувствительность теплового датчика.

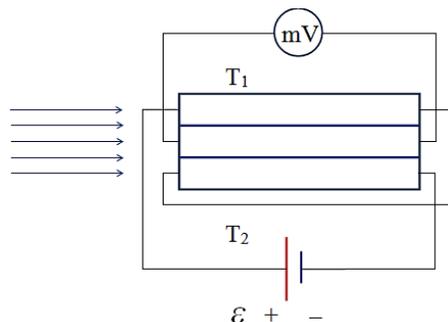


Рис. 3. Схема подключения модулей Пельтье в потоке воздуха

Характер течения на поверхностях с температурами T_1 и T_2 определяет скорость изменения температуры и позволяет вычислить распределение градиентов температур в поперечном сечении измерительной ячейки. Непрерывное распределение градиента температуры невозможно при турбулентном перемешивании воздуха в измерительной ячейке. В этом случае необходимо использовать среднюю по размерам трубы величину градиента температуры. Величина э.д.с. ε , снимаемая с поверхностей центрального модуля Пельтье, пропорциональна разности температур $(T_2 - T_1)$ и толщине пакета d , состоящего из трех модулей Пельтье. Методическая погрешность измерения (12) среднего по сечению значения э.д.с. будет пропорциональна толщине пакета из трех модулей Пельтье:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2} + \frac{\Delta d}{d}. \quad (12)$$

С целью выяснения роли определяющих физических параметров установки эксперименты проводили при различной температуре нагрева нижней поверхности измерительной ячейки, скорости продувки воздуха и различном расположении линии прохождения луча лазера. Для уменьшения погрешностей измерений градиент скорости измеряли двумя способами: первый способ – косвенный – основан на измерении угловых отклонений луча, а второй – на использовании метода модулей Пельтье. Рабочим режимом в экспериментах являлось стационарное распределение температур и скоростей в измерительной ячейке, которое в силу инертности измерительной системы достигается по истечении определенного времени.

На рис. 4 представлены результаты измерения угловых отклонений луча лазера при различной температуре нижней стенки трубы в период ее нагревания и охлаждения.

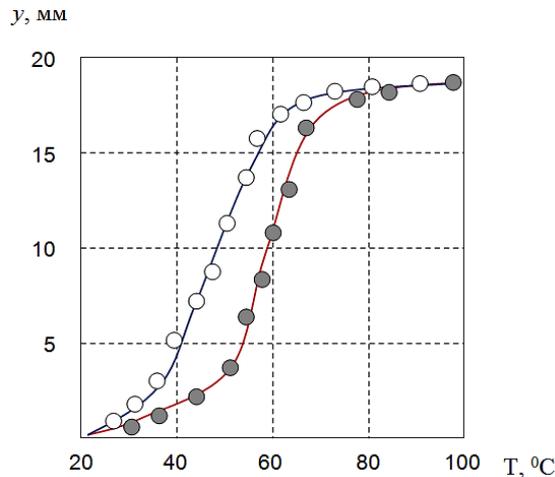


Рис. 4. Зависимость угловых отклонений луча лазера от температуры нижней стенки при ее нагревании и охлаждении:
 ● – период нагревания трубы; ○ – период охлаждения трубы

Вертикальная координата линии распространения луча равнялась нулю: $y_0 = 0$. Обратный ход отмечен тёмными точками. Обнаружена гистерезисная зависимость, типичная для процессов теплообмена, связанных с накоплением тепла в системе и сохранением термодинамической устойчивости. В процессе динамического равновесия температура воздуха в определенной точке измерительной ячейки претерпевает периодические изменения, и наличие гистерезиса является одним из факторов, уменьшающих погрешность измерений, когда температура поверхности стенки нестабильна.

Результаты измерений углового отклонения луча лазера представлены на рис. 5, из графиков видно, что угловое отклонение в вертикальном направлении изменяется нелинейно. Поскольку угловое отклонение определяется градиентом температуры, то важной представляется зависимость градиента температуры от координаты:

$$T = T(y_0). \quad (13)$$

В уравнении $y = \frac{l}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}$ величины n_0 и n – показатели преломления воздуха в воздухе и измерительной ячейке, l – расстояние от выходной части измерительной ячейки до экрана. Зависимость показателя преломления воздуха от температуры определяется формулой:

$$\Delta n = \frac{(1 - n_0)\Delta T}{T}. \quad (14)$$

В формуле (14) изменение показателя преломления равно $\Delta n = (n - n_0)$, и изменение температуры соответствует значению $\Delta T = (T - T_0)$ в текущей точке с координатой z_0 .

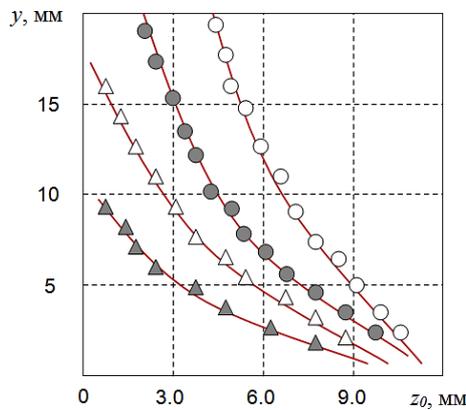


Рис. 5. Графики зависимости углового отклонения луча лазера от расстояния линии распространения луча до нижней стенки измерительной ячейки:
 ○ – 100 °C; ● – 90 °C; △ – 80 °C; ▲ – 50 °C

Результаты вычислений с учетом выражений (13) и (14) представлены на рис. 6. Из графиков видно, что градиент температуры незначительно изменяется в зависимости от положения линии распространения луча света.

Постоянство градиента температуры при постоянной координате z_0 позволяет использовать методику измерения углового отклонения луча лазера для диагностики распределения параметров в стратифицированной среде.

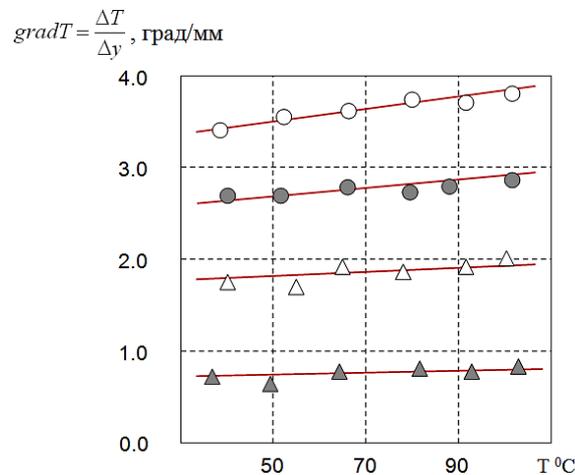


Рис. 6. Зависимости градиента температуры от температуры нижней стенки измерительной ячейки при различных расстояниях от линии распространения луча света до нижней стенки прямоугольной трубы:
 ○ – $z_0 = 3,0$ мм; ● – $z_0 = 6,0$ мм; △ – $z_0 = 9,0$ мм; ▲ – $z_0 = 12,0$ мм.

В задаче измерения скорости потока зависимость углового отклонения от скорости определяется экспериментально как интегральная характеристика, поэтому не вносит дополнительных погрешностей измерений. Погрешность измерений угловых отклонений луча связана с неустойчивостью теплового пограничного слоя и определяется градиентом температуры между верхней и нижней пластинами измерительной ячейки. Изменение статического равновесия воздуха в трубе приводит к конвективному перемешиванию воздуха в трубе и колебаниям углового отклонения луча света.

Средний градиент температуры изменяется в зависимости от вертикальной координаты положения луча лазера в измерительной ячейке по закону:

$$(\text{grad}T)_{cp} = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} (\text{grad}T) dz, \quad (15)$$

где z_1 и z_2 – координаты нижней стенки трубы и луча лазера.

Результаты измерения разности потенциалов на поверхности центрального модуля Пельтье при различной скорости потока представлены на рис. 7. Из графика видно, что зависимость разности потенциалов от скорости потока нелинейная. В отличие от метода измерения скорости по угловому отклонению луча лазера в области малых скоростей, разность потенциалов увеличивается незначительно.

Точность измерения увеличивается при скоростях потока, превышающих 1 м/с. При больших скоростях потока, превышающих 8÷10 м/с, относительная погрешность измерений не превышает 2 %.

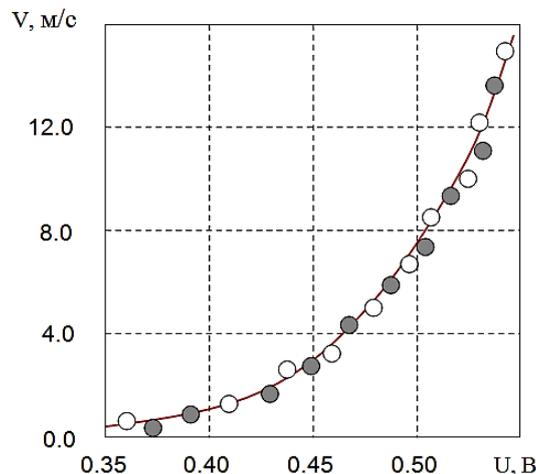


Рис. 7. Связь скорости потока и разности потенциалов на поверхностях модулей Пельтье:
○ – данные, полученные при нагревании нижней поверхности; ● – при охлаждении поверхности

Инерционность метода модулей Пельтье обусловлена большей по сравнению с воздухом теплоемкостью материала, из которого изготовлены модули. Физическая идея метода измерения скорости потока заключается в использовании зависимости интенсивности теплоотдачи от нагретой поверхности от скорости потока. Результаты измерений представлены графиками зависимости скорости потока от градиента температуры между нагреваемой и охлаждаемой поверхностями измерительной ячейки (рис. 7).

Полученная зависимость характеризуется высокой повторяемостью в опытах, когда течение в трубе отсутствует или скорость течения очень мала ($Re \approx 0$). Появление незначительной скорости потока в трубе приводит не к уменьшению, а к увеличению углового отклонения. Это может быть объяснено только увеличением градиента температуры. Увеличение градиента температуры в слое воздуха шириной, равной ширине луча лазера, может произойти из-за

усреднения максимального значения вблизи нижней стенки трубы и минимального значения вблизи верхней стенки трубы. Усреднение градиента температуры (15) и увеличение амплитуды колебаний углового отклонения луча обусловлены гидродинамической неустойчивостью нагретого слоя. Она определяется минимальным значением числа Рэлея [8]:

$$Ra = \frac{g\beta \cdot h^3 (T_2 - T_1)}{\nu \cdot a} \cong 657,5. \quad (16)$$

В выражении (16) g – ускорение свободного падения, h – расстояние между нагреваемой и охлаждаемой стенками трубы, β – температурный коэффициент расширения воздуха, T_2 и T_1 – температуры нижней и верхней стенок трубы, ν и a – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности воздуха. Вычислим минимальное число Рэлея, соответствующее геометрическим параметрам измерительной ячейки. Примем $h = 0,16 \cdot 10^{-3}$ м, $\beta = 3,4 \cdot 10^{-3}$, $T_2 = 100$ °С, $T_1 = 30$ °С, $\nu = 23,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a = 33,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда из (14) следует, что для условий экспериментов $Ra \cong 0,02$.

Действительно, при отсутствии течения в измерительной ячейке слой воздуха устойчив в гидродинамическом отношении. Оценим минимальные значения скоростей, при которых нарушается устойчивость слоя. Они будут определять границы применимости метода.

Наличие свободного и вынужденного конвективного движения существенно изменяет процесс теплообмена. Сложный характер теплообмена в переходной области затрудняет количественное описание процесса теплообмена. Обобщенные методики расчета в переходной области представлены в литературе недостаточно, поэтому используется приближенная оценка наибольшего и наименьшего коэффициентов теплообмена, которая может быть произведена по формуле турбулентного и вязкостного теплообмена:

$$Nu = 0,017 Re^{0,8} Pr^{0,4} (d_2 / d_1)^{0,18}. \quad (17)$$

Здесь $Pr \approx 1$ – отношение коэффициента вязкости к коэффициенту температуропроводности воздуха при данной температуре, $(d_2 / d_1) = 2,7$ – отношение размеров трубы в поперечном сечении.

Согласно [8–10], наибольшее значение коэффициента теплоотдачи при переходном режиме в условиях свободной конвекции описывается уравнением

$$Nu = 1,18 Ra^{1/8}. \quad (18)$$

Подставляя в (18) критическое число Рэлея $Ra \cong 657,5$, получим $Nu = 2,66$. Используя полученное значение числа Нуссельта и формулу для коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции (17), получим диапазон допустимых чисел Рейнольдса: $Re < 400$. Этому диапазону чисел Рейнольдса соответствует интервал допустимых абсолютных значений скорости потока: $v < 0,6$ м/с.

Областью применения предлагаемого расходомера является измерение скоростей потока и коэффициентов теплоотдачи на поверхностях тел при свободной конвекции. Сравним слагаемые в уравнении свободной конвекции, описывающие ускорение потока под действием инерционных сил $\nu \frac{\partial v}{\partial z}$ и сил Архимеда g для выражения (19). Заменим производную скорости по координате конечным отношением характерных величин скорости и геометрических размеров $\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{v}{d}$ и получим:

$$v = \sqrt{gd}. \quad (19)$$

Подставляя в полученное выражение средний размер поперечного сечения $d = \frac{d_1 + d_2}{2} = 2,5$, получим $v \cong 0,4 \div 0,5$ м/с.

Полученное значение скорости соответствует оценкам, сделанным на основании законов теплообмена, и экспериментальным результатам. Уменьшение поперечного сечения измерительной ячейки для увеличения порога неустойчивости теплового пограничного слоя, как следует из результатов эксперимента, не приводит к желаемому результату. Уменьшение скорости потока незначительно уменьшает амплитуду колебаний, а уменьшение вертикального размера измерительной ячейки приводит к тому, что луч лазера, отклоняясь, попадает на верхнюю стенку трубы. Уменьшение длины трубы вызывает уменьшение чувствительности исследуемого метода.

Решение проблемы видится в реализации нескольких подходов. Первый из них заключается в реализации многократного прохождения луча в измерительной ячейке. Это возможно осуществить, если на входной и выходной частях измерительной ячейки установить отражающие зеркала и диафрагму, уменьшающую диаметр луча лазера. Чувствительность прибора увеличится в N раз, где N – число отражений лазерного луча. При этом длина ячейки может быть уменьшена в N раз. Изменения конструкции потребуют значительной точности в изготовлении узлов и юстировке прибора.

Другим способом расширения диапазона измерений может являться применение шунта – параллельного участка трубы с измерительной ячейкой. Поперечное сечение шунтирующего участка трубы должно быть больше поперечного сечения измерительной ячейки. Отношение площадей поперечного сечения измерительной ячейки и шунтирующего участка трубы определяет увеличение диапазона измерений скорости потока.

Способом измерения скорости по угловому отклонению луча является изолирование участка трубы измерительной ячейки от измеряемого потока, т. е. нагреваемая стенка должна быть теплоизолированной от внешнего потока. Охлаждаемая стенка должна быть изготовлена из материала с большим коэффициентом теплопроводности, и ее толщина должна быть небольшой. Воздух или жидкость внутри изолированной измерительной ячейки остаются неподвижными.

Градиент температуры между двумя стенками трубы будет определяться лишь скоростью конвективного теплообмена охлаждаемой стенки во внешнем потоке и скоростью теплообмена, определяемой теплопроводностью рабочего тела (газа или жидкости) внутри измерительной ячейки. В этом случае связь скорости потока с градиентом температуры (угловым отклонением луча света) можно найти, приравняв выражение: $Nu = const(\chi \cdot gradT)$ и (17):

$$const(\chi \cdot gradT) = 0,017 Re^{0,8} Pr^{0,4} (d_2 / d_1)^{0,18}. \quad (20)$$

Тогда искомая скорость потока будет определяться выражением:

$$Re = \left(\frac{const(\chi \cdot gradT)}{0,017 Pr^{0,4} (d_2 / d_1)^{0,18}} \right)^{\frac{5}{4}}. \quad (21)$$

В выражении (21) неизвестная константа определяется из результатов экспериментов, учитывая связь скорости потока с угловым отклонением лазерного луча (20). Очевидно, что практическая реализация этой идеи требует дополнительных исследований и значительных материальных затрат, связанных с точностью изготовления рабочего макета прибора.

Следует отметить также, что изолирование внутренней части измерительной ячейки от внешнего течения позволит сделать его прибором погружного действия. Это означает, что его можно будет помещать непосредственно в измеряемый поток. Совместно с реализацией многократного прохождения луча в измерительной ячейке такой прибор будет отличаться высокой стабильностью показаний и его работа будет мало влиять на скорость потока.

Метод использования модулей Пельтье, по существу, является повторением предыдущего метода. Разница лишь в способе измерения градиента температур между нагреваемой и охлаждаемой стенками измерительной ячейки. Очевидно, что формула (21) также определяет эффективность работы пакета из трех модулей Пельтье. В этом случае градиент температуры вычисляется по разности температур на поверхностях модулей, обтекаемых потоком.

В работе рассматривается задача конвективного теплообмена в оптическом расходомере газа и жидкости, получены экспериментальные результаты измерения скорости потока по угловому отклонению лазерного луча и разности потенциалов в модулях Пельтье. Определена область применения лазерного расходомера, исследован диапазон измерений скорости потока, равный $0,5 \div 0,6$ м/с. Измерение больших по величине скоростей потока ограничивается явлениями неустойчивости теплового динамического пограничного слоя и переходом от ламинарного течения к турбулентному. Показана возможность создания лазерного расходомера.

Работа выполнена в рамках проекта в области фундаментальных и прикладных исследований «Комплект приборов для экологического мониторинга и нефтегазового комплекса» при поддержке Департамента образования и молодежной политики (приказ от 25.08.2017 № 1281) Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и Сургутского государственного университета.

Литература

1. Бердников В. С., Гришков В. А., Марков В. А., Пшеничников Ю. М. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в подогреваемых снизу горизонтальных слоях жидкости // Сб. тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск : Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2004. С. 1–19.
2. Ганиев М. И., Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Исследование распределения концентрации газа в трубах в сборнике // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сб. науч. ст. по итогам 4-й Международ. науч. конф. Казань, 2019. С. 214–218.
3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : справ. Кн. 2 / под общ. ред. Е. А. Шорникова ; 5-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2004. 412 с.
4. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and Gas Optical Flowmeter Model Development // AIP Conference Proceedings 2141, 050010. 2019. DOI 10.1063/1.5122153.
5. Liu C., Wang Ya., Li Y., Xu M. Experimental Study On New Leak Location Methods for Natural Gas Pipelines Based on Dynamic Pressure Waves // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. No. 54. P. 83–91. DOI 10.1016/j.jngse.2018.03.023.
6. Tu C., Zhang J. Nanoparticle-laden Gas Flow Around a Circular Cylinder at High Reynolds Number // Int J Nume Methods Heat Fluid Flow. 2014. No. 24. P. 1782–1794.
7. Семенов О. Ю., Дёмко А. И. Разработка модели оптического расходомера жидкости и газа // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 9-й междунар. науч.-технич. конф. (Омск, 26 февраля – 28 февраля 2019 г.). Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 207–208.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: гидродинамика. Т. 6 ; изд. 6-е, испр. 2017. 736 с.
9. Cengel D., Yunus A., Michael A. Boles. Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition. McGraw-Hill Education, 2014. 1024 p.
10. Попов И. А. Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена : моногр. ; под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. Казань : Центр инновационных технологий, 2007. 326 с.
11. Guiatni M., Benallegue A., Kheddar A. Thermal Display for Telepresence Based on Neural Identification and Heat Flux Control // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. MIT Press, 2009. No. 18 (2). P. 156–169.

12. Бегак О. Ю., Конопелько Л. А., Окрепилов М. В. Экологические проблемы нефтедобычи // Экологические системы и приборы. 2012. № 2. С. 32–36.
13. Papadopoulos P. K., Vouros A. P. Pulsating Turbulent Pipe Flow in the Current Dominated Regime at High and Very-High Frequencies // Int J Heat Fluid Flow. Vol. 58. 2016. P. 54–67.
14. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. М. : Наука, 2006. 352 с.
15. Рахимов Н. Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве : моногр. Фергана : Техника, 2004. 91 с.
16. Wang M., Zeng J. Convective Heat Transfer of the Different Texture on the Circumferential Surface of Coupling Movement (Rotating Speed Coupling with Air Velocity) Disk // Int Conf on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). 22–24 Lushan, China, 2011. P. 1128–1132.
17. Березовский Е. В., Акчурин А. Д. Исследование влияния газа, содержащегося в нефти на показания преобразователей объемного расхода нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 4. С. 43–45.
18. Дёмко А. И., Семенов О. Ю., Дёмко И. А. Плотномер. Пат. 2018140979 Рос. Федерация, RU 191611 U1 МПК G01N 9/12 (2006.01) СПК G01N 9/12 (2019.02) G01F 23/62 (2019.02). Патентообладатель БУ ВО «Сургутский государственный университет». № 2018140979; заявл. 21.11.2018; опубл. 14.08.2019. Бюл. № 23. 8 с.
19. Bannwart A. C., Rodriguez O. M. H., Trevisan F. E., Vieira F. F. Experimental Investigation on Liquid – Liquid – Gas Flow: Flow Patterns and Pressure-Gradient // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2009. A. 65. P. 1–13.
20. Castillo E. E., Napenciuc C. L., Borca-Tasciuc T. Thermoelectric Characterization by Transient Harman Method under Nonideal Contact and Boundary Conditions // Rev Sc Instrum. 2010. Vol. 81. P. 1–10.
21. Тоски Э., Хансен Б. В., Смит Д., Теувени Б. Эволюция измерений многофазных потоков и их влияние на управление эксплуатацией // Нефтегазовое обозрение. 2003. С. 69–77.
22. Damean N., Regtien P. P. L. Poiseuille Number for the Fully Developed Laminar Flow Through Hexagonal Ducts Etched in (100) Silicon // Sens Actuators. 2001. A. 90. P. 96–101.
23. Goupil C. Continuum Theory of Thermoelectric Elements. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2016. 363 p.
24. Вакулин А. А., Аксенов Б. Г., Тамосов А. В., Вакулин А. А. Измерение расхода многофазного потока дисперсной структуры // Вестник ТюмГУ. 2012. № 4. С. 42–46.
25. Goldsmid H. J. Introduction to Thermoelectricity. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2010. 250 p.

УДК 622.244.49

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАСТВОРА ASP ПРИ ДОБЫЧЕ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ МЕТОДОМ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КАПЛИ

А. Г. Заводовский

*Сургутский государственный университет,
averin117@mail.ru*

Инновационный метод ASP можно использовать для увеличения нефтеотдачи. Предлагается методика для оптимизации состава раствора ASP на основе метода вращающейся капли. С ее помощью определяется зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – раствор ASP от концентрации компонентов раствора и температуры. Получены составы растворов для добычи тяжелой нефти.

Ключевые слова: коэффициент поверхностного натяжения, раствор ASP, нефть, ПАВ, полимер, щелочь, метод вращающейся капли.

ESTIMATION OF IDEAL COMPOSITION OF ASP SOLUTION DURING PRODUCTION OF HEAVY OIL BY ROTATING DROP METHOD

A. G. Zavadovskiy

*Surgut State University,
averin117@mail.ru*

The innovative ASP method can be used to enhance oil recovery. A technique is proposed to refine the ASP solution based on the rotating drop method. The method is used to determine the dependence of the surface tension coefficient at the oil-ASP interface on the solution component concentration and temperature. The compositions of solutions for heavy oil extraction were obtained.

Keywords: surface tension coefficient, ASP solution, oil, surfactant, polymer, alkali, rotating drop method.

Введение. Одним из перспективных инновационных способов повышения нефтеотдачи в настоящее время является метод ASP, в котором для закачки в нефтяной пласт используется водный раствор ПАВ, щелочи и полимера. Этот метод комбинированного воздействия позволяет извлекать из пласта нефть, остающуюся там после использования традиционных методов нефтедобычи. Каждый из компонентов раствора выполняет при этом свою определенную роль [1]. ПАВ уменьшает поверхностное натяжение на границе вода – нефть и способствует преодолению капиллярных сил, действующих в порах коллектора, что позволяет нефти проникать в призабойную зону. Однако для осуществления данного процесса необходимо использовать большое количество поверхностно-активных веществ, что экономически является затратным. Для уменьшения затрат дополнительно применяется закачка в пласт щелочи, которая при взаимодействии с нефтью образует так называемое «нефтяное мыло», обладающее свойствами ПАВ. В результате также уменьшается степень адсорбирования ПАВ породой. Образовавшаяся нефтяная эмульсия эффективно выталкивается из коллектора при использовании полимера.

Эффективность действия технологии ASP была подтверждена при добыче трудноизвлекаемой нефти на некоторых месторождениях в США, Омане, Китае, а также в России на Западно-Салымском месторождении. В ходе осуществления данной технологии добыча нефти была увеличена на 10–15 %.

Опыт показывает, что состав смеси ASP и содержание ее компонент зависят от свойств добываемой нефти, в частности от ее плотности. Поэтому большое значение имеет методика определения оптимального состава смеси. Она должна быть достаточно простой, а время проведения исследований – небольшим. В настоящей работе предлагается методика, в которой

в качестве основного параметра, определяющего состав раствора и содержание компонент, используется коэффициент поверхностного натяжения на границе нефть – раствор исследуемых веществ. С помощью минимизации его значения и подбиралось оптимальное содержание компонент. Опытные исследования проводятся в лабораторных условиях с помощью различных физических методов. Эти методы должны определять коэффициент поверхностного натяжения на границе жидкость – жидкость и иметь хорошую чувствительность. Одним из них является метод вращающейся капли [2]. В последнее время этот метод стал использоваться для оптимизации состава и содержания раствора ASP, а также проведения температурных исследований. В работе [3] подробно описаны экспериментальная установка и методика проведения исследований.

Каждый раз перед проведением экспериментов на установке проводились калибровочные измерения коэффициента поверхностного натяжения на границе жидкость – жидкость и жидкость – газ, где в качестве объектов исследования использовались спирт, вода, нефть, воздух. Полученные результаты сравнивались с табличными данными. Эксперименты проводились при комнатной температуре, а также исследовалась температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения. Целью этой предварительной работы было подтверждение правильности работы установки и определение погрешности измерений.

Результаты комбинированного воздействия зависят от свойств нефтяного пласта. Поэтому для каждого месторождения необходимо подбирать состав и оптимальное содержание компонент закачиваемой смеси. В работе [3] такая процедура была проведена для нефти с Восточно-Елового месторождения НГДУ «Сургутнефть» с плотностью 870 кг/м^3 .

Экспериментальные данные и их анализ. Были выполнены исследования по оптимизации двух видов ранее используемых растворов ASP [3] при добыче тяжелой нефти Восточного месторождения с плотностью 913 кг/м^3 . Образец нефти представлен лабораторией «СургутНИПИнефть». Используемые в работе ПАВ и полимеры рекомендованы кафедрой химии СурГУ. По результатам экспериментов требовалось определить эффективность созданных растворов ASP при использовании с данной нефтью. Раствор А содержал ПАВ ТВИН-80, кальцинированную соду и полимер ПВА, раствор В – ПАВ ЦТМАБ, кальцинированную соду и полимер ОАПП.

Работы по оптимизации содержания компонент раствора можно разделить на четыре этапа. На первом исследуется зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор ПАВ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. При изменении содержания ПАВ в растворе определяется минимальное значение поверхностного натяжения на границе с нефтью.

Опытные результаты обработаны с помощью программы Origin7 и представлены на рис. 1, 2.

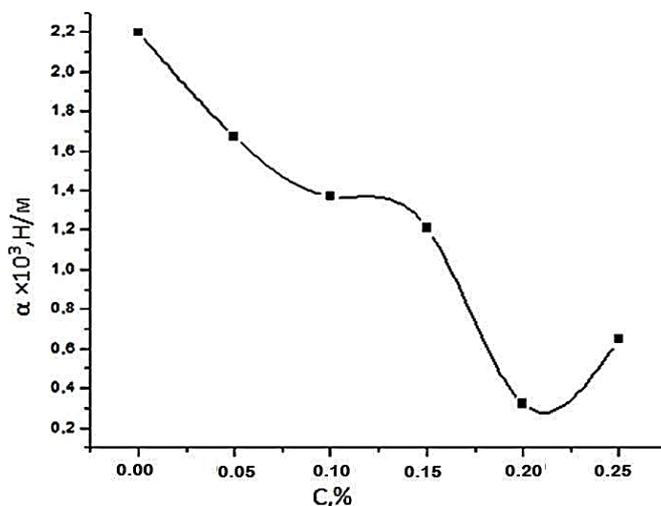


Рис. 1. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор ПАВ ТВИН 80 от концентрации ПАВ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$

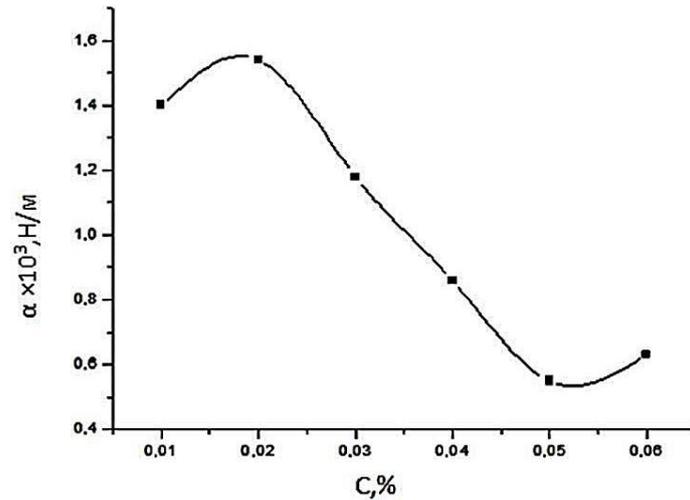


Рис. 2. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор ПАВ ЦТМАБ от концентрации ПАВ при температуре 20 °С

Анализ этих результатов позволяет определить содержание ПАВ при минимальном значении коэффициента поверхностного натяжения. В растворе А оптимальная концентрация ПАВ ТВИН-80 для данных условий составляет 0,2 %, а в растворе В концентрация ПАВ ЦТМАБ – 0,05 %. При дальнейшем увеличении содержания ПАВ коэффициент поверхностного натяжения возрастает. Это связано с тем, что происходит изменение структуры мицелл, образующихся в растворе. С увеличением концентрации ПАВ начинают образовываться более сложные структуры, которые существенно изменяют коэффициент поверхностного натяжения.

На втором этапе в водный раствор ПАВ при концентрации ПАВ, определяющей минимальное значение поверхностного натяжения, добавляется кальцинированная сода и оптимизируется ее содержание путем получения наименьшего значения коэффициента поверхностного натяжения. Экспериментальные результаты показаны на рис. 3 и 4.

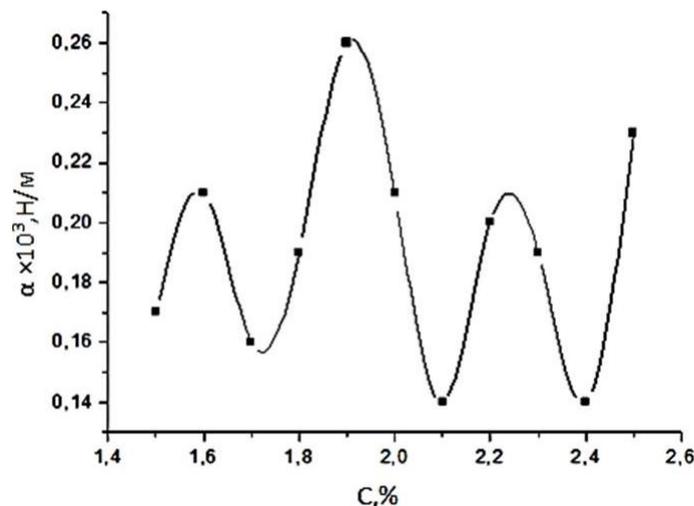


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор А (ПАВ ТВИН-80 и сода, концентрация ПАВ – 0,2 %) от содержания соды

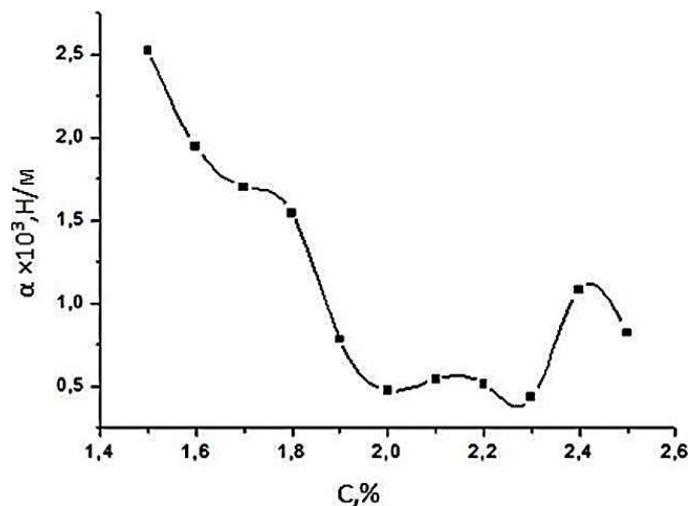


Рис. 4. Зависимость поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор В (ПАВ ЦТМАБ и сода, концентрация ПАВ – 0,05 %) от содержания соды

Исследуя полученные зависимости, можно определить оптимальное содержание соды в данных растворах. Оптимальная для данных условий концентрация соды в растворе А составляет 2,1 %, а в растворе В – 2,3 %. Резкие изменения коэффициента поверхностного натяжения, наблюдаемые при увеличении содержания соды, связаны со структурными изменениями в строении мицелл, образующихся в растворе. Исходя из экономической эффективности нефтедобычи, выбираются малые значения концентрации используемых компонент.

На третьем этапе работы в водный раствор ПАВ и соды при концентрации ПАВ, определяющей минимальное значение поверхностного натяжения, добавляется полимер и оптимизируется его содержание путем получения наименьшего значения коэффициента поверхностного натяжения.

Опытные данные для системы нефть – водный раствор ASP для двух видов раствора при температуре 20 °С представлены на рис. 5, 6.

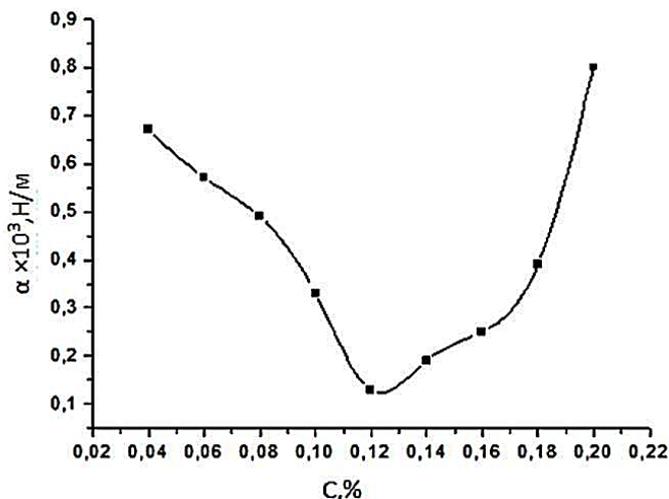


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения на границе нефть – раствор ASP от содержания полимера (раствор А)

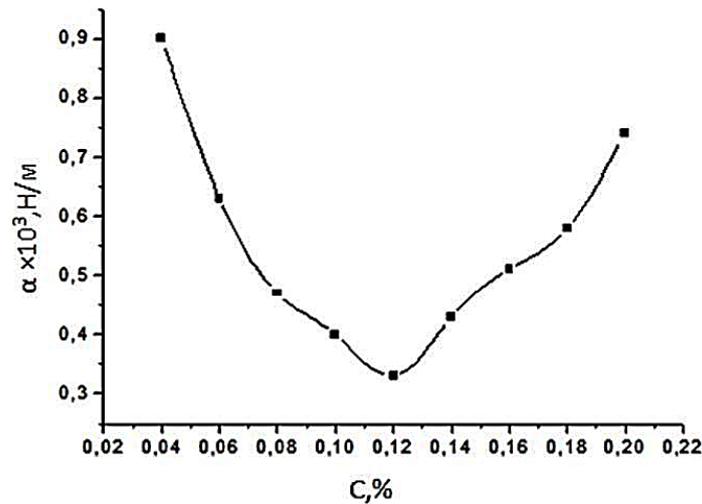


Рис. 6. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – раствор ASP от содержания полимера (раствор В)

В результате выполнения третьего этапа были получены оптимальные значения концентраций компонент для растворов ASP (А и В). Раствор А содержит ПАВ ТВИН-80 – 0,2 %, сода – 2,1 %, полимер ПВА – 0,12 %. Раствор В – ПАВ ЦТМАБ – 0,05 %, сода – 2,3 %, полимер ОАПП – 0,12 %.

На четвертом этапе были выполнены температурные исследования полученных растворов ASP.

Экспериментальные данные представлены на рис. 7, 8.

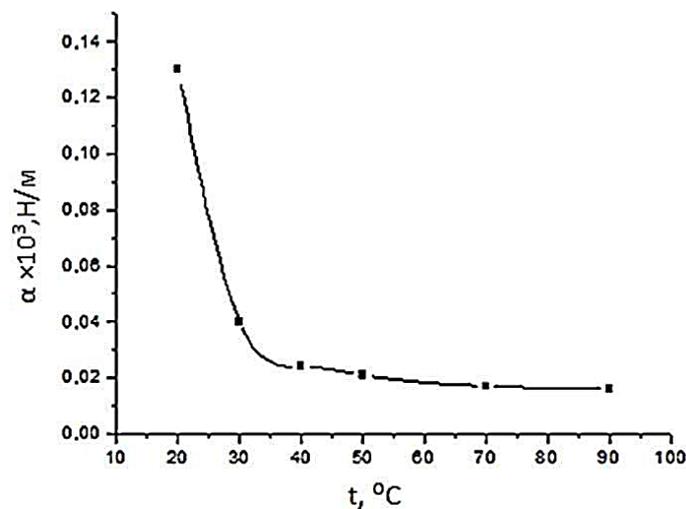


Рис. 7. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор ASP от температуры (раствор А)

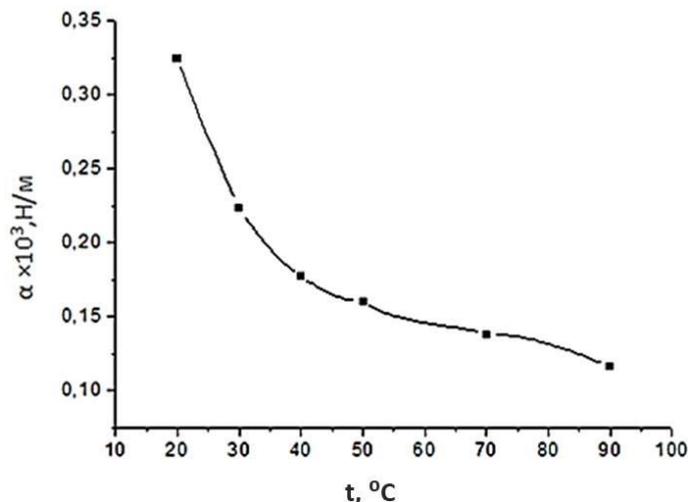


Рис. 8. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – водный раствор ASP от температуры (раствор В)

Закключение. Анализ данных показывает, что при увеличении температуры поверхностное натяжение на границе нефть – раствор ASP уменьшается, достигая малой величины при температуре 90 °С. Технология ASP позволяет получить состав и содержание используемых растворов для эффективной добычи трудноизвлекаемых нефтей. Результаты комбинированного воздействия зависят от свойств нефти, поэтому для каждого месторождения необходимо экспериментально подбирать состав и содержание компонент раствора ASP.

Литература

1. Газизов А. А., Газизов А. Ш., Кабилов М. М., Ханнанов Р. Г. Интенсификация добычи нефти в осложненных условиях. Казань : Центр инновационных технологий, 2008. 303 с.
2. Vonnegut B. Rotating Bubble Method for the Determination of Surface and Interfacial Tensions. // Research and Development Laboratories, Hartford-Empire Company. Hartford, Connecticut, 1942. Vol. 13. P. 6–9.
3. Заводовский А. Г., Сысоев С. М. Определение коэффициента поверхностного натяжения на границе нефть – раствор ASP // Вестник кибернетики. 2017. № 2. С. 80–86.

КОМАНДНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛИЧНЫМ КОМПЛЕКСОМ

М. Я. Брагинский, Д. В. Тараканов
*Сургутский государственный университет,
mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru*

Описано содержание проекта по созданию действующего макета автоматизированной системы управления тепличным комплексом, состоящей из контроллера, облачного сервера и удаленного клиента, обеспечивающей сбор данных о состоянии выращиваемых культур, управление микроклиматом, а также режимами освещения и питания. Дополнительный контроль за процессом выращивания растений осуществляется с помощью установленных в теплице камер видеонаблюдения, изображение с которых в реальном времени обрабатывается и сохраняется на облачном сервере, а затем передается удаленному клиенту.

Предлагаемый подход моделирования и оценки проектной деятельности построен на комплексной оценке показателей качества жизненного цикла (ЖЦ) проекта. Представлена логико-динамическая модель ЖЦ проектно-конструкторской стадии создания проекта. В качестве математического формализма используются расширенные сети Петри – E-сети, позволяющие описывать дискретные параллельные взаимодействующие процессы проектируемой системы. Иерархическая E-сетевая схема позволяет моделировать этапы (статус выполненных) работ, а также используемые при выполнении данных работ ресурсы. Результатом аналитико-имитационной работы являются рассчитанные интегральные оценки эффективности проекта, каждого ресурса, а также временная диаграмма работы с необходимой степенью детализации. Установлены численные показатели затрат ресурсов на выполнение проекта: затраты времени и материальные затраты на выполнение i -й операции.

Ключевые слова: сети Петри, теплица, система управления, разработка проекта, логико-динамическая модель.

COMMAND PATTERN OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR GREENHOUSE COMPLEX

M. Ya. Braginsky, D. V. Tarakanov
*Surgut State University,
mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru*

The article describes the project contents on the working model creation of an automated control system for a greenhouse complex, which includes a controller, a cloud server, and a remote client. The system manages data collecting on the state of crops, lighting, power, and microclimate. Additional control over the process of growing plants is carried out using surveillance cameras installed in the greenhouse, the image from which is processed in real time and stored on the cloud server, and then transferred to the remote client.

The proposed approach for modelling and evaluating project activities is based on a comprehensive assessment of the project's life cycle quality indicators. The logical dynamic model of the life cycle of the project design stage of the project creation is presented. As a mathematical formalism, the authors propose to use extended Petri nets – E-networks, which allow describing discrete parallel interacting processes when creating the system. The presented hierarchical E-network scheme allows modelling stages of work, as well as the resources used in the performance of these works. As a result of analytical and simulation work, both calculated integral evaluations of the project's effectiveness and effectiveness of each resource are presented. The result of the model as a timing diagram of the organization with the necessary level of detail is also given. The authors have

proposed the following numerical indicators of resources costs for the project: an indicator of time and an indicator of the material costs spent on the i -th task.

Keywords: Petri nets, greenhouse, management system, project design, logical dynamic model.

Введение. Существует большая потребность в формировании компетенций у студентов технических направлений в сфере практического применения знаний в области командного проектирования систем автоматики [1–4]. С первого курса студенты Политехнического института Сургутского государственного университета направления «Управление в технических системах» разрабатывают проектные задания на кафедре автоматики и компьютерных систем, одним из которых был проект «Умная теплица» по созданию действующего макета автоматизированной системы управления тепличным комплексом, включающего интегрированную систему сбора данных о состоянии выращиваемых культур, систему управления режимами освещения, питания, микроклиматом. Для решения поставленной задачи были сформированы 4 мини-группы (по 3–4 человека), два студента были назначены на роль лидеров-координаторов проекта.

Согласно стандарту ISO/IEC 15288:2002 Международной организации по стандартизации и Международной электротехнической комиссии (русскоязычный аналог ГОСТ Р ИСО МЭК 15288-2005) не существует единой универсальной модели жизненных циклов систем. Те или иные стадии жизненного цикла могут присутствовать в зависимости от каждого конкретного случая разработки системы [5].

Процедура проектирования «Умной теплицы». При проектировании осуществлялось исследование объекта управления, сбор данных об объекте автоматизации, а также оценка качества функционирования объекта. Была разработана концепция оригинальной адаптивной системы управления локальной теплицей [6–7]. Обобщенная структурная схема системы управления ресурсами теплицы представлена рис. 1.

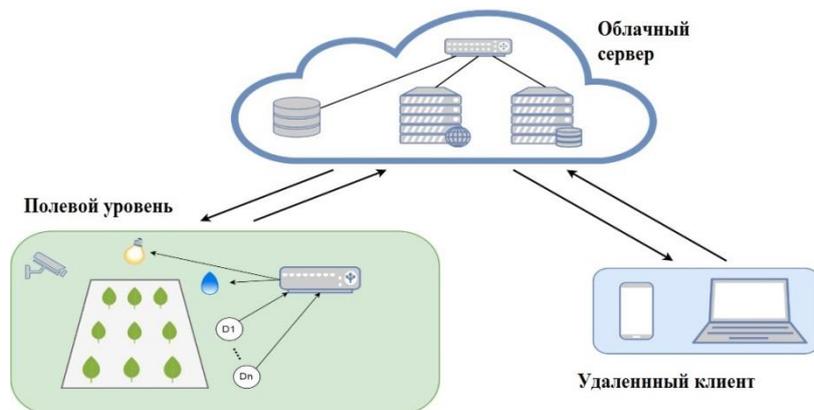


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления ресурсами теплицы

Структурная схема включает следующие компоненты: контроллер; облачный сервер; удаленный клиент.

Контроллер с помощью датчиков управляет основными параметрами теплицы: температурой, влажностью, освещением, обеспечивая получение информации об их текущем значении.

Изменение параметров осуществляется путем вычисления управляющих воздействий для систем: освещения, полива, увлажнения воздуха [8–9]. Управляющие воздействия вычисляются контроллером на основе текущих значений параметров и необходимых значений, полученных с сервера.

Дополнительный контроль за процессом выращивания растений осуществляется с помощью установленных в теплице камер видеонаблюдения, изображение с которых в реальном времени обрабатывается и сохраняется на облачном сервере, а затем передается уда-

ленному клиенту. Облачный сервер служит хранилищем для истории наблюдения за параметрами теплицы, а также каналом связи между удаленным клиентом и контроллером и состоит из WEB-сервера; сервера базы данных; сетевого хранилища.

WEB-сервер обеспечивает работу web-приложения, выполняющего роль удаленного клиента, а также отправляет на контроллер управляющие воздействия и получает данные об основных параметрах теплицы из контроллера.

Удаленный клиент представляет собой web-приложение, с помощью которого осуществляется первоначальная настройка параметров управления, а также наблюдение и управление процессом выращивания растений. Все части системы связаны с помощью интернета.

Проработаны требования (показатели качества) к адаптивной системе управления теплицей. Система автоматического регулирования локальной теплицы предназначена для поддержания следующих параметров, оптимальных для выращивания растений:

1. Освещение:
 - величина освещенности – 9 000... 11 000 Люкс;
 - 255 уровней освещенности;
 - 5 цветовых каналов (лампы разных спектров).
2. Регулирование процесса питания растений (включение/выключение насоса).
3. Микроклимат в теплице:
 - температура – 20 °С ... 21 °С , погрешность 0,5 °С;
 - влажность 60–70 %;
 - содержание CO₂ в воздухе.
4. Питательный раствор:
 - температура питательного раствора;
 - Ph – 5,8 ... 6, погрешность 0,1.

Разработка концепции адаптивной системы управления теплицей. Принято решение о проектировании и реализации системы управления по двум траекториям: демонстрационная система управления на платформе Arduino [10] и промышленная система управления. Разработана демонстрационная система управления на платформе Arduino (рис. 2).

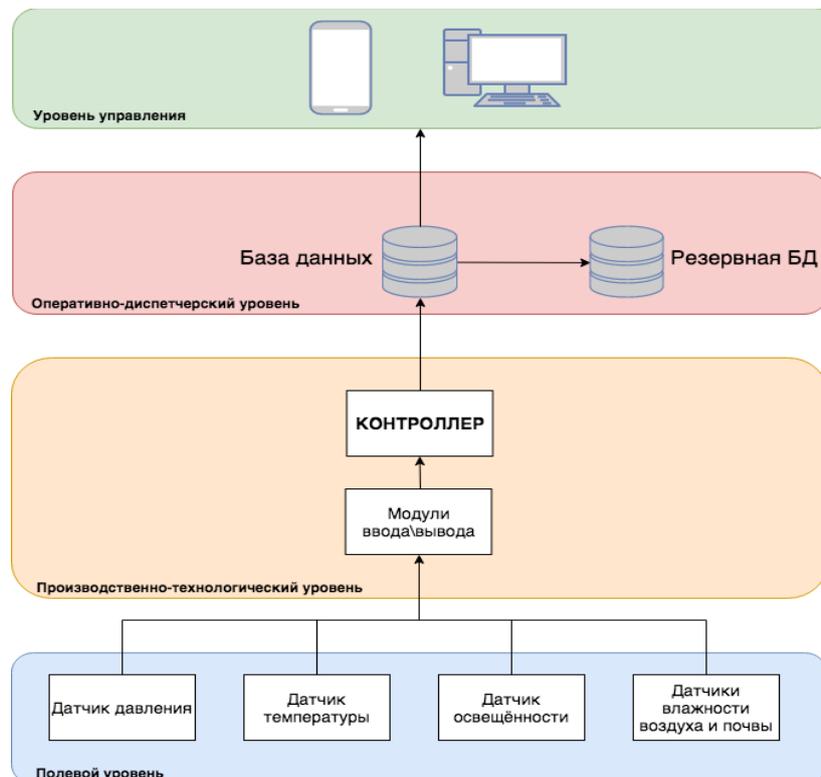


Рис. 2. Структура построения системы управления

Пользовательский интерфейс системы состоит из трех основных экранов: авторизация; первоначальная настройка теплицы; наблюдение за процессом выращивания.

Система управления является облачной с хранением данных пользователя на сервере и получением доступа к ним по логину и паролю для контроля и наблюдения из любой точки мира с помощью устройства, подключенного к интернету.

Экран первоначальной настройки теплицы служит для выбора необходимых параметров, определяющих работу теплицы. Пользователю предлагается выполнить пошаговую настройку, например: осуществить выбор растения, тип или модель теплицы; скорость выращивания. На основе выбранных параметров происходит определение конкретной программы выращивания.

Экран для наблюдения за процессом выращивания позволяет просматривать изображение с камер видеонаблюдения в реальном времени и наблюдать за текущими значениями параметров. Каждое значение параметра сопровождается цветовым индикатором, который показывает отклонение параметра от должного значения, что позволяет быстро заметить неполадки в работе системы. Для получения полной информации о состоянии теплицы и ее систем пользователь может нажать на соответствующую кнопку (рис. 3).

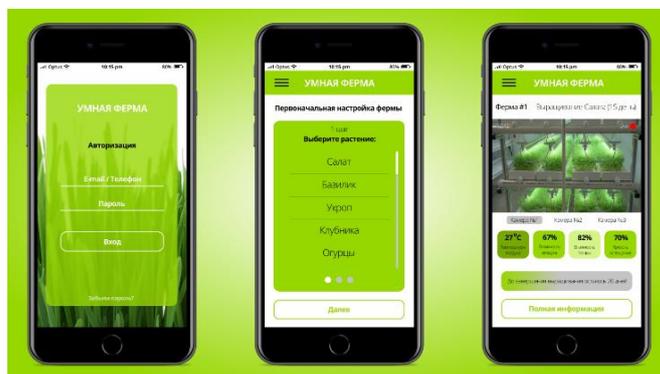


Рис. 3. Эскиз интерфейса системы

Прорабатывается процедура обработки видеoinформации для оценки состояния выращиваемых культур. На рис. 4 схематично отмечены основные этапы обработки изображения. В качестве классификатора предлагается использовать искусственную нейронную сеть, которая адаптируется на базе обучающих выборок.



Рис. 4. Этапы обработки видеоряда для анализа состояния растений

Методика моделирования и оценки проектной деятельности. Предлагаемый подход моделирования и оценки проектной деятельности построен на комплексной оценке показателей качества жизненного цикла (ЖЦ) проекта «Умная теплица». Нижний уровень абстракции отождествляет относительные характеристики затрат ресурсов каждого этапа создания проекта и каждого подразделения, участвующего в последовательности этапов. При этом на одном этапе ЖЦ могут быть задействованы в работе несколько подгрупп, а также любое подразделение может участвовать в нескольких этапах ЖЦ.

Следующий уровень отражает эффективность этапа ЖЦ создания проекта и учитывает взаимосвязь между элементами и вклад каждого показателя в интегральную характеристику эффективности процессов проектирования, тестирования и отладки проекта.

На рис. 5 представлена логико-динамическая модель (ЛДМ) ЖЦ проектно-конструкторской стадии создания проекта. В качестве математического формализма предложено использовать расширенные сети Петри – *E*(evaluation)-сети [11–12], которые позволяют описывать дискретные параллельные взаимодействующие процессы при создании проектируемой системы.

Представленная иерархическая *E*-сетевая схема позволяет моделировать этапы (статус выполненных) работ и используемые ресурсы при выполнении проектных работ. Результатом аналитико-имитационной работы является расчет интегральных оценок эффективности проекта и каждого ресурса, а также временная диаграмма работы с необходимой степенью детализации.

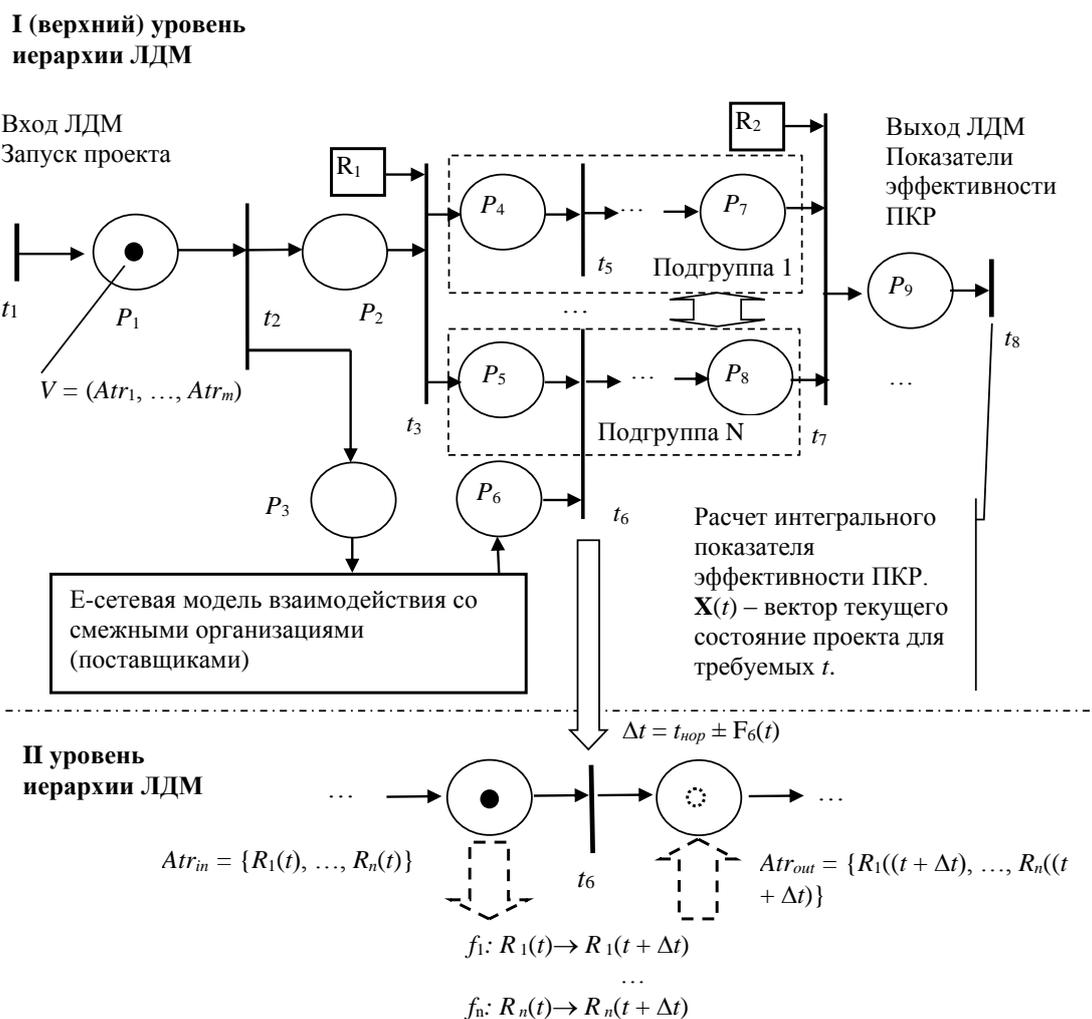


Рис. 5. E-сетевая логико-динамическая модель выполнения проектно-конструкторских работ

На рис. 5 срабатывание переходов t_i соответствует началу выполнения определенного этапа работы, например, переход t_1 моделирует запуск (заявку) проекта. Срабатывание переходов t_2 моделирует начало работ в заданных организациях, t_3 распределяет задачи между структурными подразделениями. Представленная модель учитывает параллельные процессы при создании проектируемой системы (иллюстрируют данные процессы переходы t_5, t_6), с возможностью возврата к предыдущему этапу проектной деятельности. Кроме того, существует возможность учета взаимодействия со смежными организациями и т. д. Время срабатывания переходов в Е-сетевой модели происходит за конечное время Δt , которое можно условно представить как сумму нормы времени $t_{\text{нор}}$ для выполнения заданной операции (этапа) и вариационной составляющей $\pm F(t)$, зависящей от различных факторов: уровня компетенции коллектива, сложности задачи, работы смежных организаций и т. д. Позиции Е-сетевой схемы P_i отражают этапы проекта. Передача информации в Е-сетях осуществляется с помощью фишек V_i . С фишкой можно ассоциировать упорядоченный конечный набор, или кортеж числовых атрибутов, определяющих информационное содержание фишки: $V = (Atr_1, Atr_2, \dots, Atr_n)$, где Atr_i – значение i -го атрибута.

Фишка является динамическим элементом сети, способным перемещаться из одной позиции в другую в результате срабатывания переходов. Распределение фишек по позициям задает текущую маркировку сети, которую можно трактовать как ее текущее состояние [13–16]. При срабатывании перехода осуществляется (при необходимости) изменение атрибута согласно заданному правилу. Правило преобразования атрибута может быть любым: аналитическим, табличным, случайным.

В качестве атрибутов фишек в предлагаемой модели используется вектор состояния ресурсов $R(t)$. Компоненты вектора R включают в себя материальные ресурсы R_1 , трудовые R_2 , финансовые R_3 , временные R_4 , информационные R_5 , программные R_6 . В свою очередь ресурсы детализируются на среднем уровне иерархии: $R_{1,1}, R_{1,2}$ представляют аппаратные и программные средства соответственно. При этом к аппаратным ресурсам можно отнести оборудование и инструменты, ЭВМ, коммуникационные системы, сети и т. д. Аналогично программные ресурсы можно детализировать на пакеты прикладных программ моделирования, САПР 3D и т. п. К трудовым ресурсам отнесены квалификация участника проекта, его мотивация, степень новизны задания [17–19].

Формальное представление показателей качества. Структура и взаимодействие ресурсов на этапе ЖЦ проекта моделируется Е-сетевой структурой. Преобразование ресурсов осуществляется при срабатывании переходов (на рис. 5 – II уровень иерархии ЛДМ). Вычисление затрат ресурсов осуществляется при срабатывании переходов модели, что означает эволюцию проекта во времени $f_i: R_i(t) \rightarrow R_i(t + \Delta t)$. Предлагается ввести следующие численные показатели затрат ресурсов на выполнение этапов:

Относительный показатель затрат времени на выполнение i -й операции (задания):

$$R_4(t_i) = \frac{t_i}{T_{\text{норм}i}}, \quad (1)$$

где t_i – фактическое время выполнения i -й операции (задания);

$T_{\text{норм}i}$ – нормативное время выполнения i -й операции.

Если $R_i = 1$, то время выполнения текущей операции с заданной точностью равняется нормативу. В формуле (1) при $R_i < 1$ текущие затраты меньше нормативного времени.

Аналогично можно определить относительный показатель материальных затрат (ресурсов) на выполнение i -й операции:

$$R_k(t_i) = \frac{r_i}{R_{\text{норм}i}}. \quad (2)$$

Для визуального представления показателей качества проектирования целесообразно представить результаты вычислений в виде лепестковой диаграммы (рис. 6).

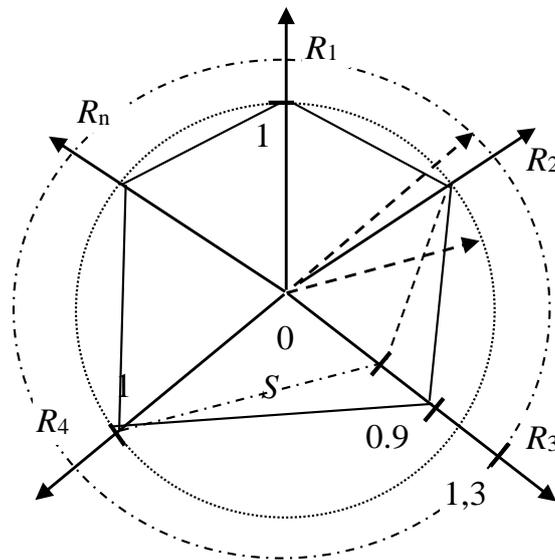


Рис. 6. Лепестковая диаграмма относительных показателей качества

По координатным осям данной диаграммы откладываются относительные показатели затрат ресурсов R . Значение меньшей площади S полученной фигуры (рис. 6) соответствует большей эффективности процессов проектирования системы [20]. Кроме того, с помощью данной диаграммы можно отследить степень разброса относительных показателей качества проектирования.

В ходе выполнения коллективной работы студенты на практическом опыте ознакомились с проектной деятельностью. Обучающиеся «прочувствовали» ошибки, которые были допущены на начальном этапе проектирования (например, был выбран не совсем удачный компонент «Умной теплицы» с низкими показателями надежности, не было предусмотрено резервирование энергопитания и т. д.).

Одним из главных результатов проектной работы является получение студентами ценного опыта работы в команде, опыт решения неформализованных задач с учетом возможности выбора вариантов проектных решений из большого многообразия.

Литература

1. Work in the automation age: sustainable careers today and into the future // Association for Advancing Automation. Ann Arbor, April 2017. URL: <https://www.a3automate.org/docs/Work-in-the-Automation-Age-White-Paper.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).
2. Laker D. The Differences Between Hard and Soft Skills and Their Relative Impact on Training Transfer // Human Resource Development Quarterly. 2011. Vol. 22, Is. 1. P. 111–122. DOI doi.org/10.1002/hrdq.20063.
3. Toner P. Workforce Skills and Innovation: An Overview of Major Themes in the Literature // OECD. 2011. 78 p. URL: <https://www.oecd.org/sti/inno/46970941.pdf> (дата обращения: 21.03.2019).
4. Skills for a Digital World. Policy Brief on The Future of Work // OECD. 2016. URL: <http://www.oecd.org/els/emp/Skills-for-a-Digital-World.pdf> (дата обращения: 04.03.2019).
5. Широкова Г. В., Клемина Т. Н., Козырева Т. П. Концепция жизненного цикла в современных организационных и управленческих исследованиях // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. 8. Менеджмент. 2007. Вып. 2. С. 3–31.

6. Гайкович А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб. : МОРИНТЕХ, 2001. 432 с.
7. Товб А. С., Ципес Г. Л. Управление проектами: стандарты, метод, опыт. М. : Олимп-Бизнес, 2003. 240 с.
8. Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
9. Кэмп П., Тиммерман Г. Компьютерное управление микроклиматом в теплицах. Центр инноваций и практического обучения в Эдде, 1997. 178 с.
10. Sommer U. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino / пер. с нем. ; 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : БХВ-Петербург, 2016. 256 с.
11. Basu S., Bultan T. On Deciding Synchronizability for Asynchronously Communicating Systems // *Theor Comput Sci.* 2016. No. 656. P. 60–75.
12. Hennicker R., Bidoit M., Dang T.-S. On Synchronous and Asynchronous Compatibility of Communicating Components // *In Coordination Models and Languages : 18th IFIP WG 6.1 International Conference, COORDINATION 2016, Held as Part of the 11th International Federated Conference on Distributed Computing Techniques, DisCoTec 2016, Heraklion, Crete. Greece, June 6–9, 2016.* P. 138–156.
13. Lomazova I. A. Resource Equivalences in Petri Nets // *Proc of PETRI NETS. Lecture Notes in Computer Science.* 2017. P. 19–34.
14. Andrews A., Abdelgawad M., Gario A. World Model for Testing Urban Search and Rescue (USAR) Robots using Petri Nets // *Proceedings of the 4th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development. Rome, 2016.* P. 663–670. DOI 10.5220/0005782106630670.
15. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. E-Network Modelling of Process Industrial Control Systems in Building Computer Simulators // *Control and Communications (SIBCON) : Proceedings of the XII International Siberian Conference. Moscow, May 12–14, 2016. M., 2016.* P. 185–191.
16. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. Hierarchical Analytical and Simulation Modelling of Human-Machine Systems with Interference // *Journal of Physics : Conference Series.* 2017. Vol. 803. Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016) : International Conference, 21–26 September 2016. Tomsk, Russian Federation. P. 120–126.
17. Шеремет А. Д. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия. М. : ИНФРА-М, 2014. 367 с.
18. Русак Н. А., Стражев В. И., Мигун О. Ф. и др. Анализ хозяйственной деятельности в промышленности ; 6-е изд. М. : Высш. шк., 2015. 480 с.
19. Козлов А. А. Управление трудовыми ресурсами промышленных предприятий при переходе к рынку. Минск, 2010. 512 с.
20. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Моделирование взаимодействия коллектива операторов в процессе управления технической системой // *Вестник кибернетики.* 2018. № 4 (32). С. 100–106.

УДК 624:621.396.96

**ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ УСТАНОВЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ
И РЕКОНСТРУКЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕТОДОМ
ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ**

Е. Л. Шошин

*Сургутский государственный университет,
shoshin6@mail.ru*

Предложен метод подповерхностного радиолокационного зондирования поляризационно-модулированными сигналами. Приведены результаты численного моделирования влияния влажности бетона на характеристики направленности излучателя Вивальди. Описана последовательность операций по цифровой обработке радиолокационных изображений свай, установленных в грунт. Приведены результаты экспериментального измерения длины свай и выделения металлических включений.

Ключевые слова: георадар, поляризационная модуляция, длина свай, металлические включения.

**LENGTH MEASURING OF INSTALLED REINFORCED CONCRETE PILES
AND RECONSTRUCTION OF METALLIC INCLUSIONS BY SUBSURFACE RADAR
SENSING WITH POLARIZATION-MODULATED SIGNALS**

E. L. Shoshin

*Surgut State University,
shoshin6@mail.ru*

The article proposes a method of subsurface radar sensing by polarization-modulated signals. The results of numerical simulation of the influence of concrete moisture on the directional characteristics of the Vivaldi antenna are presented. The sequence of operations for digital processing of radar images of piles installed in the ground is described. The results of experimental measurements of pile length and separation of metallic inclusions are given.

Keywords: GPR, ground-penetrating radar, polarization modulation, pile length, metallic inclusions.

Введение. В настоящее время для измерения длины свай преимущественно применяются волновые методы, использующие акустические или электромагнитные воздействия на систему «свая – грунт» [1–2]. Волновые методы позволяют определить длину свай по измеренному значению времени распространения сигнала в свае и известной скорости распространения сигнала в материале сваи. Радиолокационное обследование установленных в грунт свай может быть осуществлено путем зондирования их с торца и с боковых поверхностей, вскрытых для измерений. При этом значительное затухание сверхширокополосного сигнала при его распространении и маскирующие отражения от арматуры затрудняют выделение сигнала, отраженного от границы «конец сваи – грунт». Арматура свай благодаря своей высокой электропроводности оказывает заметное влияние на рассеяние сигналов. Установлено [1], что металлические стержни, образующие арматуру, хорошо отражают линейно-поляризованные электромагнитные волны, плоскость поляризации которых соответствует ориентации стержней арматуры, и слабо отражают линейно-поляризованные электромагнитные волны, плоскость поляризации которых образует перпендикуляр по отношению к направлению ориентации стержней арматуры. Отличие в уровне сигналов, рассеянных от металлических стержней, в зависимости

от поляризации излученного сигнала может составлять 5–10 дБ. Учет векторных свойств зондирующих и рассеянных сигналов позволяет предложить метод подповерхностного радиолокационного зондирования поляризационно-модулированными сигналами.

Формирование поляризационно-модулированных сигналов. Принцип работы георадара основан на использовании метода сверхширокополосного радиолокационного зондирования подповерхностных сред и объектов, при котором оцениваются характеристики нестационарного электромагнитного поля, формируемого при рассеянии от неоднородностей, включений и границ раздела сред [1, 3–4]. В режиме поляризационной модуляции зондирующих сигналов георадар реализует режим последовательного облучения подповерхностной среды электромагнитными волнами с ортогональными поляризациями, что позволяет выполнить векторную обработку рассеянных сигналов. Используемые на излучение и прием антенны, наряду с хорошим усилением и широкой полосой рабочих частот, должны обладать способностью формировать зондирующие сигналы ортогональных поляризаций и принимать обратно-рассеянные сигналы. Схема пространственного размещения антенн должна учитывать геометрию оголовка сваи, доступного для измерений. Перечисленным требованиям отвечают излучатели Вивальди, образующие антенную систему в виде «коробки» (рис. 1а). При этом образующие поляризационный базис пары излучателей 1, 3 и 2, 4 участвуют в формировании и приеме СВЧ радиосигналов линейной поляризации последовательно в первом и во втором полупериодах (T) модуляционного цикла ($C = 2T$). Излучатели 1, 3 характеризуются горизонтальной поляризацией, а излучатели 2, 4 – вертикальной поляризацией (в плоскости XOY относительно оси OZ).

При радиолокационном обследовании свай диэлектрическая проницаемость и поглощающие свойства заполняющего бетона определяются соотношением входящих в него материалов и в существенной степени зависят от влажности [5]. Рассмотрим влияние влажности бетона на энергетические характеристики антенны Вивальди в ближнем поле облучения радиолокационными сигналами установленной в грунт сваи. В качестве излучателя Вивальди выберем антенну антиподального типа, описанную в [6], полоса рабочих частот которой составляет 500–700 МГц. На рис. 1б приведена диаграмма направленности излучателя Вивальди. Результаты численного моделирования свидетельствуют, что при изменении влажности бетона от 1 до 4 % главный лепесток диаграммы направленности излучателя Вивальди сужается в 1,6 раза, при этом КНД антенны увеличивается на 24–42 %, достигая значения 4–11 (рис. 2а), а коэффициент Front-to-Back уменьшается на 72–77 %, достигая значения 2–3 (рис. 2б).

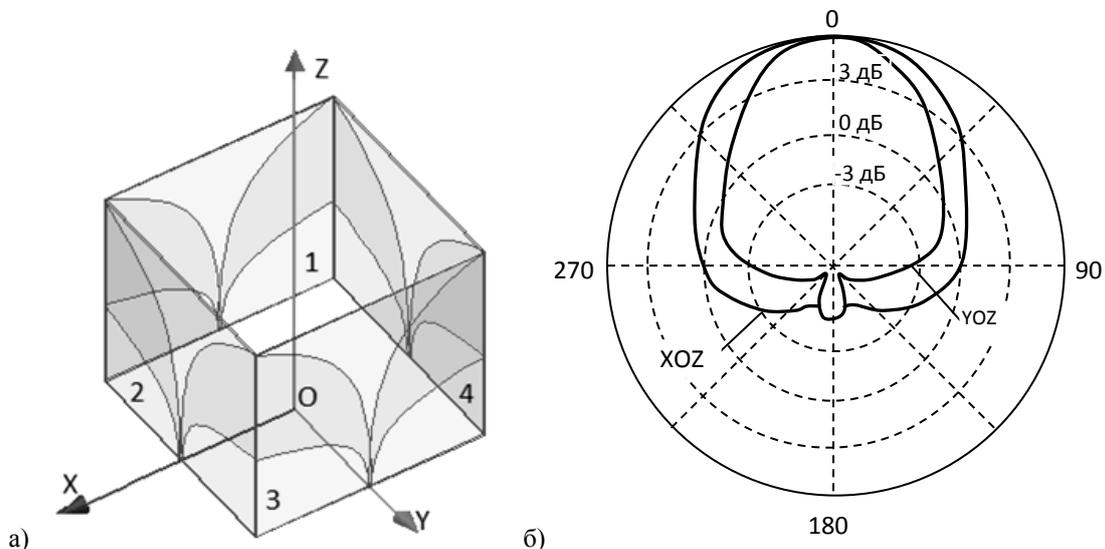


Рис. 1. Излучатели Вивальди:
а) антенная система; б) диаграмма направленности

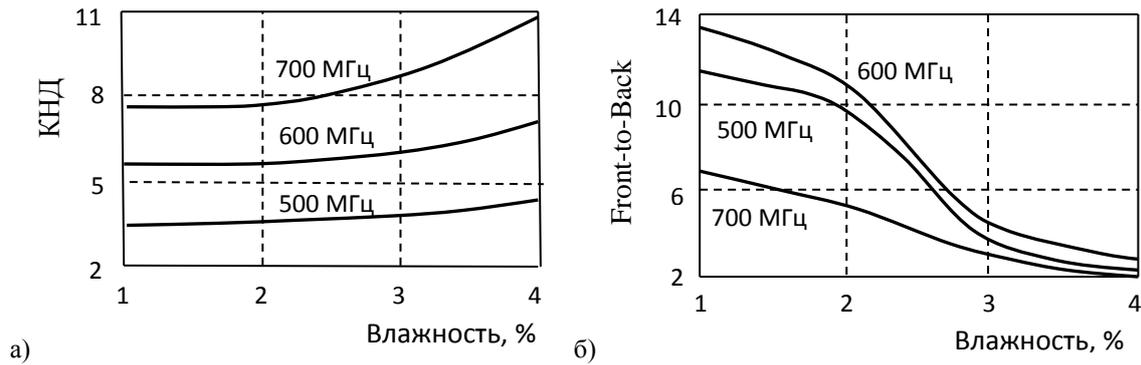


Рис. 2. Влияние влажности бетона на характеристики направленности излучателя Вивальди:
 а) зависимость КНД от влажности бетона;
 б) зависимость коэффициента Front-to-Back от влажности бетона

Коэффициент эллиптичности (Ludwig-3) излучаемых в направлении оси OZ электромагнитных волн достигает значения 15, что служит свидетельством формирования излучателем Вивальди сигналов с линейной поляризацией.

Выделение металлических включений и измерение длины сваи. При подповерхностном радиолокационном зондировании арматура сваи образует значительные отражения, маскирующие на радиолокационном изображении границу раздела «конец сваи – грунт» и затрудняющие процесс определения длины сваи по измеренному времени задержки сигнала, рассеиваемого концом сваи. Проблема подавления помех на изображениях рассматривается в работах [7–10]. Векторная обработка рассеянных сигналов позволяет эффективно выделять объекты с требуемыми поляризационными характеристиками, улучшая при этом радиолокационный контраст изображений и подавляя помехи [11].

В режиме поляризационной модуляции зондирующих сигналов появляется возможность идентифицировать рассеивающие объекты и выполнять их селекцию. Так, стержни арматуры могут быть классифицированы как поляризационно-анизотропные объекты, рассеивающие характеристики которых зависят от поляризации излученного сигнала. В противоположность этому граница раздела «конец сваи – грунт» может быть классифицирована как поляризационно-изотропный объект, поскольку не содержит металлических включений и при рассеянии формирует сигналы с уровнем без связи с поляризацией зондирующих радиоимпульсов.

С целью разработки методики выделения металлических включений и измерения длины сваи, установленной в грунт, было выполнено радиолокационное обследование с открытых поверхностей оголовка сваи, которое включало в себя формирование, прием и регистрацию поляризационно-модулированных сигналов. Зондирование осуществлялось парой излучателей 1 и 2 в составе антенной «коробки» (рис. 1а), управление которыми выполнялось импульсами запуска $ss_1((2n - 1)T)$ и $ss_2(2nT)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, а T – период следования синхроимпульсов. Раскроем последовательность операций по обработке рассеянных сигналов:

- прием рассеянных сигналов горизонтальной поляризации $s_1(t, (2n - 1)T)$ ($t < T$) в нечетных полупериодах модуляционного цикла, прием рассеянных сигналов вертикальной поляризации $s_2(t, 2nT)$ ($t < T$) в четных полупериодах модуляционного цикла и формирование измерительного сигнала в соответствии:

$$s_0(t, nT) = s_1(t, (2n - 1)T) + s_2(t, 2nT); \quad (1)$$

- накопление измерительного сигнала на интервале времени не менее $y = nT = 1$ и сохранение данных измерений в форме матрицы цифрового радиолокационного изображения:

$$s(x, y) = s_0(t, nT) \quad (2)$$

$$x [м] = \frac{ct [с]}{2\sqrt{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где c – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве, ε – диэлектрическая проницаемость бетона;

- компенсация затухания сигнала в зависимости от глубины проникновения в почву и грунты. Эмпирическая формула, связывающая затухание g с глубиной слоя x на рабочей частоте, составила линейную аппроксимацию вида:

$$g(x), \text{ дБ} = 19,4 x [м]; \quad (4)$$

- формирование маски границы раздела поляризационно-изотропных сред. С учетом того, что излученный сигнал представляет собой моноимпульс, большая часть энергии которого сосредоточена в 2.5–3 полупериодах чередующейся положительной и отрицательной полярности, маску границы раздела поляризационно-изотропных сред можно представить в виде бинарного изображения чередующихся черной-белой-черной полос (рис. 3а). Ширина полос соответствует длительностям полупериодов в моноимпульсе;

- формирование маски рассеивающих стержней арматуры. Последовательное облучение металлического стержня СВЧ радиосигналами вертикальной и горизонтальной поляризациями приводит к изменению уровня обратно-рассеянного сигнала синхронно с частотой поляризационной модуляции (рис. 3б);



Рис. 3. Маска для корреляционной обработки:

а) граница раздела поляризационно-изотропных сред; б) рассеивающий стержень арматуры

- пространственная корреляционная обработка изображения сваи обеими масками – границы раздела сред и рассеивающих стержней арматуры. Алгоритм пространственного корреляционного анализа задается соотношением свертки исходного пространственного образа среды $s(\xi, \eta)$ с импульсной характеристикой маски $h(x, y)$ [1]:

$$s^*(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) s(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (5)$$

- формирование бинарного изображения. При формировании бинарного изображения пикселям, значения которых выше заданного порога, назначается значение белого цвета (единица), а пикселям со значениями ниже порога – значение черного цвета (ноль). Алгоритм отсечения порогом задается соотношением:

$$s^*(x, y) = \begin{cases} 1, & s(x, y) \geq Z_0 \\ 0, & s(x, y) < Z_0 \end{cases}, \quad (6)$$

где значение порога по результатам измерений составило $Z_0 = 0,8 - 0,9$. На рис. 4 приведен фрагмент бинарного изображения арматуры сваи после корреляционной обработки маской стержня арматуры. Стержни вертикальной стратификации (V), присутствующие в изображении сваи на различной глубине залегания вдоль оси OZ, формируют пики корреляционной функции синхронно с положительными полупериодами модулирующего сигнала МС, в течение которых антенная система из излучателей Вивальди формирует зондирующий сигнал и принимает рассеянный сигнал вертикальной поляризации. Стержни горизонтальной стра-

тификации (Н) формируют пики корреляционной функции при облучении сигналом горизонтальной поляризации, что соответствует по времени отрицательным полупериодам модулирующего сигнала;

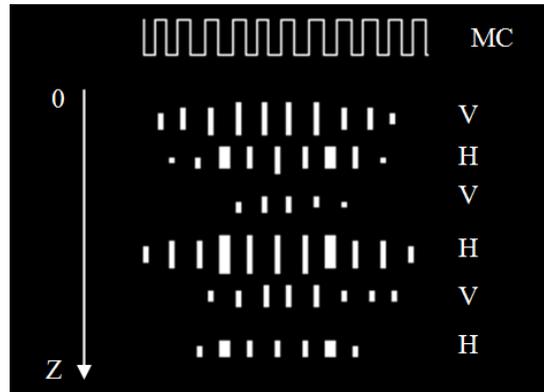


Рис. 4. Фрагмент бинарного изображения сваи после корреляционной обработки:
 МС – модулирующий сигнал; V – вертикальная стратификация стержня;
 H – горизонтальная стратификация стержня

- реконструкция металлических включений и границ раздела сред. Типовые операции по выделению протяженных объектов в бинарном изображении включают в себя дилатацию и удаление сегментированных участков, не превысивших порог. Результатом реконструкции является выделение металлических включений, оголовка и конца сваи, заглубленной в почвогрунты;

- измерение длины свай. Длина сваи по результатам реконструкции определяется как пространственный разнос от оголовка до конца сваи. На рис. 5а приведено радиолокационное изображение сваи, на рис. 5б, 5в приведены результаты корреляционной обработки, на рис. 5г приведены результаты реконструкции длины сваи и металлических включений.

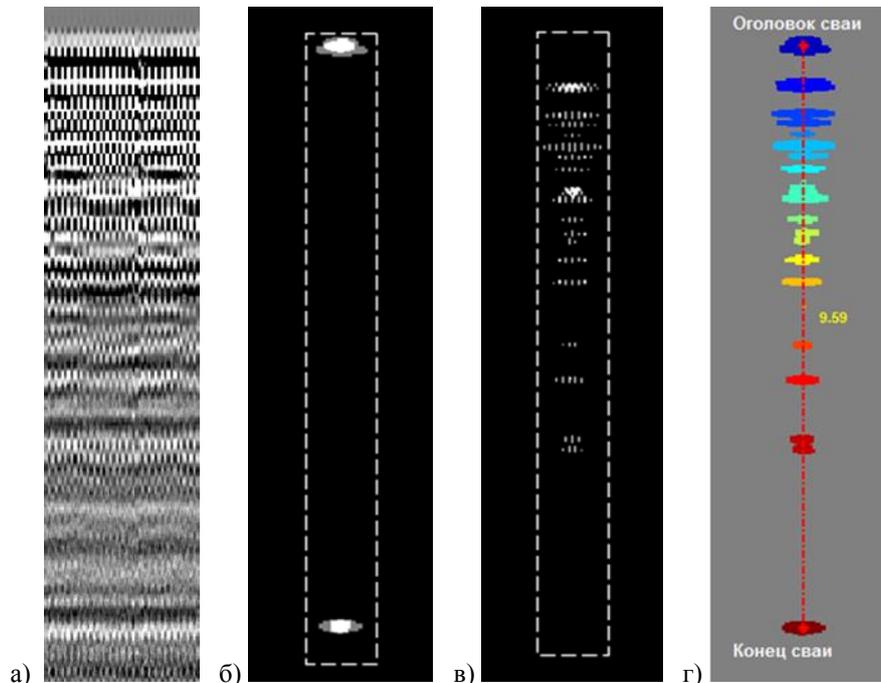


Рис. 5. Изображения железобетонной сваи:
 а) исходная радиорограмма; б) результат корреляционной обработки изотропных объектов;
 в) результат корреляционной обработки анизотропных объектов; г) результат измерения длины сваи
 и реконструкции металлических включений

Заключение. Метод радиолокационного подповерхностного зондирования поляризационно-модулированными сигналами позволяет выделять поляризационно-изотропные и поляризационно-анизотропные объекты. Излучатели Вивальди, благодаря своим энергетическим характеристикам могут быть использованы в подповерхностной радиолокации. При формировании зондирующих сигналов и радиолокационном обследовании установленных железобетонных свай целесообразно использовать антенную систему из четырех излучателей Вивальди, позволяющую реализовать обработку рассеянных сигналов в линейном поляризационном базисе. Использование корреляционной обработки радиолокационного изображения сваи, построенного с использованием поляризационно-модулированных сигналов, позволяет реализовать алгоритм измерения длины сваи и выделения металлических включений.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации : моногр. / под ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.
2. Капустин В. В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 113–117.
3. Annan P., Arcone S. A. et al. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / ed. Harry M. Jol. Kidlington, 2009. 508 p.
4. Александров П. Н. Теоретические основы георадарного метода. М. : Физматлит, 2017. 120 с.
5. Шошин Е. Л., Лукьянов С. П., Ковалев Д. М. Георадарные методы инженерного обследования : моногр. / под ред. Е. Л. Шошина. Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2008. 152 с.
6. Лукьянов С. П., Степанов Р. А., Шошин Е. Л. Влияние почвогрунтов на диаграмму направленности антенны Вивальди при подповерхностном зондировании // Обмен опытом в области создания широкополосных радиоэлектронных систем (СВЧ2012) : материалы IV общерос. науч.-технич. конф. Омск : КАН, 2012. С. 235–241.
7. Harpreet K., Neelofar S. A Study for Applications of Histogram in Image Enhancement // The International Journal of Engineering and Science. 2017. Vol. 6 (6). P. 59–63. DOI 10.9790/1813-0606015963.
8. Бортников В. М., Абрамчук М. В. Разработка программного компонента модуля съемки протяженных объектов для сканера пиломатериалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 167–173. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-167-173.
9. Janicka J., Rapinski J. Filtering the Results of ZIGBEE Distance Measurements with RANSAC Algorithm // Journal of AGG. 2016. Vol. 13, No. 1 (181). P. 83–88. DOI 10.13168/AGG.2015.0043.
10. Васильченко А. А., Коптелов Г. А., Савкин Д. В. Выделение объектов по зашумленным и смазанным снимкам методом гистограммного анализа // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXV Междунар. науч.-технич. конф. Воронеж, 2019. Т. 2. С. 163–171.
11. Шошин Е. Л. Радиолокационные методы контроля навигационной судоходной обстановки // Вестник кибернетики. 2018. № 3 (31). С. 113–134.

ОНТОЛОГИЯ ОПЕРАТОРА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ТЕОРИИ АСИММЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. А. Острейковский¹, Е. Н. Шевченко²
Сургутский государственный университет,
¹ova@surgu.ru, ²elenan_27@mail.ru

Классические методы анализа и оценки показателей долговечности сложных высокоответственных и критически важных систем, таких как ядерные энергетические установки атомных станций и ледоколов, магистральных нефте- и газопроводов, космических станций, систем защиты Земли от опасных космических объектов, не позволяют корректно прогнозировать значения показателей долговечности и безопасности. Поэтому необходимы дальнейшие исследования новых теоретических методов в этой области. Чрезвычайно актуальными остаются вопросы по проблеме «время» вообще и «внутреннее время» в частности. В статье анализируется сущность оператора преобразования в теории асимметрии внутреннего времени. Существующие методы оценки асимметрии времени потребовали разработки и применения в первую очередь операторов микроскопической энтропии и внутреннего времени, которые к настоящему времени исследованы достаточно глубоко. Оператору же преобразования уделялось меньше внимания, хотя его важность очень велика. Поэтому целью данной работы является обобщение достижений в оценке сущности оператора преобразования для круга задач в проблеме асимметрии внутреннего времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Для достижения поставленной цели используются ставшие уже классическими детерминированные и вероятностно-статистические подходы теории операторов функционального анализа, которые широко применяются в отечественной и зарубежной литературе [1–13]. Расширены рамки существующих подходов к оценке роли оператора преобразования в теории операторов функционального анализа с учетом различной асимметрии времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее».

Ключевые слова: внутреннее время, асимметрия времени, оператор преобразования.

ONTOLOGY OF TRANSFORMATION OPERATOR IN THEORY OF INTERNAL TIME ASYMMETRY OF COMPLEX SYSTEMS

V. A. Ostreikovsky, E. N. Shevchenko
Surgut State University,
ova@surgu.ru, elenan_27@mail.ru

Classical methods for analyzing and evaluating the longevity indicators of mission-critical systems such as nuclear power units of nuclear power plants and icebreakers, main oil and gas pipelines, space stations, Earth protection systems from dangerous space objects, do not allow correctly predicting the values of longevity and safety indicators. Therefore, further studies of new theoretical methods in this area are needed. Consequently, the problem of “Time” in general and “Internal time” in particular remains extremely relevant. This article analyzes the essence of the transformation operator in the theory of asymmetry of internal time. Existing methods for assessing the asymmetry of time primarily required the development and application of operators of microscopic entropy and internal time, which have been studied deeply enough so far. The transformation operator received less attention, although its importance is very great. Hence, the purpose of this article is to generalize the achievements in evaluating the essence of the transformation operator for a problems variety of asymmetry of internal time in the past-present-future modes. To achieve this goal, the article uses the deterministic and probabilistic-statistical approaches of the theory of functional

analysis operators that are already widely described in Russian and foreign literature [1–13]. The scope of existing approaches to assessing the role of the transformation operator in the theory of functional analysis operators has been expanded taking into account various asymmetries of time in the past-present-future modes.

Keywords: internal time, time asymmetry, transformation operator.

Введение. Нарушение симметрии времени является внутренним состоянием объекта и должно быть универсальным во всех динамических теориях, будь то классическая механика, квантовая механика или теория относительности.

Прошло уже более 30 лет после первых публикаций И. Р. Пригожина, в которых было обращено внимание на то, что оператор преобразования Λ состоит из двух полугрупп операторов, отображающих эволюцию во времени энтропии W_t и W'_t . Первая полугруппа W_t отображает возрастание энтропии при $t \geq 0$, а вторая W'_t – в противоположном направлении при $t \leq 0$. И в соответствии с этим операторы преобразования Λ и Λ' существенно отличаются друг от друга, определены на разных множествах времени и, как следствие, порождают совершенно разные физически реализуемые состояния объекта.

В результате второе начало термодинамики является принципом отбора, и эволюция состояний исследуемых объектов зависит от соответствующей полугруппы W_t и W'_t : в одном и том же фазовом пространстве всех состояний объекта образуются два различных многообразия, одно из которых сжимающееся при $t \geq 0$, а другое – растягивающееся при $t \leq 0$.

Естественно, что если такие многообразия существуют, то объекты в растягивающихся и сжимающихся многообразиях обладают внутренней асимметрией во времени.

Причины нарушения симметрии времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Классическая динамика со времен Ньютона описывает происходящие изменения как детерминированные эволюционирующим начальным состоянием объекта. Достижения квантовой механики и теории относительности не затронули этой установки классической физики. Даже в реляционной динамике нет ничего, что позволяло бы отличить прошлое от будущего.

Только с появлением второго начала термодинамики Клаузиуса и введением в 20-е годы XIX века новой физической величины – энтропии – появилась возможность наделить этот эволюционирующий показатель «стрелой времени» и установить различие между прошлым и будущим. Поэтому именно термодинамика, в отличие от динамики Ньютона, выдвинула новую концепцию времени как внутреннюю переменную, которой обладает любой объект природы. Именно такая интерпретация времени как внутреннего состояния любой системы или объекта делает возможным отличать прошлое от будущего. Таким образом закон возрастания энтропии во времени стал фундаментальным фактом в физике и динамике.

Для принятия закона возрастания энтропии в качестве фундаментального постулата динамики необходимы два условия:

- 1) введение новых понятий: внутреннее время T и микроскопический оператор M ;
- 2) существование подходящего механизма, который бы нарушал инвариантность обычного динамического описания относительно обращения времени.

Относительно второго условия необходимо подчеркнуть следующее. Так как далеко не все способы нарушения инвариантности относительно обращения времени соответствуют второму началу термодинамики (например, распад K -мезонов), нарушение симметрии должно быть внутренним, то есть не связанным с существованием новых взаимодействий. Но оно должно обязательно быть универсальным: возможным во всех динамических теориях – классической механики и теории относительности.

Следовательно, такие общая и внутренняя разновидности нарушения симметрии должны соответствовать не всем возможным причинам физической реализуемости состояний или начальных условий, допустимых при динамическом описании, а лишь организованному набору состояний, обладающих асимметрией требуемого типа.

Таким образом, должны рассматриваться только нарушения симметрии времени, которые происходят вследствие асимметричной природы физически допустимых состояний.

Прежде чем перейти к формулировке оператора преобразования необходимо кратко остановиться на основных понятиях классической динамики, которые необходимы для наведения моста между динамикой и термодинамикой [4, с. 192–199].

Основные соотношения классической динамики и необратимости. Как известно, существуют два описания эволюции динамических систем [4, с. 188–217]. *Первое описание:* прослеживание динамических точек по траекториям в фазовом пространстве Γ , показанное на рис. 1.

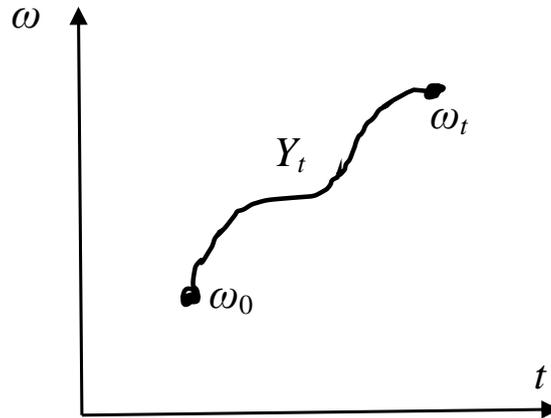


Рис. 1. Фазовая траектория для $\omega_0 \rightarrow \omega_t$ в фазовом пространстве Γ под действием динамической группы U_t

Второе описание (Гиббса – Эйнштейна) вводит в фазовом пространстве функции распределения состояния системы ρ . При этом поток в фазовом пространстве сохраняет объем (или меру).

Эволюцию функции распределения ρ во времени описывает унитарный оператор U_t

$$U_t = e^{-iLt}, \quad (1)$$

где L – оператор Лиувилля $i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho$ и

$$\rho_t(\omega) = U_t \rho(\omega). \quad (2)$$

Унитарность оператора U_t определяется так же, как и в квантовой механике, где физическим величинам соответствуют операторы. Основополагающее значение имеют самосопряженные (эрмитовы) операторы

$$A = A^+, \quad (3)$$

важность которых обусловлена тем, что эти операторы имеют вещественные собственные значения и порождают ортонормированный набор собственных функций, удовлетворяющих условию

$$\Psi = \sum c_n u_n. \quad (4)$$

При этом функции u_n или Ψ – элементы, или векторы гильбертова пространства. Функция Ψ , задающая квантовое состояние, является амплитудой вероятности [1]. Если операторы удовлетворяют соотношению

$$A^+ A = 1, \quad (5)$$

они носят название «унитарных».

Следует отметить, что существует различие между оператором U_t в классической механике и подходом Гиббса – Эйнштейна: в классической механике операторы U_t действуют на функции $Y(t)$ в фазовом пространстве и сводятся к точечным преобразованиям, поэтому лишь «кажутся» операторами. Тогда соотношение (1) можно записать в виде

$$\rho(t) = (U_t) \rho(\omega) = \rho(Y_{-t} \omega). \quad (6)$$

В нашем же случае унитарный оператор порождает динамическую группу

$$U_t U_s = U_{t+s} \quad (7)$$

при любых вещественных значениях времени t и s .

Далее вспомним предложенный Больцманом подход, включающий учет фактора необратимости [4, с.104]. Для этого динамике необходимо добавить вероятностное описание, основой которого могут служить вероятности перехода марковского процесса $P(t, \omega, \Delta)$, характеризующие вероятности перехода из точки ω_0 в область Δ [6].

Так как рассматривается поведение системы в фазовом пространстве, в крайнем вырожденном случае вероятность системы может быть равна

$$P(t, \omega, \Delta) = \begin{cases} 1, & \omega_t \in \Delta, \\ 0, & \omega_t \notin \Delta. \end{cases} \quad (8)$$

Соотношение (8) характеризует детерминированное описание состояний объекта. В случае же вероятностного подхода (например, цепи Маркова) значения вероятностей перехода системы не равны ни 1, ни 0, а заключены между ними, поэтому описание объекта становится нелокальным, существует функция распределения вида

$$\tilde{\rho}_t(\omega) = W_t \tilde{\rho}_0(\omega) \quad (9)$$

и появляется возможность вместо соотношения (7) иметь полугруппу

$$W_t W_s = W_{t+s}, \quad (10)$$

где $t, s \geq 0$. Это означает, что если динамический процесс не позволяет отличать прошлое от будущего, то применение вероятностного подхода вместо детерминистического позволяет учитывать эволюцию состояний объекта во времени. И, самое главное, операторы полугруппы, ориентированные в прошлое при $t, s \leq 0$, удовлетворяют соотношению

$$W_t W'_s = W'_{t+s}. \quad (11)$$

Именно этой цели и служит оператор преобразования Λ , связывающий динамическое описание с вероятностным:

$$\tilde{\rho} = \Lambda \rho. \quad (12)$$

Сущность оператора преобразования. В работах И. Р. Пригожина и его последователей [4, 13–18] раскрыты связь динамического описания с вероятностным и роли оператора Λ в этом переходе. В этих работах показано, что «преобразование Λ носит гораздо более ра-

дикальный характер, чем простая замена координат, и поэтому не представимо в виде комбинации унитарных операторов». Приняв соотношение (12), получаем диаграмму, показанную на рис. 2.

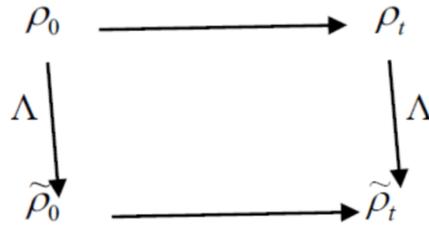


Рис. 2. Роль оператора преобразования в связи между динамическим U_t и вероятностным W_t описаниями

Так как $\tilde{\rho}_t = W_t \tilde{\rho}_0$, независимо от ρ_0 имеет место соотношение

$$\Lambda U_t \rho_0 = W_t \Lambda \rho_0 \quad (13)$$

и при $t \geq 0$ справедливо операторное равенство

$$\Lambda U_t = W_t \Lambda. \quad (14)$$

Далее, если для преобразования Λ существует обратное преобразование Λ^{-1} , то, имея в виду что преобразование Λ не унитарно, можно записать:

$$W_t = \Lambda U_t \Lambda^{-1}. \quad (15)$$

Таким образом, центральная проблема, с которой мы сталкиваемся при попытке навести мост между динамикой и вероятностями, состоит в построении преобразования Λ . Если U_t соответствует локальному описанию (точечному преобразованию), то преобразованию Λ также должен быть присущ некоторый элемент нелокальности. Решающую роль при этом играет фактор движения.

Следовательно, вместе с преобразованием Λ , порождающим полугруппу эволюции W_t с возрастанием энтропии при $t \geq 0$, существует другое преобразование Λ' , порождающее другую полугруппу эволюции

$$\Lambda' U_t \Lambda'^{-1} = W_t', \quad (16)$$

где W_t' удовлетворяет соотношению (11) с возрастанием энтропии в противоположном направлении времени $t \leq 0$. А это свидетельствует о следующем важнейшем выводе: преобразования Λ и Λ' сильно отличаются друг от друга и определены на различных множествах. Поэтому формулировка второго начала термодинамики является «принципом отбора»: из двух преобразований Λ и Λ' образуются совершенно разные физически реализуемые состояния системы, и эволюция состояний во времени зависит от соответствующей полугруппы. Одна из них приводит к возрастанию энтропии в положительном направлении, а другая – в противоположном. Это позволяет классифицировать системы с совершенно различными свойствами: на внутренне случайные и внутренне необратимые. Для внутренне случайных систем вероятность обретает внутренний смысл. А для другого класса внутренне необратимых систем кроме существования оператора преобразования Λ выполняется еще и принцип отбора.

Следующим важным результатом исследования онтологии оператора преобразования является утверждение, что вышеприведенная формулировка второго начала термодинамики

возможна лишь в двух случаях: система сильно неустойчива или имеет высокую чувствительность к начальным условиям. Это становится возможным, если система подвержена фактору «перемешивания» (необходимое условие) и описывается вероятностными методами (в частности, в виде К-потока) как достаточным свойством. Только в этих случаях динамические системы могут иметь в каждой точке фазового пространства два многообразия: одно сжимается под действием динамики движения при возрастающем времени, а другое растягивается.

Заключение:

1. Современный подход к проблеме асимметрии времени в философском и инструментальном научном мышлении основывается на законе возрастания энтропии и вытекающей из его существования «стреле времени». Второе начало термодинамики постулируется как фундаментальный физический факт.

2. Для принятия второго начала в качестве фундаментального постулата динамики вводятся новые понятия: внутреннее время T , микроскопический оператор энтропии M и механизм, который бы нарушал инвариантность обычного динамического описания относительно обращения времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее».

3. Нарушение симметрии времени является внутренним состоянием объекта и должно быть универсальным во всех динамических теориях, будь то классическая механика, квантовая механика или теория относительности.

4. Установлено, что преобразование Λ порождает две полугруппы эволюции во времени: 1) полугруппу эволюции W_t с возрастанием энтропии при $t \geq 0$ и 2) полугруппу W'_t с возрастанием энтропии при $t \leq 0$ в противоположном направлении времени. Это означает, что эти преобразования Λ и Λ' существенно различны и определены на разных множествах времени, то есть порождают разные физически реализуемые состояния объекта. В этом смысле второе начало термодинамики можно сформулировать как принцип отбора, а эволюция состояний объекта определяется соответствующей полугруппой W_t и W'_t .

5. В силу вывода № 4 все системы классифицируются: 1) «внутренне случайные», в которых вероятность обретает внутренний смысл, и 2) «внутренне необратимые», в которых существует оператор Λ и, кроме того, выполняется *принцип отбора*.

6. Существование нарушающего преобразования Λ с указанными в выводе № 5 свойствами возможно при выполнении двух условий: 1) динамическое движение сильно неустойчиво; 2) динамическое движение обладает высокой чувствительностью по отношению к начальным условиям.

7. Динамические системы, в которых преобладает элемент случайности, имеют важное свойство: в каждой точке фазового пространства существуют два многообразия (меньшей размерности, чем все фазовое пространство): одно сжимается под действием динамического движения при возрастающих значениях t , другое – растягивается.

8. Внутренняя асимметрия присуща объектам во времени при условии существования сжимающихся и растягивающихся многообразий. В этом случае для таких объектов удастся построить нарушающее симметрию преобразование Λ , и тогда роли, отводимые растягивающимся и сжимающимся многообразиям, неэквивалентны.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-01-00244, 18-07-00391.

Литература

1. Born M., Green H. S. A general Kinetic Theory of Liquids. Cambridge : University Press, 1949.
2. Боголюбов Н. Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. М. : Гостехиздат, 1946. 117 с.
3. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. М. : Мир, 1990. 168 с.

4. Пригожин И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. ; под ред. Ю. Л. Климонтовича ; изд. 2-е, доп. М. : Едиториал УРСС, 2002. 288 с.
5. Больцман Л. Избранные труды. М. : Наука, 1984. 590 с.
6. Марков А. А. Известия физико-математического общества Казанского университета. 1906. № 4, Т. 15. С. 135–156.
7. Марков А. А. Избранные труды. М. : Л., 1948. 410 с.
8. Колмогоров А. Н. О сохранении условнопериодических движений при малом изменении функции Гамильтона // Доклады АН СССР. 1954. Т. 98, № 4. С. 527–530.
9. Арнольд В. И. Особенности, бифуркации и катастрофы. УФН, 1983. Т. 141. С. 569–590.
10. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М. : Мир, 1984. 536 с.
11. Бергсон А. Творческая эволюция ; пер. с фр. М. : КАНОН-Пресс, 1998. 382 с.
12. Климонтович Ю. Л. Статистическая физика. М. : Наука, 1982. 608 с.
13. Леонтович М. А. Основные уравнения кинетической теории сточки зрения случайных процессов. ЖЭТФ, 1935. Т. 5. 211 с.
14. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем : моногр. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
15. Острейковский В. А. Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем: моногр. Сургут : Печатный мир, 2017. 268 с. Сер. «25 лет СурГУ».
16. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки. Вып. 37. Избран. тр. Междунар. симпозиума по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. С. 69–111.
17. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Феномен «время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 3–12.
18. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Феномен асимметрии внутреннего времени при прогнозировании состояния сложных динамических систем // Вестник кибернетики. 2017. № 4 (28). С. 181–188.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jc.surgu.ru и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. (3462) 76-30-67

Дата опубликования 00.11.2019

Формат 60 × 84/8

Уч.-изд. л. 5,4

Цена свободная