

ISSN 2520-6141



ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал



Серия 3

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
НАУКИ И ИНФОРМАТИКА**

№ 1 (290) 2025 год

Рубрики номера:

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Математика

Физика

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Моделирование процессов

и управление в технических системах

Обработка и передача информации

Системный анализ и обучающие системы

Алгоритмизация и программирование



Минск 2025

Учреждение образования
«Белорусский государственный
технологический университет»

ТРУДЫ БГТУ

Научный журнал

Издается с июля 1993 года

Серия 3

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
И ИНФОРМАТИКА**

№ 1 (290) 2025 год

Выходит два раза в год

Минск 2025

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Главный редактор журнала – Войтов Игорь Витальевич, доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь

Редакционная коллегия журнала:

Флейшер В. Л. кандидат технических наук, доцент (заместитель главного редактора), Республика Беларусь;
Жарский И. М., кандидат химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Флюрик Е. А., кандидат биологических наук, доцент (секретарь), Республика Беларусь;
Водопьянов П. А., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор философских наук, профессор, Республика Беларусь;
Прокопчук Н. Р., член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, Республика Беларусь;
Наркевич И. И., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Новикова И. В., доктор экономических наук, профессор, Республика Беларусь;
Черная Н. В., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Куликович В. И., кандидат филологических наук, доцент, Республика Беларусь;
Торчик В. И., доктор биологических наук, Республика Беларусь;
Щекин А. К., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Российская Федерация;
Башкиров В. Н., доктор технических наук, профессор, Российская Федерация;
Каухова И. Е., доктор фармацевтических наук, профессор, Российская Федерация;
Жантасов К. Т., доктор технических наук, профессор, Республика Казахстан;
Эркаев А. У., доктор технических наук, профессор, Республика Узбекистан;
Горинштейн Ш., доктор наук, профессор, Государство Израиль;
Маес Воутер, доктор наук, профессор, Королевство Бельгия.

Редакционная коллегия серии:

Наркевич И. И., доктор физико-математических наук, профессор (главный редактор серии), Республика Беларусь;
Урбанович П. П., доктор технических наук, профессор (заместитель главного редактора серии), Республика Беларусь;
Соловьева И. Ф., кандидат физико-математических наук, доцент (ответственный секретарь), Республика Беларусь;
Крук Н. Н. доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Асмыкович И. К., кандидат физико-математических наук, доцент, Республика Беларусь;
Карпович Д. С., кандидат технических наук, доцент, Республика Беларусь;
Романенко Д. М., кандидат технических наук, доцент, Республика Беларусь;
Калинин А. И., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Леваков А. А., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Листопад Н. И., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Мазаник С. А., доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Прихожий А. А., доктор технических наук, профессор, Республика Беларусь;
Сайко А. П., доктор физико-математических наук, Республика Беларусь;
Фурс А. Н. доктор физико-математических наук, профессор, Республика Беларусь;
Щекин А. К., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Российская Федерация;
Жумаев Одил, доктор технических наук, Республика Узбекистан;
Маес Воутер, доктор наук, профессор, Королевство Бельгия.

Адрес редакции: ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.

Телефоны: главного редактора журнала – (+375 17) 343-94-32;

главного редактора серии – (+375 17) 399-49-60.

E-mail: root@belstu.by, <http://www.belstu.by>

Свидетельство о государственной регистрации средств массовой информации

№ 1329 от 23.04.2010, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

Журнал включен в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований»

Educational institution
“Belarusian State Technological University”

PROCEEDINGS OF BSTU

Scientific Journal

Published monthly since July 1993

Issue 3

**PHYSICS AND MATHEMATICS.
INFORMATICS**

No. 1 (290) 2025

Published biannually

Minsk 2025

Publisher – educational institution “Belarusian State Technological University”

Editor-in-chief – Voita Ihar Vital’evich, DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus

Editorial (Journal):

Fleisher V. L., PhD (Engineering), Associate Professor (deputy editor-in-chief), Republic of Belarus;
Zharskiy I. M., PhD (Chemistry), Professor, Republic of Belarus;
Flyurik E. A., PhD (Biology), Associate Professor (secretary), Republic of Belarus;
Vodop’yanov P. A., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Philosophy), Professor, Republic of Belarus;
Prokopchuk N. R., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Republic of Belarus;
Narkevich I. I., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Novikova I. V., DSc (Economics), Professor, Republic of Belarus;
Chernaya N. V., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Kulikovich V. I., PhD (Philology), Associate Professor, Republic of Belarus;
Torchik V. I., DSc (Biology), Republic of Belarus;
Shchekin A. K., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Russian Federation;
Bashkurov V. N., DSc (Engineering), Professor, Russian Federation;
Kaukhova I. E., DSc (Pharmaceutics), Professor, Russian Federation;
Zhantasov K. T., DSc (Engineering), Professor, Republic of Kazakhstan;
Erkayev A. U., DSc (Engineering), Professor, Republic of Uzbekistan;
Gorinshteyn Sh., DSc, Professor, State of Israel;
Maes Wouter, DSc, Professor, Kingdom of Belgium.

Editorial (Issue):

Narkevich I. I., DSc (Physics and Mathematics), Professor (editor-in-chief of the series), Republic of Belarus;
Urbanovich P.P., DSc (Engineering), Professor (deputy editor-in-chief of the series), Republic of Belarus;
Solov’yeva I. F., PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor (executive editor), Republic of Belarus.
Kruk N. N., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Asmykovich I. K., PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Republic of Belarus;
Karpovich D. S., PhD (Engineering), Associate Professor, Republic of Belarus;
Romanenko D. M., PhD (Engineering), Associate Professor, Republic of Belarus;
Kalinin A. I., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Levakov A. A., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Listopad N. I., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus.
Mazanik S. A., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Prihozhiiy A. A., DSc (Engineering), Professor, Republic of Belarus;
Saiko A. P., DSc (Physics and Mathematics), Republic of Belarus;
Furs A. N., DSc (Physics and Mathematics), Professor, Republic of Belarus;
Shchekin A. K., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Russian Federation;
Jumaev Odil, DSc (Engineering), Republic of Uzbekistan;
Maes Wouter, DSc, Professor, Kingdom of Belgium.

Contact: 13a, Sverdlova str., 220006, Minsk.

Telephones: editor-in-chief (+375 17) 343-94-32;

editor-in-chief of the series (+375 17) 399-49-60.

E-mail: root@belstu.by, <http://www.belstu.by>

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

МАТЕМАТИКА MATHEMATICS

УДК 621.928.18

А. М. Волк, А. И. Вилькоцкий, С. В. Янович
Белорусский государственный технологический университет
ГАЗОЦЕНТРОБЕЖНАЯ СЕПАРАЦИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Сепарация жидких и твердых частиц из газового потока является составной частью многих технологических процессов в химической, пищевой, нефтехимической, микробиологической, энергетической и других отраслях промышленности. Процессы сепарации газожидкостных потоков имеют важное значение при массообмене, выпарке, ректификации, мокрой очистке газа, промышленной подготовке добываемого природного газа. В этих процессах определяющим фактором является движение частиц в сплошной газовой среде. В массообменных аппаратах межтарельчатый унос снижает эффективность массопередачи, а унос между аппаратами нарушает работу технологических установок в целом. Сепарационные устройства применяются на всех этапах получения и переработки углеводородов.

Процесс сепарации зависит от множества факторов: конструкции сепарирующих устройств и режимов их работы; содержания твердой или жидкой фазы в основном потоке и их дисперсного состава; физических свойств разделяющихся фаз и т. д. Математическое моделирование движения фаз в закрученном потоке с учетом основных факторов позволяет более точно оценить эффективность процесса разделения. Отлично выполненная сепарация позволяет уменьшить эксплуатационные затраты и повышает качество товарной продукции.

В данной работе рассмотрены силы, действующие на сферическую частицу в закрученном газовом потоке. Составлена математическая модель процесса сепарации в газожидкостных потоках, позволяющая определить минимальный размер улавливаемых капель с учетом изменения конструктивных, технологических и реологических параметров. Экспериментальным методом определен дисперсный состав сепарирующих частиц и описано распределение их объемов. Выполнена оценка степени сепарации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сепараторов.

Ключевые слова: сепарация, технологические процессы, математическое моделирование, закрученный газожидкостный поток, действующие силы, дисперсный состав, степень сепарации.

Для цитирования: Волк А. М., Вилькоцкий А. И., Янович С. В. Газоцентробежная сепарация жидкой фазы // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 5–10.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-1.

A. M. Volk, A. I. Vilkocki, S. V. Yanovich
Belarusian State Technological University

GAS-CENTRIFUGAL SEPARATION OF THE LIQUID PHASE

Separation of liquid and solid particles from a gas stream is an integral part of many technological processes in chemical, food, petrochemical, microbiological, energy and other industries. Separation

processes of gas-liquid streams are of great importance in mass transfer, evaporation, rectification, wet gas purification, field treatment of produced natural gas. In these processes the motion of particles in a continuous gas medium is the determining factor. In mass-exchange apparatuses inter-plate drift reduces the efficiency of mass transfer, and drift between apparatuses disrupts the operation of technological units as a whole. Separation devices are used at all stages of hydrocarbon production and processing.

The separation process depends on many factors: the design of separation devices and their operation modes, the content of solid or liquid phases in the main flow and their disperse composition, physical properties of the separating phases, etc. Mathematical modeling of the movement of phases in the swirling flow taking into account the main factors allows a more accurate assessment of the efficiency of the separation process. Qualitatively performed separation allows to reduce operating costs and improves the quality of commercial products.

In this paper, the forces acting on a spherical particle in a swirling gas flow are considered. A mathematical model of the separation process in gas-liquid streams is developed, which allows to determine the minimum size of captured droplets taking into account changes in design, technological and rheological parameters. The disperse composition of separating particles is determined by the experimental method and the distribution of their volumes is described. The degree of separation is estimated. The obtained results can be used in the design of separators.

Keywords: separation, technological processes, mathematical modeling, swirled gas-liquid flow, acting forces, disperse composition, degree of separation.

For citation: Volk A. M., Vilkocki A. I., Yanovich S. V. Gas-centrifugal separation of liquid phase *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 5–10 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-1.

Введение. В химической и нефтехимической промышленности широкое применение имеют массообменные аппараты. Эффективность процесса массообмена снижается при наличии капельного уноса, который нарушает работу технологических установок. Предотвращение уноса капель жидкости в газовом потоке необходимо также при ректификации, мокрой очистке газов, выпарке, промышленной подготовке добываемого природного газа к транспортировке [1].

В газодобывающей промышленности газожидкостные сепараторы применяются для максимального отделения капельной жидкости и твердых частиц из потока промышленного газа [2].

В промышленности используются различные типы сепарационных устройств, которые отличаются как конструктивно, так и режимами их работы [3].

В Белорусском государственном технологическом университете накоплен достаточно большой опыт по разработке, исследованию и внедрению центробежных сепарационных устройств [4].

Данные сепараторы позволяют решить проблему уноса. Основным силовым фактором в них является инерционная центробежная сила, значительно превышающая силу тяжести, что предопределяет их высокую эффективность. Кроме того, из-за высоких допустимых скоростей газа они компактны и менее металлоемки.

Центробежные сепарирующие устройства включают центробежные патрубки, установленные на общей тарелке. В нижней части они снабжены завихрителем газового потока, в верхней – устройством для отделения жидкой фазы.

Центробежные сепарационные элементы работают в режиме восходящего прямотока. Завихрители чаще всего выполняются лопастными или в виде тангенциальных прорезей. Устройства для отделения жидкостей: колпачок, боковые прорези, сетчатая поверхность.

На рис. 1 схематично представлены некоторые конструкции аппаратов элементного типа.

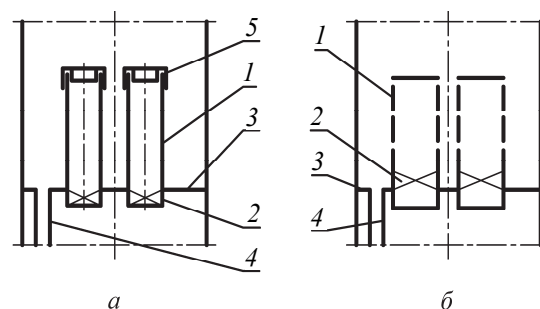


Рис. 1. Центробежные сепараторы элементного типа:
а – сепарационные элементы с отводом жидкости через зазор в верхней части;

б – сепарационные элементы с отводом жидкости через щели сетчатого патрубка;

1 – патрубок; 2 – многолопастный завихритель; 3 – тарелка; 4 – сливная труба; 5 – отбойный колпачок

Определяющим фактором центробежного разделения является то, что центробежные силы вращательно-поступательного движения во много раз превосходят силу тяжести, силу вязкого сопротивления и другие составляющие. Но на эффективность разделения в центробежных элементах кроме центробежной силы, геометрических

параметров элементов, размера частиц, физико-химических свойств газожидкостных потоков оказывают влияние и другие факторы, такие как характер движения отсепарированной пленки жидкости, вторичный унос жидкости с ее поверхности, способ отвода жидкой фазы, циркуляция газа в элементах.

В экспериментальных исследованиях эффективность разделения рассматривается, как правило, для одной конкретной конструкции без анализа структуры капель до и после сепаратора. В теоретических работах излагаются вопросы движения частиц в закрученном газовом потоке без учета изменения скорости газа по радиусу элемента и других факторов, влияющих на эффективность сепарации [4].

Наиболее точные расчеты получаются при сочетании теоретических и экспериментальных методов.

Основная часть. Математическая модель движения частицы. Для исследования процессов разделения многофазных потоков необходимо математическое моделирование движения в потоке газа жидких частиц с учетом их дисперсного состава. Принимаем, что частицы имеют сферическую форму радиусом a , плотностью $\rho_{\text{ж}}$ и массой m . Скорость частицы обозначим через $\vec{V}$, а скорость газового потока через $\vec{W}$.

Одной из задач исследования процесса разделения газожидкостных потоков в центробежных элементах является определение траектории движения капель сепарируемой жидкой фазы.

Рассмотрим движение одиночной частицы радиусом a и массой m в цилиндрической системе координат r, φ, z . Ось Oz направлена вертикально вверх по оси сепарационного элемента.

Масса частицы будет

$$m = \rho \frac{4}{3} \pi a^3. \quad (1)$$

Пусть V_r, V_φ, V_z – радиальная, касательная и осевая составляющие скорости движущейся частицы.

Уравнения движения одиночной частицы имеют вид

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = F_r, \\ m \left(\frac{dV_\varphi}{dt} + 2 \frac{V_\varphi V_r}{r} \right) = F_\varphi, \\ m \frac{dV_z}{dt} = F_g + F_z. \end{cases} \quad (2)$$

В составленную систему уравнений входят сила тяжести

$$\vec{F}_g = mg \quad (3)$$

и составляющие F_r, F_φ, F_z силы гидродинамического воздействия

$$\vec{F} = \zeta \frac{1}{2} \rho |\vec{W} - \vec{V}| (\vec{W} - \vec{V}) \pi a^2. \quad (4)$$

Остальные силы как минимум на порядок меньше, и ими можно пренебречь [5–9].

Коэффициент сопротивления сферической частицы зависит от числа Рейнольдса [9]:

$$\text{Re}_a = \frac{2 \rho a |\vec{W} - \vec{V}|}{\mu}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газа, кг/м^3 ; μ – коэффициент динамической вязкости газового потока, Нс/м^2 .

При движении частицы в вязкой среде наблюдаются ламинарный, переходной турбулентный и турбулентный режимы обтекания частицы. Для нахождения коэффициента сопротивления более удобной является зависимость [7]

$$\zeta = \frac{24(1 + 0,17 \text{Re}_a^{2/3})}{\text{Re}_a}. \quad (6)$$

При решении дифференциальных уравнений определялся минимальный диаметр капель, которые могут достигнуть стенки сепарационного элемента в зависимости от диаметра элемента D , длины элемента L , угла наклона лопастей завихрителя β , средней расходной скорости газа в элементе $\bar{W}_z$, вязкости газа μ , плотности газа ρ и жидкости $\rho_{\text{ж}}$. При выполнении расчетов были приняты следующие значения: $D = 0,1–0,5 \text{ м}$; $L = 0,3–1,0 \text{ м}$; $\beta = 30^\circ$; $\rho = 0,6 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,000013 \text{ Нс/м}^2$; $\rho_{\text{ж}} = 1200 \text{ кг/м}^3$.

При обработке расчетных данных [10] получена эмпирическая зависимость для определения минимального диаметра капель, которые достигнут стенки сепарационного элемента при изменении радиуса входа в элемент:

$$\delta = \delta_0 (1 - \tilde{r})^{0,2}, \quad (7)$$

где δ_0 – минимальный диаметр капель, достигающих стенки элемента при радиусе входа $0,01R$.

Для расчета эффективности сепарации необходимо оценить распределение частиц в потоке газа. С данной целью были выполнены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования дисперсного состава капель жидкости. Для определения дисперсного состава капель многие исследователи используют расплавы, например парафин. Для данных целей нами был выбран расплав карбамида с температурой 140°C и газовой фазой – воздух с температурой 140°C . Выбор расплава

карбамида обусловлен тем, что при температуре 140°C физико-химические свойства расплава очень близки к свойствам большинства жидкостей, а при снижении температуры расплава всего на 3° происходит его затвердевание. При температуре 136–140°C физические свойства расплава карбамида (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) близки к свойствам сульфата аммония с весовой концентрацией 30%. При охлаждении капель на 3–7° карбамид затвердевает, что облегчает задачу определения дисперсного состава.

Для выполнения экспериментальных исследований были разработаны технологическая схема и установка по исследованию эффективности центробежных сепараторов. Установка представлена на рис. 2.

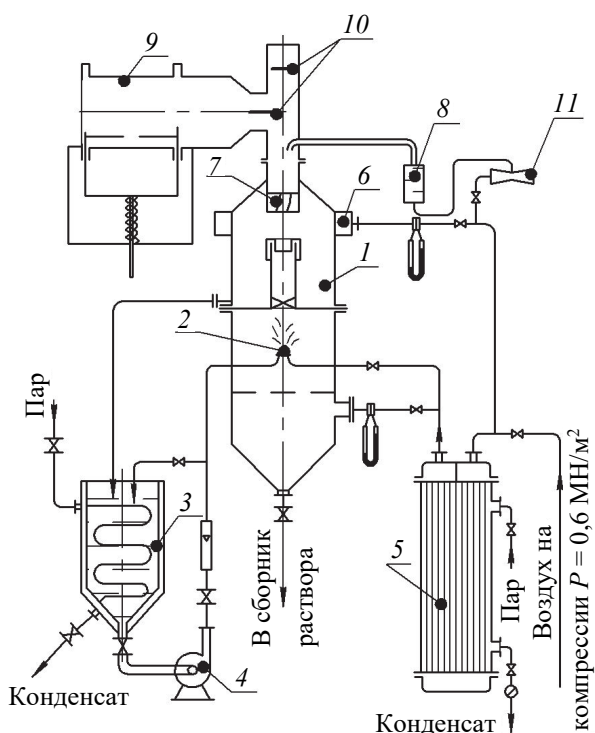


Рис. 2. Схема установки

для исследования размера капель:

- 1 – сепарационный аппарат; 2 – форсунка;
3 – плавилка; 4 – насос; 5 – теплообменник;
6 – кожух; 7 – раскручиватель; 8 – импактор;
9 – камера; 10 – заслонки; 11 – инжектор

Данная установка состоит из сепарационного элемента 1 с форсункой 2 в нижней части, плавилки карбамида 3, насоса подачи плава на форсунку 4, теплообменника для подогрева воздуха 5. В верхней части сепарационного элемента 1 приварен кожух 6 для поддува холодного воздуха, и для стабилизации потока на выходе установлен раскручиватель 7. Отбор проб твердых частиц карбамида осуществлялся с применением импактора [11], а также методом отсечки потока и осаждения частиц с использованием камеры 9.

При проведении исследований воздух из заводской сети подавался в теплообменник 5 и нагревался до температуры 140°C. После теплообменника часть воздуха подавалась на форсунку 2, а вторая часть – в аппарат 1.

Гранулированный карбамид загружался в плавилку, где при подаче пара в рубашку и змеевик нагревался до температуры 140°C, плавился и насосом 4 подавался на форсунку. Давление воздуха перед форсункой постоянно поддерживалось равным 0,4 МН/м². Расход плава на форсунку регулировался вентилем и измерялся ротаметром. Линия подачи пара и насос имели паровые рубашки и были изолированы. Расход горячего воздуха в аппарат 1 и холодного воздуха в верхний кожух 6 измерялся с помощью дифманометров и регулировался вентилями. Капли плава карбамида на выходе из форсунки подхватывались основным потоком воздуха и поднимались вверх. В верхней части аппарата поток охлаждался холодным воздухом, поступающим из кожуха 6, его температура снижалась и капли карбамида затвердевали. На выходе из аппарата газ с частицами карбамида проходил, раскручивался и поток стабилизировался.

Исследование дисперсного состава частиц с помощью импактора осуществлялось путем разборки прибора, извлечения подложек и их взвешивания. Средние значения опытов приведены в таблице.

Распределение объема частиц по размерам
в сепараторе

$\delta_i - \delta_{i+1}$, мкм	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
p_i	0,03	0,23	0,38	0,21	0,15

Экспериментальные данные описывались обобщенным гамма-распределением [12]. Методом наибольшего правдоподобия были получены статистические оценки параметров данного распределения и функция распределения объемов частиц в зависимости от их размеров:

$$F_3(\delta) = 0,513 \int_0^{\delta/25,4} t^{3,05} \exp(-t^{1,26}) dt. \quad (8)$$

Данная функция описывает распределения объемов частиц на входе в сепарационный элемент. Рассчитаем относительный объем уносимых частиц с учетом (8):

$$\begin{aligned} V_0 &= \sum F_3(\delta) \frac{2\pi R \Delta R}{\pi R^2} = 2 \sum F_3(\delta) \Delta \tilde{r} = \\ &= 2 \int_0^1 F_3(\delta_0(1-\tilde{r})^{0,2}) d\tilde{r}. \end{aligned} \quad (9)$$

График полученной зависимости в диапазоне малых размеров диаметра частиц приведен на рис. 3.

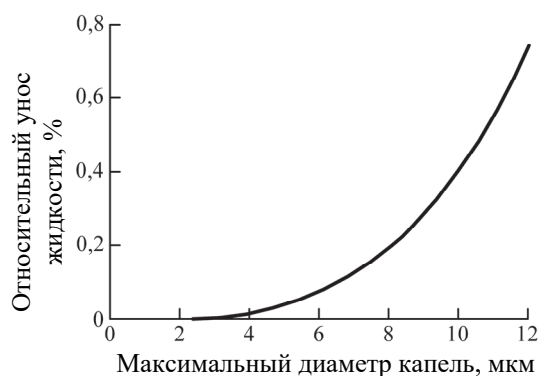


Рис. 3. Относительный унос жидкости в зависимости от максимального диаметра капель, уносимых с оси патрубка

Выводы. Исследовано влияние геометрических параметров сепарационного элемента и физико-химических свойств жидкости и газа на минимальный диаметр улавливаемых капель. Обработкой расчетных данных получен минимальный размер улавливаемых частиц. Экспериментально определен дисперсный состав частиц сепарируемой фазы и описано распределение их объемов. Выполнена оценка степени сепарации.

Полученные результаты могут быть использованы для исследования процессов разделения двухфазных потоков в вихревых аппаратах.

Список литературы

1. Трифонов В. П. Сепарация газа и сокращение потерь нефти. Казань: «Фен», 2002. 408 с.
2. Синайский Э. Г., Лапига Е. Я., Зайцев Ю. В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. М.: Недра, 2002. 620 с.
3. Шкоропад Д. Е., Новиков О. П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 256 с.
4. Левданский Э. И., Левданский А. Э. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты. Минск: БГТУ, 2001. 234 с.
5. Ушаков С. Г., Зверев Н. И. Инерционная сепарация пыли. М.: Энергия, 1974. 168 с.
6. Гольдштик М. А., Сорокин В. Н. О движении частицы в вихревой камере // Журнал прикл. механики и техн. физики. 1968. № 6. С. 149–152.
7. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 176 с.
8. Горбис З. Р., Спокойный Ф. Е. Качественный анализ уравнений осредненного движения твердых частиц в турбулентном потоке // Теоретические основы химической технологии. 1978. Т. 12. № 5. С. 729–734.
9. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
10. Волк А. М. Тонкодисперсная сепарация жидкости // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2020. № 2 (236). С. 31–36.
11. Русанов А. А., Янковский С. С. Импакторы для определения дисперсности промышленных пылей. М.: ЦНИИТЭхимнефтехим, 1970. 50 с.
12. Волк А. М. Анализ свойств статистических оценок параметров обобщенного гамма-распределения // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2023. № 2 (272). С. 9–17. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-2.

References

1. Trifonov V. P. *Separatsiya gaza i sokrashcheniye poter' nefiti* [Gas separation and reduction of oil losses]. Kazan, "Fen" Publ., 2002. 408 p. (In Russian).
2. Sinaysky E. G., Lapiga E. Y., Zaitsev Y. V. *Separatsiya mnogofaznykh mnogokomponentnykh sistem* [Separation of multiphase multicomponent systems]. Moscow, Nedra Publ., 2002. 620 p. (In Russian).
3. Shkoropad D. E., Novikov O. P. *Tsentrifugi i separatory dlya khimicheskikh proizvodstv* [Centrifuges and separators for chemical production]. Moscow Publ., 1987. 256 p. (In Russian).
4. Levdansky E. I., Levdansky A. E. *Vysokoeffektivnyye protochnyye protsessy i apparaty* [Highly efficient flow processes and apparatuses]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 234 p. (In Russian).
5. Ushakov S. G., Zverev N. I. *Inertsionnaya separatsiya pyli* [Inertial dust separation]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 168 p. (In Russian).
6. Goldstik M. A., Sorokin V. N. About particle motion in a vortex chamber. *Zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 1968, no. 6, pp. 149–152 (In Russian).
7. Mednikov E. M. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozoley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p. (In Russian).
8. Gorbis Z. R., Spokoynyy F. E. Qualitative analysis of the equations of averaged motion of solid particles in a turbulent flow. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 1978, vol. 12, no. 5, pp. 729–734 (In Russian).

9. Coy S. *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem* [Hydrodynamics of multiphase systems]. Mir Publ., 1971. 536 p. (In Russian).
10. Volk A. M. Fine-dispersed liquid separation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2020, no. 2 (236), pp. 31–36 (In Russian).
11. Rusanov A. A., Yankovsky S. S. *Impaktory dlya opredeleniya dispersnosti promyshlennykh pyley* [Impactors for determination of industrial dust dispersibility]. Moscow, TsNITEKhimneftekhim Publ., 1970. 50 p. (In Russian).
12. Volk A. M. Analysis of properties of statistical estimates of parameters of generalized gamma distribution. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2023, no. 2 (272), pp. 9–17. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-2 (In Russian).

Информация об авторах

Волк Анатолий Матвеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: volk@belstu.by

Вилькоцкий Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: andrzej.wilkocki@belstu.by

Янович Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yanovichs@belstu.by

Information about the authors

Volk Anatoliy Matveevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volk@belstu.by

Wilkocki Andrzej Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrzej.wilkocki@belstu.by

Yanovich Siarhei Vladimirovich – Senior Lecturer, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yanovichs@belstu.by

Поступила после доработки 05.02.2025

УДК 517.977

А. А. Якименко

Белорусский государственный технологический университет

**МОДАЛЬНАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ ОДНОЙ ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ
ЗАПАЗДЫВЮЩЕГО ТИПА С ТРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ**

В публикации рассмотрено решение задачи модальной управляемости для двумерной стационарной динамической системы с запаздывающим аргументом с одним входом и тремя соизмеримыми запаздываниями в одном специальном случае. Приведено определение задачи модального управления для исследуемой системы. Задача модального управления является одной из основных задач теории управления. Она заключается в приведении коэффициентов характеристического квазиполинома замкнутой системы к заданному виду. Такая задача хорошо изучена для систем без запаздывания. Для систем с запаздывающим аргументом и систем нейтрального типа решение задачи модального управления значительно сложнее. В статье получено решение поставленной задачи при определенных условиях на значения параметров исследуемой системы с запаздыванием. Также получены регуляторы по типу обратной связи, решающие задачу модального управления для рассматриваемой системы. Эти регуляторы найдены в частотной области как элементарные функции коэффициентов исходной системы. Также приведены правила, согласно которым полученные регуляторы переводятся из частотной области в регуляторы по типу обратной связи для исследуемой системы. Рассмотрен иллюстративный пример решения задачи модального управления для рассматриваемой системы. Приведен список литературы, в которой задача модального управления решается для других систем с запаздыванием и систем нейтрального типа.

Ключевые слова: запаздывающие системы, модальное управление, регуляторы, обратная связь, запаздывание, соизмеримые запаздывания.

Для цитирования: Якименко А. А. Модальная управляемость одной двумерной системы запаздывающего типа с тремя запаздываниями // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 11–15.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-2.

A. A. Yakimenka

Belarusian State Technological University

**MODAL CONTROLLABILITY OF ONE TWO-DIMENSIONAL
DELAYED SYSTEM WITH THREE DELAYS**

The publication considers the solution of the modal controllability problem for a two-dimensional stationary dynamic system with a retarded argument with one input and three commensurate delays in one special case. The definition of the modal control problem for the system under study is given. The modal control problem is one of the main problems of control theory. It consists in reducing the coefficients of the characteristic quasi-polynomial of a closed system to a given form. Such a problem has been well studied for systems without delay. For systems with a retarded argument and neutral type systems, the solution of the modal control problem is much more complicated. In the article, a solution to the problem is obtained under certain conditions on the values of the parameters of the system with delay. Also, feedback-type controllers are obtained that solve the modal control problem for the system under study. These controllers are found in the frequency domain as elementary functions of the coefficients of the original system. The rules according to which the obtained regulators are transferred from the frequency domain to the feedback type regulators for the system under study are also given. An illustrative example of solving the modal control problem for the system under consideration is considered. A list of literature is given in which the modal control problem is solved for other systems with delay and neutral type systems.

Keywords: delayed systems, modal control, regulators, feedback control, delay, commensurate delays.

For citation: Yakimenka A. A. Modal controllability of one two-dimensional delayed system with three delays. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 11–15 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-2.

Введение. Задача модального управления является одной из основных задач теории управления. Такая задача достаточно хорошо изучена для

систем без запаздывания. Для систем с запаздывающим аргументом и систем нейтрального типа [1–8] решение задачи модального управления

значительно сложнее. В данной работе решается задача модального управления для двумерной стационарной динамической системы с одним входом и тремя соизмеримыми запаздываниями в одном специальном случае. Получены регуляторы по принципу обратной связи, решающие задачу модального управления. Такие регуляторы в частотной области являются элементарными функциями коэффициентов рассматриваемой системы. Приведен иллюстративный пример решения такой задачи.

Основная часть. Рассмотрим линейную стационарную систему с запаздывающим аргументом с одним входом и тремя соизмеримыми запаздываниями:

$$\dot{x}(t) = \sum_{j=0}^3 A_j x(t-jh) + bu(t), \quad (1)$$

где A_j , $j = 0, 1, 2, 3$ – постоянные (2×2) -матрицы; $h > 0$ – постоянное запаздывание; b – постоянный 2-вектор; u – скалярное управление. Не ограничивая общности, можно считать, что $b' = (0 \ 1)$ (штрих $(\cdot)$ означает транспонирование).

Характеристическое уравнение разомкнутой (с нулевым управлением) системы (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \det[\lambda I_2 - A_0 - A_1 e^{-\lambda h} - A_2 e^{-2\lambda h} - A_3 e^{-3\lambda h}] &\equiv \\ \equiv \lambda^2 + (\alpha_{10} + \alpha_{11} e^{-\lambda h} + \alpha_{12} e^{-2\lambda h} + \alpha_{13} e^{-3\lambda h}) \lambda + \\ + \alpha_{00} + \alpha_{01} e^{-\lambda h} + \alpha_{02} e^{-2\lambda h} + \alpha_{03} e^{-3\lambda h} + \\ + \alpha_{04} e^{-4\lambda h} + \alpha_{05} e^{-5\lambda h} + \alpha_{06} e^{-6\lambda h} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda \in \mathbb{C}$, $e^{-j\lambda h}$ – оператор сдвига ($e^{-j\lambda h} x(t) \equiv x(t-jh)$).

Присоединим к системе (1) регулятор вида

$$u(t) = \sum_{j=0}^M q'_j x(t-jh) + \int_{-lh}^0 g'(s) x(t+s) ds, \quad (3)$$

где $l, M \in \mathbb{N}$, $q_j, j = 0, 1, \dots, M-2$ – векторы; $g(s), s \in [-h, 0]$ – непрерывная 2-вектор-функция.

В частотной области регулятор (3) имеет вид

$$U(\lambda) = \sum_{j=0}^M q'_j e^{-j\lambda h} + G(\lambda), \quad (4)$$

где $G(\lambda)$ – целая функция, определяющая интегральную часть (3).

Определение. Система (1) модально управляема регулятором вида (3), если для наперед заданных чисел $\tilde{\alpha}_{ij}, i = 0, j = 0, 6; i = 1, j = 0, 1, 2, 3$ найдется такой регулятор, при котором характеристическое

уравнение замкнутой системы (1), (3) будет иметь вид (сравните с формулой (2)):

$$\begin{aligned} \det[\lambda I_2 - A_0 - A_1 e^{-\lambda h} - A_2 e^{-2\lambda h} - A_3 e^{-3\lambda h} - bU(\lambda)] &\equiv \\ \equiv \lambda^2 + (\tilde{\alpha}_{10} + \tilde{\alpha}_{11} e^{-\lambda h} + \tilde{\alpha}_{12} e^{-2\lambda h} + \tilde{\alpha}_{13} e^{-3\lambda h}) \lambda + \\ + \tilde{\alpha}_{00} + \tilde{\alpha}_{01} e^{-\lambda h} + \tilde{\alpha}_{02} e^{-2\lambda h} + \tilde{\alpha}_{03} e^{-3\lambda h} + \\ + \tilde{\alpha}_{04} e^{-4\lambda h} + \tilde{\alpha}_{05} e^{-5\lambda h} + \tilde{\alpha}_{06} e^{-6\lambda h} &= 0. \end{aligned}$$

Пусть

$$\mu_1 = \tilde{\alpha}_{10} + \tilde{\alpha}_{11} m + \tilde{\alpha}_{12} m^2 + \tilde{\alpha}_{13} m^3; \quad (5)$$

$$\mu_2 = \sum_{j=0}^6 \tilde{\alpha}_{0j} m^j, \quad (6)$$

где $\tilde{\alpha}_{ij}, i = 0, j = 0, 6; i = 1, j = 0, 1, 2, 3$ – произвольные числа. Тогда система (1), замкнутая регулятором, решающим задачу модального управления, имеет следующее характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + \mu_1 \lambda + \mu_2 = 0. \quad (7)$$

Обозначим $m = e^{-\lambda h}$ – оператор сдвига ($mx(t) = x(t-h)$), $A(m) = A_0 + A_1 m + A_2 m^2 + A_3 m^3$. Не ограничивая общности, можно считать, что матрица $A(m)$ имеет вид

$$A(m) = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 m + a_2 m^2 & b_0 + b_1 m + b_2 m^2 + m^3 \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} a_{21}(m) &= a_{210} + a_{211} m + a_{212} m^2 + a_{213} m^3; \\ a_{22}(m) &= a_{220} + a_{221} m + a_{222} m^2 + a_{223} m^3. \end{aligned} \quad (8)$$

В данной работе рассмотрим случай

$$a_1 = a_2 = 0. \quad (9)$$

Тогда матрица $A(m)$ примет вид

$$A(m) = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 + b_1 m + b_2 m^2 + m^3 \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix}.$$

Регулятор, решающий задачу модального управления, представим в виде

$$\begin{aligned} U(\lambda, m) &= [u_1(\lambda, m) \quad u_2(\lambda, m)] = \\ &= [\eta_{11}(m) - a_{21}(m) \quad \eta_2(\lambda, m) - a_{22}(m)], \end{aligned} \quad (10)$$

где $\eta_{11}(m)$ – полином относительно m .

Компоненту $\eta_2(\lambda, m)$ регулятора (10) разделим на дифференциально-разностную (ей

соответствует некоторый квазиполином) и интегральную части:

$$\eta_2(\lambda, m) = \eta_{21}(m) + \eta_{22}(\lambda, m), \quad (11)$$

где $\eta_{21}(m)$ – полином относительно m ; $\eta_{22}(\lambda, m)$ соответствует интегральной части. Будем искать эту функцию в следующем виде:

$$\eta_{22}(\lambda, m) = (c_1 + c_2 m + c_3 m^2) \frac{m-k}{\lambda-a_0},$$

где $k = e^{-a_0 h}$; c_1, c_2, c_3 – некоторые числа, подлежащие определению. Характеристическое уравнение замкнутой регулятором (10) системы (1) примет вид

$$\begin{vmatrix} a_0 - \lambda & b_0 + b_1 m + b_2 m^2 + m^3 \\ \eta_{11} & \eta_{21} + (c_1 + c_2 m + c_3 m^2) \frac{m-k}{\lambda-a_0} - \lambda \end{vmatrix} \equiv \\ \equiv \lambda^2 + (-a_0 - \eta_{21})\lambda - \eta_{11}m^3 - b_1\eta_{11}m - b_2\eta_{11}m^2 + \\ + c_2km - c_2m^2 + c_3m^2k - c_3m^3 + \\ + \eta_{21}a_0 - b_0\eta_{11} + c_1k - c_1m = 0.$$

Чтобы получить для замкнутой системы характеристическое уравнение (7), выберем в качестве η_{21} следующий квазиполином:

$$\eta_{21} = -a_0 - \mu_1,$$

где μ_1 определен в формуле (5).

Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы примет вид

$$\lambda^2 + \mu_1\lambda - \eta_{11}m^3 - b_2\eta_{11}m^2 + c_2km - c_2m^2 - a_0^2 + \\ + c_3m^2k - c_3m^3 - \mu_1a_0 - b_0\eta_{11} + c_1k - c_1m = 0.$$

Чтобы последнее уравнение имело вид (7), нужно выполнение равенства

$$-\eta_{11}m^3 - b_2\eta_{11}m^2 + c_2km - c_2m^2 - a_0^2 + \\ + c_3m^2k - c_3m^3 - \mu_1a_0 - b_0\eta_{11} + c_1k - c_1m = \mu_2.$$

Выразив отсюда η_{21} η_{11} , получим

$$\eta_{11} = \frac{-\mu_2 + c_2km - c_2m^2 + c_3m^2k}{b_0 + b_1m + b_2m^2 + m^3} + \\ + \frac{-c_3m^3 - a_0^2 - \mu_1a_0 + c_1k - c_1m}{b_0 + b_1m + b_2m^2 + m^3}. \quad (12)$$

Последняя дробь в общем случае не является полиномом относительно m . Подберем c_1, c_2 и c_3 так, чтобы правая часть формулы (12) стала полиномом. Для этого вначале выделим целую часть в формуле (12).

$$\eta_{11} = -c_3 +$$

$$+ \frac{b_2c_3m^2 + c_3m^2k + b_1c_3m + c_2km - c_2m^2 - a_0^2}{b_0 + b_1m + b_2m^2 + m^3} + \\ + \frac{-\mu_1a_0 + b_0c_3 + c_1k - c_1m - \mu_2}{b_0 + b_1m + b_2m^2 + m^3}.$$

Потребуем, чтобы числитель последней дроби был бы равен нулю. Имеем

$$b_2c_3m^2 + c_3m^2k + b_1c_3m + c_2km - c_2m^2 - a_0^2 - \\ - \mu_1a_0 + b_0c_3 + c_1k - c_1m - \mu_2 \equiv \\ \equiv (b_2c_3 + c_3k - c_2)m^2 + (b_1c_3 + c_2k - c_1)m - \\ - a_0^2 - \mu_1a_0 + b_0c_3 + c_1k - \mu_2 = 0.$$

Отсюда видно, что в качестве c_2 можно взять

$$c_2 = b_2c_3 + c_3k, \quad (13)$$

а в качестве c_1 возьмем

$$c_1 = b_1c_3 + c_2k. \quad (14)$$

Тогда с учетом соотношений (13), (14)

$$b_2c_3m^2 + c_3m^2k + b_1c_3m + c_2km - c_2m^2 - a_0^2 - \\ - \mu_1a_0 + b_0c_3 + c_1k - c_1m - \mu_2 \equiv \\ \equiv (b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3)c_2 - a_0^2 - a_0\mu_1 - \mu_2 = 0.$$

Отсюда

$$c_2 = \frac{a_0^2 + a_0\mu_1 + \mu_2}{b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3}. \quad (15)$$

Нетрудно увидеть, что для того, чтобы c_2 из формулы (15) было полиномом относительно m , необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие

$$b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3 \neq 0. \quad (16)$$

С учетом того, что

$$\eta_{22}(\lambda, m) = (c_1 + c_2m + c_3m^2) \frac{m-k}{\lambda-a_0},$$

и принимая во внимание (13), (14), (15), после несложных преобразований получим

$$\eta_{22}(\lambda, m) = \frac{(a_0^2 + \mu_1a_0 + \mu_2)}{b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3} \times \\ \times \frac{(b_2k + mb_2 + k^2 + km + m^2 + b_1)(m-k)}{\lambda - a_0}.$$

Таким образом, с учетом (10) регуляторы в частотной области

$$u_1(\lambda, m) = -\frac{a_0^2 + a_0\mu_1 + \mu_2}{b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3} - a_{21}(m); \quad (17)$$

$$u_2(\lambda, m) = -a_0 - \mu_1 - a_{22}(m) + \frac{(a_0^2 + \mu_1a_0 + \mu_2)}{b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3} \times \frac{(b_2k + mb_2 + k^2 + km + m^2 + b_1)(m - k)}{\lambda - a_0}. \quad (18)$$

решают задачу модального управления для системы (1) при выполнении условия (16).

Отсюда видна справедливость следующей теоремы

Теорема. Для того чтобы система (1) была модально управляема регулятором вида (3) в случае (9), необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие (16). При этом регуляторы, решающие задачу модального управления, в частотной области имеют вид (17), (18).

При переходе от регуляторов в частотной области к регуляторам вида (3) нужно следовать следующим правилам.

1. Слагаемым вида $m^i x_j$ соответствует

$$x_j(t - ih).$$

2. Слагаемым вида $\mu_1 x_j$ соответствует

$$\tilde{\alpha}_{10}x_j(t) + \tilde{\alpha}_{11}x_j(t - h) + \tilde{\alpha}_{12}x_j(t - 2h) + \tilde{\alpha}_{13}x_j(t - 3h).$$

3. Слагаемым вида $\mu_2 x_j$ соответствует

$$\tilde{\alpha}_{00}x_j(t) + \tilde{\alpha}_{01}x_j(t - h) + \tilde{\alpha}_{02}x_j(t - 2h) + \tilde{\alpha}_{03}x_j(t - 3h) + \tilde{\alpha}_{04}x_j(t - 4h) + \tilde{\alpha}_{05}x_j(t - 5h) + \tilde{\alpha}_{06}x_j(t - 6h).$$

4. Слагаемым вида $\frac{m - k}{\lambda - \xi} x_j$ соответствует

$$\int_{-h}^0 H(t + s)H(h + s)e^{-(h+s)\xi} x_j(t + s) ds,$$

где $H(t)$ – функция Хевисайда.

5. Слагаемым вида $m^l \cdot \frac{m - k}{\lambda - \xi} x_j$ соответствует

$$\int_{-(l+1)h}^{-lh} H(t + s)H((l+1)h + s)e^{-((l+1)h+s)\xi} x_j(t + s) ds, \quad l = 1, 2.$$

Пример. Рассмотрим систему (1) с матрицами

$$A_0 = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ a_{210} & a_{220} \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ a_{211} & a_{221} \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 4 \\ a_{212} & a_{222} \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{213} & a_{223} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда матрица $A(m)$ имеет вид

$$A(m) = \begin{bmatrix} 2 & 3 + 2m + 4m^2 + m^3 \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix},$$

где

$$a_{21}(m) = a_{210} + a_{211}m + a_{212}m^2 + a_{213}m^3;$$

$$a_{22}(m) = a_{220} + a_{221}m + a_{222}m^2 + a_{223}m^3.$$

Обозначим $k = e^{-a_0 h} = e^{-2h} \in \mathbb{R}$. Проверим выполнение условия (16):

$$b_0 + b_1k + b_2k^2 + k^3 = 3 + 2e^{-2h} + 4e^{-4h} + e^{-8h} > 0.$$

Условие (16) выполнено. Тогда регуляторы (17), (18) примут вид

$$u_1(\lambda, m) = -\frac{4 + 2\mu_1 + \mu_2}{3 + 2k + 4k^2 + k^3} - a_{210} - a_{211}m - a_{212}m^2 - a_{213}m^3;$$

$$u_2(\lambda, m) = -2 - \mu_1 - a_{220} - a_{221}m - a_{222}m^2 - a_{223}m^3 + \frac{(4 + 2\mu_1 + \mu_2)}{3 + 2k + 4k^2 + k^3} \times \frac{(4k + 4m + k^2 + km + m^2 + 2)(m - k)}{\lambda - 2}.$$

Нетрудно проверить, что система (1), замкнутая этим регулятором, имеет характеристическое уравнение вида

$$\lambda^2 + \mu_1\lambda + \mu_2 = 0,$$

где μ_1, μ_2 определены в формулах (5), (6).

Заключение. В статье получен способ нахождения регуляторов по принципу обратной связи, решающих задачу модального управления для двумерной системы запаздывающего типа с тремя соизмеримыми запаздываниями и одним входом в случае (9). Указаны дополнительные условия существования таких регуляторов. Также приведен иллюстративный пример.

Список литературы

1. Марченко В. М. О проблеме модального управления в линейных системах с запаздыванием // Доклады Академии наук БССР. 1978. № 5. С. 401–404.
2. Якименко А. А. Модальное управление одной запаздывающей системой // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 3–7.
3. Якименко А. А. Модальное управление одной системой нейтрального типа // Труды БГТУ. 2016. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 18–21.
4. Якименко А. А. Модальное управление одной системой нейтрального типа в общециклическом случае // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2017. № 2. С. 25–27.
5. Якименко А. А. Модальное управление одной системой нейтрального типа в общециклическом случае при кратных корнях // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 1 (206). С. 5–8.
6. Якименко А. А. Модальная управляемость одной двумерной системы запаздывающего типа // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2023. № 1 (266). С. 15–19. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-266-1-3.
7. Якименко А. А. Модальная управляемость одной двумерной системы запаздывающего типа в случае кратных корней // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2023. № 2 (272). С. 18–22. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-3.
8. Якименко А. А. Модальная управляемость одной двумерной системы запаздывающего типа в специальном случае // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 2 (284). С. 5–9. DOI: 10.52065/2520-6141-2024-284-1.

References

1. Marchenko V. M. On problem of modal control in linear systems with delay. *Doklady Akademii nauk BSSR* [Reports of the BSSR Academy of Science], 1978, no. 5, pp. 401–404 (In Russian).
2. Yakimenka A. A. Modal control for one delayed system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 3–7 (In Russian).
3. Yakimenka A. A. Modal control for one neutral type system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 18–21 (In Russian).
4. Yakimenka A. A. Modal control for one neutral type system in general cyclic case. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2017, no. 2, pp. 25–27 (In Russian).
5. Yakimenka A. A. Modal control for one neutral type system in general cyclic case with double roots. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 1, pp. 5–8 (In Russian).
6. Yakimenka A. A. Modal controllability of one two-dimensional delayed system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2023, no. 1 (266), pp. 15–19. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-266-1-3 (In Russian).
7. Yakimenka A. A. Modal controllability of one two-dimensional delayed system in the case of multiple roots. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2023, no. 2 (272), pp. 18–22. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-3 (In Russian).
8. Yakimenka A. A. Modal controllability of one two-dimensional delayed system in a special case. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2024, no. 2 (284), pp. 5–9. DOI: 10.52065/2520-6141-2024-284-1 (In Russian).

Информация об авторе

Якименко Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakimenko@belstu.by

Information about the author

Yakimenka Andrei Aliaksandravich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakimenko@belstu.by

Поступила после доработки 17.11.2024

УДК 514.765.1

Н. П. Можей

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

РЕДУКТИВНЫЕ ПРОСТРАНСТВА С РАЗРЕШИМОЙ ГРУППОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, НЕ ДОПУСКАЮЩИЕ ЭКВИАФФИННЫХ СВЯЗНОСТЕЙ

Во введении указан объект исследования – связности на редуктивных пространствах. В случае, если на многообразии транзитивно действует группа Ли, такое многообразие называется однородным пространством, если однородное пространство является редуктивным, то оно всегда допускает инвариантную связность. Если же существует хотя бы одна инвариантная аффинная связность, то пространство является изотропно-точным.

Цель работы – изучение трехмерных редуктивных однородных пространств, не допускающих эквиваффинных связностей. Рассматривается случай изотропно-точных пространств, на которых действует разрешимая группа преобразований. Для трехмерных редуктивных однородных пространств, допускающих нормальную связность, изучается вопрос, при каких условиях данное пространство не допускает эквиваффинных связностей. Определены основные понятия: однородное пространство, аффинная (инвариантная) связность, тензор кручения, тензор кривизны, тензор Риччи, редуктивное пространство, алгебра голономии, нормальная связность, эквиваффинная связность. В основной части работы найдены и приведены в явном виде трехмерные редуктивные однородные пространства, допускающие нормальную связность, но не допускающие эквиваффинную, что эквивалентно описанию соответствующих эффективных пар алгебр Ли. Дополнительно выписаны сами инвариантные связности и тензоры Риччи.

Ключевые слова: группа преобразований, редуктивное пространство, нормальная связность, тензор Риччи, эквиваффинная связность.

Для цитирования: Можей Н. П. Редуктивные пространства с разрешимой группой преобразований, не допускающие эквиваффинных связностей // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 16–19.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-3.

N. P. Mozhey

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

REDUCTIVE SPACES WITH A SOLVABLE GROUP OF TRANSFORMATIONS THAT DO NOT ADMIT EQUIAFFINE CONNECTIONS

In the introduction, the object of research is indicated – connections on reductive spaces. If a Lie group acts transitively on a manifold, such manifold is called the homogeneous space, if a homogeneous space is reductive, then it always admits invariant connection. If there exists at least one invariant affine connection, then the space is isotropically-faithful.

The aim of the work is to study three-dimensional reductive homogeneous spaces that do not admit equiaffine connections. The case of isotropically-faithful spaces on which a solvable group of transformations operates is considered. For three-dimensional reductive homogeneous spaces admitting normal connection, the question is studied under what conditions this space does not admit equiaffine connections. The basic notions are defined: homogeneous space, affine (invariant) connection, torsion tensor, curvature tensor, Ricci tensor, reductive space, holonomy algebra, normal connection, equiaffine connection. In the main part of the work, three-dimensional reductive homogeneous spaces that admit normal connection but do not admit equiaffine are found and explicitly presented, which is equivalent to describing the corresponding effective pairs of Lie algebras. Additionally, the invariant connections and Ricci tensors themselves are written out.

Keywords: group of transformations, reductive space, normal connection, Ricci tensor, equiaffine connection.

For citation: Mozhey N. P. Reductive spaces with a solvable group of transformations that do not admit equiaffine connections. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 16–19 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-3.

Введение. Класс пространств с симметрическим тензором Риччи значительно шире класса римановых пространств, это так называемые пространства эквивариантной связности. Они, в сущности, не обладают метрикой, но в их касательных пространствах можно ввести измерение объемов так, чтобы объем n -мерного параллелепипеда, построенного на n векторах, сохранялся при параллельном перенесении этих векторов по любому пути. Цель работы – определить пространства, не допускающие эквивариантных связностей.

Инвариантные связности на редуктивных однородных пространствах изучались П. К. Рашевским, М. Куритой, Э. Б. Винбергом, Ш. Кобаяси, К. Номидзу [1] и др. В статье исследуется существование и свойства инвариантных связностей на однородных пространствах. Результаты Вана [2] применяются к ситуации, когда существует инвариантная структура на редуктивном однородном пространстве.

Аффинная связность является эквивариантной, если допускает параллельную форму объема (см. [3]). Трехмерные редуктивные однородные пространства разрешимых групп Ли изучались в работе [4]. В данной публикации определяется, при каких условиях пространство допускает нормальную связность, но не допускает эквивариантную.

Основная часть. Пусть M – дифференцируемое многообразие, на котором транзитивно действует группа $\bar{G}$, $G = \bar{G}_x$ – стабилизатор произвольной точки $x \in M$, $\bar{g}$ – алгебра Ли группы Ли $\bar{G}$, а $\mathfrak{g}$ – подалгебра, соответствующая подгруппе G .

Пространство $\bar{G}/G$ редуктивно, если алгебра Ли $\bar{g}$ может быть разложена в прямую сумму векторных пространств – алгебры Ли $\mathfrak{g}$ и $\text{ad}(G)$ -инвариантного подпространства $\mathfrak{m}$, т. е. если $\bar{g} = \mathfrak{g} + \mathfrak{m}$, $\mathfrak{g} \cap \mathfrak{m} = 0$, $\text{ad}(G)\mathfrak{m} \subset \mathfrak{m}$. Второе условие влечет $[\mathfrak{g}, \mathfrak{m}] \subset \mathfrak{m}$ и наоборот, если G связна. Там, где это не будет вызывать разночтения, будем отождествлять подпространство, дополнительное к $\mathfrak{g}$ в $\bar{g}$, и факторпространство $\mathfrak{m} = \bar{g}/\mathfrak{g}$. Аффинной связностью на паре $(\bar{g}, \mathfrak{g})$ называется такое отображение $\Lambda: \bar{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$, что его ограничение на $\mathfrak{g}$ есть изотропное представление подалгебры $\mathfrak{g}$, а все отображение является $\mathfrak{g}$ -инвариантным. Если $\bar{G}/G$ редуктивно, то оно всегда допускает инвариантную связность и линейное представление изотропии для G всегда точное. Тензор кручения $T \in \text{Inv}T_2^1(\mathfrak{m})$ и тензор кривизны $R \in \text{Inv}T_3^1(\mathfrak{m})$ имеют вид

$$T(x_m, y_m) = \Lambda(x)y_m - \Lambda(y)x_m - [x, y]_m;$$

$$R(x_m, y_m) = [\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y])$$

для всех $x, y \in \bar{g}$.

Будем говорить, что Λ имеет нулевое кручение или является связностью без кручения, если $T = 0$.

Определим тензор Риччи: $\text{Ric}(y, z) = \text{tr}\{x \mapsto R(x, y)z\}$. Алгебра Ли $\mathfrak{h}^*$ группы голономии инвариантной связности $\Lambda: \bar{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$ на паре $(\bar{g}, \mathfrak{g})$ – это подалгебра алгебры Ли $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$ следующего вида: $V + [\Lambda(\bar{g}), V] + [\Lambda(\bar{g}), [\Lambda(\bar{g}), V]] + \dots$, где V – подпространство, порожденное множеством $\{[\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y]) \mid x, y \in \bar{g}\}$. Положим $\mathfrak{a}$ равной подалгебре в $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$, порожденной $\{\Lambda(x) \mid x \in \mathfrak{g}\}$. Связность нормальна, если $\mathfrak{h}^* = \mathfrak{a}$. Понятие нормальной связности ввел Э. Картан (для риманова многообразия, см. [5]). Будем говорить, что аффинная связность Λ является локально эквивариантной, если $\text{tr}\Lambda([x, y]) = 0$ для всех $x, y \in \bar{g}$, то есть $\Lambda([\bar{g}, \bar{g}]) \subset \mathfrak{sl}(\mathfrak{m})$. Аффинная связность Λ с нулевым кручением имеет симметрический тензор Риччи тогда и только тогда, когда она локально эквивариантна.

Под эквивариантной связностью будем понимать аффинную связность Λ (без кручения), для которой $\text{tr}\Lambda(x) = 0$ для всех $x \in \bar{g}$. В этом случае очевидно, что $\Lambda(\bar{g}) \subset \mathfrak{sl}(\mathfrak{m})$.

Будем описывать пару $(\bar{g}, \mathfrak{g})$ при помощи таблицы умножения алгебры $\bar{g}$, через $\{e_1, \dots, e_n, u_1, u_2, u_3\}$ обозначим базис $\bar{g}$ ($n = \dim \mathfrak{g}$). Будем полагать, что подалгебра $\mathfrak{g}$ порождается векторами $e_1, \dots, e_n$, а $\{u_1, u_2, u_3\}$ – базис $\mathfrak{m}$. Для нумерации подалгебр используем запись $d.n$, а для нумерации пар – запись $d.n.m$, соответствующие приведенным в статье [4], здесь d – размерность подалгебры, n – номер подалгебры в $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$, а m – номер пары $(\bar{g}, \mathfrak{g})$.

Теорема. Все трехмерные редуктивные однородные пространства, допускающие нормальную связность, но не допускающие эквивариантную, такие, что $\bar{g}$ разрешима, а $\dim \mathfrak{g} > 1$, локально имеют следующий вид:

2.9.4, $\mu = 0$	$\begin{array}{c ccccc} & e_1 & e_2 & u_1 & u_2 & u_3 \\ \hline e_1 & 0 & e_2 & u_1 & 0 & 0 \\ e_2 & -e_2 & 0 & 0 & 0 & u_1 \\ u_1 & -u_1 & 0 & 0 & u_1 & 0 \\ u_2 & 0 & 0 & -u_1 & 0 & -u_3 \\ u_3 & 0 & -u_1 & 0 & u_3 & 0 \end{array}$
2.9.5, 2.9.6	$\begin{array}{c ccccc} & e_1 & e_2 & u_1 & u_2 & u_3 \\ \hline e_1 & 0 & e_2 & u_1 & 0 & 0 \\ e_2 & -e_2 & 0 & 0 & 0 & u_1 \\ u_1 & -u_1 & 0 & 0 & 0 & \pm e_2 \\ u_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha u_2 \\ u_3 & 0 & -u_1 & \mp e_2 & -\alpha u_2 & 0 \end{array}, \alpha \geq 0$
2.9.7	$\begin{array}{c ccccc} & e_1 & e_2 & u_1 & u_2 & u_3 \\ \hline e_1 & 0 & e_2 & u_1 & 0 & 0 \\ e_2 & -e_2 & 0 & 0 & 0 & u_1 \\ u_1 & -u_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_2 \\ u_3 & 0 & -u_1 & 0 & -u_2 & 0 \end{array}$

Доказательство для случая нормальной связности приведено в работе [4]. Выберем из пространств, найденных в [4], те, которые не допускают эквиаффинных связностей.

Будем описывать связность через образы базисных векторов $\Lambda(u_1)$, $\Lambda(u_2)$, $\Lambda(u_3)$. В частности, для пар 2.9.4 ($\mu = 0$), 2.9.5, 2.9.6, 2.9.7 аффинные связности имеют вид

$$\begin{aligned}\Lambda(u_1) &= \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ \Lambda(u_2) &= \begin{pmatrix} q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & q_{23} \\ 0 & 0 & q_{11} \end{pmatrix}, \\ \Lambda(u_3) &= \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & r_{22} & r_{23} \\ 0 & p_{12} & r_{11} + p_{13} \end{pmatrix},\end{aligned}$$

где $p_{i,j}$, $q_{i,j}$, $r_{i,j} \in \mathbb{R}$, $i, j = \overline{1,3}$. В табл. 1 приведены тензоры кручения указанных связностей.

Таблица 1

Тензоры кручения

Пара	Тензоры кручения $T(u_1, u_2)$, $T(u_1, u_3)$, $T(u_2, u_3)$
2.9.4 при $\mu = 0$	$(p_{12} - q_{11} - 1, 0, 0), (p_{13} - r_{11}, 0, 0),$ $(0, q_{23} - r_{22}, q_{11} - p_{12} + 1)$
2.9.5, 2.9.6	$(p_{12} - q_{11}, 0, 0), (p_{13} - r_{11}, 0, 0),$ $(0, q_{23} - r_{22} - \alpha, q_{11} - p_{12})$
2.9.7	$(p_{12} - q_{11}, 0, 0), (p_{13} - r_{11}, 0, 0),$ $(0, q_{23} - r_{22} - 1, q_{11} - p_{12})$

Находим тензоры Риччи (см. табл. 2). Тогда локально эквиаффинные связности (без кручения) на трехмерных редуктивных однородных пространствах разрешимых групп Ли, приведенных в теореме, принимают вид, записанный в табл. 3.

Во всех приведенных случаях $\text{tr} \Lambda(e_1) \neq 0$, поэтому пары не допускают эквиаффинных связностей. Прямыми вычислениями получаем, что других трехмерных редуктивных однородных пространств, допускающих нормальную связность, но не допускающих эквиаффинную, таких, что $\bar{\mathfrak{g}}$ разрешима, а $\dim \mathfrak{g} > 1$, не существует.

Таблица 2

Тензоры Риччи

Пара	Тензоры Риччи
2.9.4 при $\mu = 0$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} - 2p_{1,2} & 2p_{1,2}q_{2,3} - 2p_{1,3} - r_{1,1} \\ 0 & p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} + r_{2,2} & p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} + r_{2,3} \end{pmatrix}$
2.9.5	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & \alpha q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,3} \\ 0 & -\alpha q_{2,2} + p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} & S \end{pmatrix},$ $S = -\alpha q_{2,3} + p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} - 1$
2.9.6	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & \alpha q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,3} \\ 0 & -\alpha q_{2,2} + p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} & S \end{pmatrix},$ $S = -\alpha q_{2,3} + p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} + 1$
2.9.7	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{1,2}q_{1,1} + 2p_{1,2}q_{2,2} & 2p_{1,2}q_{2,3} + q_{1,1} \\ 0 & p_{1,2}p_{1,3} + p_{1,2}q_{2,3} - p_{1,2}r_{1,1} + p_{1,2}r_{2,2} - q_{2,2} & p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 + p_{1,3}q_{2,3} - q_{1,1}r_{2,3} + q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} - q_{2,3}r_{2,2} - q_{2,3} \end{pmatrix}$

Таблица 3

Локально эквиаффинные связности

Пара	Локально эквиаффинная связность (без кручения) $\Lambda(u_1)$, $\Lambda(u_2)$, $\Lambda(u_3)$
2.9.4 при $\mu = 0$	$\begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{1,2} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & -3p_{13} \\ 0 & 0 & p_{1,2} - 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{13} & 0 & 0 \\ 0 & -3p_{13} & r_{23} \\ 0 & p_{12} & 2p_{13} \end{pmatrix}$

Окончание табл. 3

Пара	Локально эквивариантная связность (без кручения) $\Lambda(u_1)$, $\Lambda(u_2)$, $\Lambda(u_3)$
2.9.5, 2.9.6	$\begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & q_{23} \\ 0 & 0 & p_{1,2} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{13} & 0 & 0 \\ 0 & q_{23} - \alpha & r_{23} \\ 0 & p_{12} & 2p_{13} \end{pmatrix}, \text{при } \alpha \neq 0 \quad q_{22} = -2p_{12}$
2.9.7	$\begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{12} & q_{23} \\ 0 & 0 & p_{1,2} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{13} & 0 & 0 \\ 0 & q_{23} - 1 & r_{23} \\ 0 & p_{12} & 2p_{13} \end{pmatrix}$

Заключение. Для трехмерных редуктивных однородных пространств, допускающих нормальную связность, определено, при каких условиях данное пространство не допускает эквивариантных связно-

стей, соответствующие пространства найдены и выписаны в явном виде, рассмотрен случай разрешимой группы преобразований. Дополнительно приведены инвариантные связности и тензоры Риччи.

Список литературы

1. Кобаяси Ш., Номидзу К. Основы дифференциальной геометрии: в 2 т. М.: Наука, 1981. 2 т.
2. Wang H. C. On invariant connections over a principal fibre bundle // Nagoya Math. J. 1958. No. 13. P. 1–19.
3. Nomizu K., Sasaki T. Affine differential geometry. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 263 p.
4. Можей Н. П. Трехмерные редуктивные пространства разрешимых групп Ли // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2016. № 6 (99). С. 74–81.
5. Картан Э. Риманова геометрия в ортогональном репере. М.: Моск. ун-т, 1960. 307 с.

References

1. Kobayasi Sh., Nomidzu K. *Osnovy differentsial'noy geometrii: v 2 t.* [Foundations of differential geometry: in 2 vol.]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 2 vol. (In Russian).
2. Wang H. C. On invariant connections over a principal fibre bundle. *Nagoya Math. J.*, 1958, no. 13, pp. 1–19.
3. Nomizu K., Sasaki T. Affine differential geometry. Cambridge, Cambridge Univ. Press Publ., 1994. 263 p.
4. Mozhey N. P. Three-dimensional reductive spaces of solvable Lie groups. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya Gomel State University], 2016, no. 6 (99), pp. 74–81 (In Russian).
5. Kartan E. *Rimanova geometriya v ortogonal'nom repere* [Riemannian geometry in an orthogonal frame]. Moscow, Moskovskiy universitet Publ., 1960. 307 p.

Информация об авторе

Можей Наталья Павловна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mozheynatalya@mail.ru

Information about the author

Mozhey Natalya Pavlovna – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Software for Information Technologies. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6 P. Brovki str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mozheynatalya@mail.ru

Поступила после доработки 15.10.2024

УДК 535.34+535.35+535.372

О. И. Лазовская, И. В. Вершиловская, В. Н. Леонтьев, О. С. Игнатовец, Н. Н. Крук
Белорусский государственный технологический университет

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ NO₂-ЗАМЕЩЕННЫХ ПОРФИРИНОВ

Методами абсорбционной и люминесцентной спектроскопии исследованы спектрально-люминесцентные характеристики NO₂-замещенных порфиринов, различающихся количеством присоединенных нитрогрупп и архитектурой периферического замещения. Обнаружено, что присоединение двух нитрогрупп непосредственно к C_m-атомам углерода порфиринового макроцикла приводит к значительным bathochromic сдвигам полос в спектрах поглощения и их уширению. Установлено, что наблюдаемые изменения обусловлены дестабилизацией верхних заполненных молекулярных орбиталей (ВЗМО) макроцикла и вращением нитрогрупп, которое модулирует электронную коммуникацию заместителей с макроциклом. Дополнительное присоединение двух нитрогрупп через фенильный спейсер к другим C_m-атомам углерода оказывает слабое влияние на электронные спектры поглощения. Спектры флуоресценции исследованных порфиринов представляют собой широкую бесструктурную полосу со стоксовым сдвигом 1200 см⁻¹. Квантовый выход флуоресценции $\Phi_{\text{фл}}$ равен 0,0014–0,0015. Предложено, что флуоресценция локально возбужденного $\pi\pi^*$ -состояния полностью тушится путем заселения низколежащего состояния с переносом заряда (ПЗ-состояния) и наблюдаемое свечение обусловлено излучательной дезактивацией этого ПЗ-состояния.

Ключевые слова: порфирин, NO₂-замещение, спектры, флуоресценция, молекулярные орбитали, состояние с переносом заряда.

Для цитирования: Лазовская О. И., Вершиловская И. В., Леонтьев В. Н., Игнатовец О. С., Крук Н. Н. Спектрально-люминесцентные характеристики NO₂-замещенных порфиринов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 20–25.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-4.

O. I. Lazovskaya, I. V. Vershilovskaya, V. N. Leontiev, O. S. Ignatovets, M. M. Kruk
Belarusian State Technological University

SPECTRAL-LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF NO₂-SUBSTITUTED PORPHYRINS

The spectral and luminescent characteristics of NO₂-substituted porphyrins differing in the number of attached nitro groups and the architecture of peripheral substitution were studied with absorption and luminescence spectroscopy. It was found that the attachment of two nitro groups directly to the C_m-carbon atoms of the porphyrin macrocycle leads to significant bathochromic shifts of the bands in the absorption spectra and their broadening. It was found that the observed changes are due to the destabilization of the highest occupied molecular orbitals (HOMO) of the macrocycle and the rotation of nitro groups, which modulates the electronic communication of the substituents with macrocycle. Additional attachment of two nitro groups via phenyl spacer to other C_m-carbon atoms barely affects the electronic absorption spectra. The fluorescence spectra of the studied porphyrins have a broad structureless band with a Stokes shift of 1200 cm⁻¹. The quantum yield of fluorescence of Φ_{fl} is as low as 0.0014–0.0015. It is proposed that the fluorescence of the locally excited $\pi\pi^*$ -state is completely quenched by population of a low-lying charge-transfer state (CT-state) and the observed luminescence is due to radiative deactivation of this CT-state.

Keywords: porphyrin, NO₂-substitution, spectra, fluorescence, molecular orbitals, charge transfer state.

For citation: Lazovskaya O. I., Vershilovskaya I. V., Leontiev V. N., Ignatovets O. S., Kruk M. M. Spectral-luminescent characteristics of NO₂-substituted porphyrins. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 20–25 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-4.

Введение. Синтез новых соединений стимулируется не только развитием новых методов органической химии, но и востребованностью новых молекулярных систем с заданными физико-химическими и спектрально-люминесцентными характеристиками для создания и совершенствования новых материалов и технологий. В силу этого значительная часть фундаментальных исследований макрогетероциклических тетрапиррольных соединений и их аналогов представляет собой исследование взаимосвязи молекулярной структуры и тех или иных физико-химических характеристик, представляющих интерес для решения определенных практических задач [1].

Особый интерес представляет возможность управления определенными характеристиками посредством внешних управляющих сигналов. Отличительной особенностью такого управления является то, что в молекуле имеются локализованные функциональные центры, взаимодействия в которых (как правило, межмолекулярные) существенно влияют на функциональные свойства молекулярной системы в целом. Классическим примером такой регуляции является аллостерическая регуляция сродства гемоглобина к кислороду посредством связывания рецепторными группами в полипептидных цепях тетрамерного белка низкомолекулярных лигандов (органических и неорганических фосфатов, хлорид-ионов и др.) [2].

Управление такого типа может быть реализовано в простых молекулярных системах посредством введения функциональных групп, обладающих очень сильными электронодонорными либо электроноакцепторными свойствами. Введение в макроцикл таких функциональных заместителей может быть использовано для управления положением отдельных молекулярных орбиталей, что влечет за собой возможности управления спектрально-люминесцентными свойствами и фотофизическими характеристиками системы в целом [3].

В качестве такого функционального заместителя можно рассмотреть нитрогруппу, которая является сильным акцептором электронной плотности, причем в электронной коммуникации доминирует индуктивный эффект (константа Гаммета $\sigma_I = 0,76$ [4]), а мезомерный эффект на порядок слабее (константа Гаммета $\sigma_R = 0,07$ [4]), что позволяет осуществить единообразный отклик на различные по характеру взаимодействия. Особенно перспективно использовать нитрозамещение для управления люминесцентными характеристиками молекулярных систем благодаря тому, что нитрогруппа выступает в роли эффективного тушителя возбужденных электронных состояний посредством формирования внутримолекулярного состояния с переносом заряда.

Представляет значительный интерес определить эффективность тушения флуоресценции

нитрогруппами, присоединенными различным способом к макроциклу, а также изучить механизмы, определяющие спектральные сдвиги полос в спектрах поглощения и изменения относительных величин поглощения.

Для решения данных задач в качестве объектов исследования выбраны: свободные основания 5,15-дифенил-10,20-динитро-3,7,13,17-метил-2,8,12,18-этил-порфина и 5,10-4-нитрофенил-10,20-динитро-3,7,13,17-метил-2,8,12,18-этил-порфина (далее соответственно обозначенные как порфирины **1** и **2**). Роль нитрогрупп определяли путем сопоставления с характеристиками 5,15-дифенил-3,7,13,17-метил-2,8,12,18-этил-порфина (**3**). Структуры соединений приведены на рис. 1.

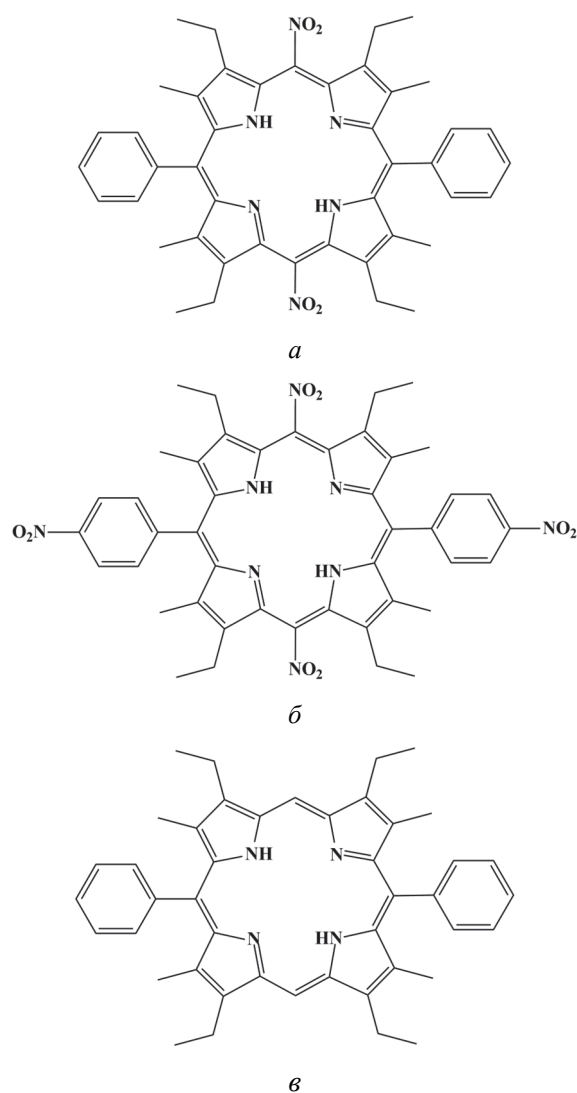


Рис. 1. Молекулярная структура исследованных соединений:

- а – 5,15-дифенил-10,20-динитро-3,7,13,17-метил-2,8,12,18-этил-порфин (**1**);
б – 5,10-(4-нитрофенил)-10,20-динитро-3,7,13,17-метил-2,8,12,18-этил-порфин (**2**);
в – 5,15-дифенил-3,7,13,17-метил-2,8,12,18-этил-порфин (**3**)

Основная часть. Спектры поглощения и флуоресценции порфиринов **1** и **2**, иллюстрирующие характер спектральных изменений при варьировании архитектуры периферического замещения, приведены на рис. 2. Анализ представленных спектров показывает, что отдельные центры присоединения нитрогрупп характеризуются существенными различиями в эффективности электронной коммуникации с макроциклом.

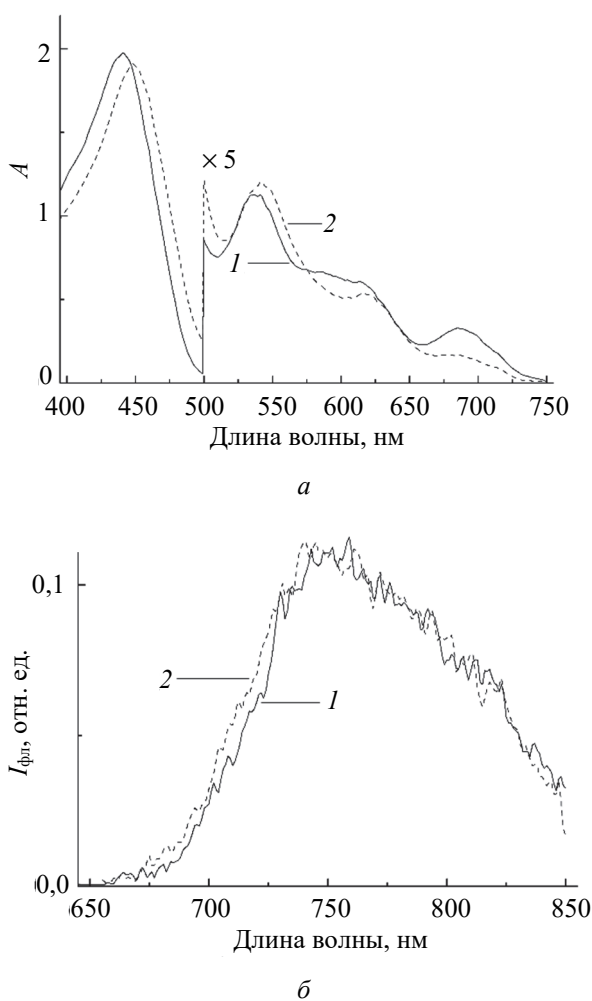


Рис. 2. Спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) порфиринов **1** и **2** в толуоле. Для удобства анализа поглощение в области 500–750 нм умножено на 5. Длина волны возбуждения флуоресценции 550 нм

Действительно, при переходе от порфирина **1** к порфируну **2** количество присоединенных нитрогрупп удваивается, однако это оказывает слабое влияние на положение полос поглощения. Основной вклад в формирование батохромного сдвига всех полос в спектре вносят нитрогруппы, непосредственно присоединенные к макроциклу по C_м-атомам углерода. Величина батохромного сдвига длинноволновых полос в спектрах по сравнению с их положением в спектрах порфирина **3**,

использованного в качестве соединения сравнения, составила 1340 см⁻¹.

Анализ относительных интенсивностей полос поглощения в спектрах двух порфиринов показывает, что их соотношение зависит от архитектуры периферического замещения (рис. 2, а). Согласно положениям четырехорбитальной модели Гоутермана, соотношение величин поглощения в максимумах полос чисто электронного перехода Q(0,0) и его вибронного спутника Q(0,1) пропорционально квадрату разности энергий двух синглетных одноэлектронных конфигураций A_{0,0} / A_{0,1} ~ [E(a_{2u}, e_g) – E(a_{1u}, e_g)]² и может служить мерой конфигурационного взаимодействия в молекуле порфирина [5]. Соотношение обычно используется в качестве индикатора энергетической расстройки верхних заполненных молекулярных орбиталей ВЗМО a_{2u} и ВЗМО – 1 a_{1u} (обозначения орбиталей даны для точечной группы симметрии D_{4h}). В случае квазивыврождения ВЗМО и ВЗМО – 1 поглощение в полосе чисто электронного перехода очень мало, а при значительной расстройке поглощение в полосе чисто электронного перехода может превышать поглощение в полосе его вибронного спутника.

Оценки величины A_{0,0} / A_{0,1} равны соответственно 0,36 и 0,27 для порфиринов **1** и **2**, что существенно ниже, чем, например, у молекулы 5,10,15,20-тетрафенилпорфина (0,52). К сожалению, сильное перекрывание полос поглощения снижает точность оценки. Тем не менее можно предположить, что в нитрозамещенных производных происходит дестабилизация верхних заполненных молекулярных орбиталей ВЗМО a_{2u}, которые имеют пучности на C_м-атомах углерода. Сопоставление вкладов отдельных нитрогрупп показывает, что вклад в сдвиг молекулярных орбиталей групп, присоединенных непосредственно к C_м-атомам углерода, заметно больше, чем в случае присоединения в *para*-положениях фенильных колец. При этом следует отметить относительный сдвиг полос первого и второго электронных переходов: максимум Q_x(0,1)-полосы поглощения порфирина **1** наблюдается при 537 нм, а у порфирина **2** – при 541 нм, в то время как максимумы Q_x(0,1)-полосы у обоих порфиринов наблюдаются при длинах волн 618 и 619 нм.

Присоединение арильных заместителей в мезоположения порфиринового макроцикла повышает энергию a_{2u} орбитали, поэтому для двух исследованных порфиринов E(a_{2u}, e_g) < E(a_{1u}, e_g). Вместе с тем макроцикл также имеет восемь алкильных групп, присоединенных к C_б-атомам углерода. Данное замещение оказывает дестабилизирующее действие на a_{1u} молекулярную орбиталь. Таким образом, при совместном влиянии алкильных групп, являющихся слабыми донорами электронной плотности (индуктивные константы Гаммета σ_I

равны соответственно $-0,05$ и $-0,04$ для метильной и этильной групп [4]), происходит взаимное сближение a_{2u} и a_{1u} молекулярных орбиталей, следствием которого является уменьшение конфигурационного взаимодействия. Это проявляется в том, что величина поглощения длинноволнового электронного перехода $Q_x(0,0)$ уменьшается, равно как и величина поглощения второго электронного перехода $Q_x(0,0)$. В результате меняется тип спектра поглощения в видимой области по сравнению с молекулой 5,10,15,20-тетрафенилпорфина, у которого интенсивность полос поглощения в видимой области спектра увеличивается в ряду $I < II < III < IV$ (*этио*-тип спектра). А исследованные нами нитрозамещенные порфирины обладают спектром *филло*-типа, для которого характерно иное распределение относительных интенсивностей полос поглощения: $I < III < II < IV$.

Таким образом, можно предложить следующую схему расположения молекулярных орбиталей в исследованных порфиринах. Две верхние молекулярные орбитали квазивыврождены, а две нижние имеют близкую энергию, причем энергетическая расстройка ${}^1E(a_{2u}, e_g) - {}^1E(a_{1u}, e_g)$ между ними меньше у порфирина **2**. Подобное взаимное расположение молекулярных орбиталей характерно и для незамещенного макроцикла порфина, однако в случае исследованных порфиринов энергия ВЗМО и ВЗМО – 1 существенно ниже, что следует из сравнения длин волн максимумов длинноволновых электронных переходов: у порфина он находится при 615 нм, а у исследованных порфиринов при 687 нм.

Спектры флуоресценции исследованных нитрозамещенных порфиринов представляют собой широкие бесструктурные полосы (рис. 2, б) в отличие от классических двухполосных спектров флуоресценции свободных порфиринов. Максимум в спектрах флуоресценции порфиринов **1** и **2** наблюдается при ~ 750 нм. Две полосы в спектрах флуоресценции классических порфиринов соответствуют излучательным переходам в основное состояние и его вибронный спутник и, соответственно, различаются по энергии так же, как и полосы в спектре поглощения. Если предположить, что максимум при ~ 750 нм относится к вибронному $Q_x(1,0)$ переходу, и добавить к значению энергии этого перехода энергию колебательного кванта 1600 см^{-1} , рассчитанного как разницу энергий максимумов $Q_x(0,1)$ и $Q_x(0,0)$ полос в спектре поглощения (687 и 618 нм, для порфирина **1**), то чисто электронный $Q_x(0,0)$ переход окажется при ~ 670 нм, т.е. в антистоксовой области. Но это невозможно, так как противоречит закону Стокса. В то же время нет никаких причин для существенного искажения молекулярной конформации макроцикла в возбужденном состоянии по сравнению с основным [6, 7], которое

могло бы активизировать низкочастотные неплоскостные колебания и привести к уменьшению наблюдаемой величины колебательного кванта.

Объяснить это противоречие можно, если предположить, что люминесцирующее состояние имеет иную природу. Очевидно, флуоресценция локально возбужденного $\pi\pi^*$ -состояния полностью тушится и в результате заселяется низколежащее состояние с переносом заряда на нитрогруппу (ПЗ-состояние). Наблюдаемое свечение обусловлено излучательной дезактивацией этого ПЗ-состояния. Квантовые выходы флуоресценции $\Phi_{\text{фл}}$ для двух исследованных порфиринов оказались близки и равны 0,0015 и 0,0014 соответственно для порфиринов **1** и **2**. Для порфирина **3**, взятого в качестве эталонного соединения, величина квантового выхода флуоресценции $\Phi_{\text{фл}}$ заметно выше – 0,076. Тушение флуоресценции из состояния с переносом заряда может быть обусловлено как низкой вероятностью испускания флуоресценции $k_{\text{фл}}$, так и возрастанием вероятности безызлучательных переходов в нижнее триплетное T_1 состояние и в основное состояние, которое вызвано малостью энергетических зазоров между этими состояниями. Данный вопрос изучается нами дополнительно.

Сопоставление величин квантового выхода флуоресценции $\Phi_{\text{фл}}$ с архитектурой замещения макроцикла показывает, что значительное тушение флуоресценции обусловлено присоединением нитрогрупп к C_m -атомам углерода, в то время как нитрогруппы, находящиеся в *пара*-положении фенильного фрагмента, также присоединенного к C_m -атомам углерода, тушат флуоресценцию макроцикла слабо. Это согласуется с наблюдениями классического двухполосного спектра флуоресценции и слабого разгорания флуоресценции в порфиринах, у которых нитрогруппы присоединяли к макроциклу через арильный спейсер [8].

Следует отметить, что форма спектра флуоресценции исследованных порфиринов, у которых нитрогруппы непосредственно присоединены к C_m -атомам макроцикла, подобна необычной форме спектра флуоресценции 5,10,15,20-тетра-(4-*N*-метилпиридил)-порфирина в водном растворе, которая была объяснена формированием низколежащего состояния с переносом заряда в полярном окружении [9]. Можно предположить, что бесструктурный спектр флуоресценции является характерной особенностью низколежащего состояния с переносом заряда в порфиринах. Кроме того, следует отметить, что вращение нитрогрупп за время жизни возбужденного состояния также вносит вклад в уширение полос в спектре флуоресценции [6].

Заключение. Таким образом, изучение спектрально-люминесцентных свойств нитрозамещенных соединений показывает, что управление теми

или иными характеристиками макроцикла требует вовлечения во внутримолекулярные взаимодействия определенных молекулярных орбиталей макроцикла. Молекулярный дизайн архитектуры замещения производных порфиринов с нитро-группами позволяет точно влиять на характеристики молекулы и осуществлять плавную подстройку спектрально-люминесцентных свойств посредством межмолекулярных взаимодействий. При этом необходимо отметить, что формально

неактивные заместители в других положениях макроцикла в сочетании с нитрогруппами способны влиять на спектрально-люминесцентные характеристики молекулы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция – 2025» (подпрограмма «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии», задание шифр 3.03.10 (НИР 2)).

Список литературы

1. Крук Н. Н. Строение и оптические свойства тетрапиррольных соединений. Минск: БГТУ, 2019. 216 с.
2. Monod J., Wyman J., Changeux J.-P. On the nature of allosteric transitions: a plausible model // *Journal of Molecular Biology*. 1965. Vol. 12, no. 1. P. 88–118.
3. Электронные и стерические эффекты заместителей как способ управления свойствами тетрапиррольных макроциклов / С. Г. Пуховская, Ю. Б. Иванова, Н. Н. Крук [и др.] // *Функциональные материалы на основе тетрапиррольных макрогетероциклических соединений* / под. ред. О. И. Койфмана. М., 2019. С. 63–101.
4. Murov S. L., Carmichael I., Hug G. L. *Handbook of photochemistry*. New-York: Marcel Dekker, 1993. 420 p.
5. Gouterman M., Wagniere G., Snyder L. R. Spectra of porphyrins. Part II. Four orbital model // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 1963. Vol. 11, no. 2. P. 108–127.
6. Гладков Л. Л., Крук Н. Н. Спектральные проявления модуляции энергии электронных орбиталей макроцикла порфина при вращении NO₂-заместителя // *Журн. прикл. спектр.* 2024. Т. 91, № 5. С. 623–629.
7. Senge M. O. Exercises in molecular gymnastics – bending, stretching and twisting porphyrins // *Chem. Commun.* 2006. P. 243–256.
8. Pathways for photoinduced electron transfer in meso-nitro-phenyl-octaethylporphyrins and their chemical dimers / V. N. Knyukshto [et al.] // *Chem. Phys. Letters*. 1999. Vol. 304, no. 2. P. 155–166.
9. Intramolecular interactions in the ground and excited state of tetrakis(N-methylpyridyl)porphyrins / F. J. Vergeldt [et al.] // *J. Phys. Chem.* 1995. Vol. 99, no. 13. P. 4397–4405.

References

1. Kruk M. M. *Stroyeniye i opticheskiye svoystva tetrapirrol'nykh soyedineniy* [Structure and optical properties of tetrapyrrolic compounds]. Minsk, BGTU Publ., 2019. 216 p. (In Russian).
2. Monod J., Wyman J., Changeux J.-P. On the nature of allosteric transitions: a plausible model. *Journal of Molecular Biology*, 1965, vol. 12, no. 1, pp. 88–118.
3. Pukhovskaya S. G., Ivanova Yu. B., Kruk M. M., Golubchikov O. A., Koifman O. I., Electronic and steric effects of substituents as a tool to control the properties of tetrapyrrolic macrocycles. *Funktsional'nyye materialy na osnove tetrapirrol'nykh makrogeterotsiklicheskih soyedineniy* [Functional materials based on tetrapyrrole macroheterocyclic compounds]. Ed. by O. I. Koifman. Moscow, 2019, pp. 63–101 (In Russian).
4. Murov S. L., Carmichael I., Hug G. L. *Handbook of photochemistry*. New-York, Marcel Dekker Publ., 1993. 420 p.
5. Gouterman M., Wagniere G., Snyder L. R. Spectra of porphyrins. Part II. Four orbital model. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1963, vol. 11, no. 2, pp. 108–127.
6. Gladkov L. L., Kruk M. M., Spectral manifestations of energy modulation of the porphine macrocycle electronic orbitals upon rotation of an NO₂-substituent. *Journ. Appl. Spectr.*, 2024, vol. 91, issue 5, pp. 963–968.
7. Senge M. O. Exercises in molecular gymnastics – bending, stretching and twisting porphyrins. *Chem. Commun.*, 2006, pp. 243–256.
8. Knyukshto V. N., Zenkevich E., Sagun E., Shulga A., Bachilo S. Pathways for photoinduced electron transfer in meso-nitro-phenyl-octaethylporphyrins and their chemical dimers. *Chem. Phys. Letters*, 1999, vol. 304, no. 2, pp. 155–166.
9. Vergeldt F. J., Koehorst R. B. M., van Hoek A., Schaafsma T. J. Intramolecular interactions in the ground and excited state of tetrakis(N-methylpyridyl)porphyrins. *J. Phys. Chem.*, 1995, vol. 99, no. 13, pp. 4397–4405.

Информация об авторах

Лазовская Олеся Илгамовна – ведущий инженер кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lazovskaya@belstu.by

Вершиловская Ирина Вацлавовна – кандидат биологических наук, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vershilovskaya@belstu.by

Леонтьев Виктор Николаевич – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: leontiev@belstu.by

Игнатовец Ольга Степановна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ignatovets@belstu.by

Крук Николай Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.kruk@belstu.by

Information about the authors

Lazovskaya Olesya Ilgamovna – Lead Engineer, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lazovskaya@belstu.by

Vershilovskaya Irina Vatslavovna – PhD (Biology), Assistant Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vershilovskaya@belstu.by

Leontiev Viktor Nikolaevich – PhD (Chemistry), Associate Professor, Head of the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leontiev@belstu.by

Ignatovets Olga Stepanovna – PhD (Biology), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovets@belstu.by

Kruk Mikalai Mikalaevich – DSc (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.kruk@belstu.by

Поступила 30.12.2024

УДК 531.19;538.911

И. И. Наркевич¹, Е. В. Фарафонтова¹, Г. Э. Наркевич²¹Белорусский государственный технологический университет²Московский физико-технический институт**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ
МОЛЕКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ**

Ранее были предприняты первые шаги для практической реализации идеи о принципиальной возможности статистического сокращенного описания тепловых флуктуаций поля плотности с помощью введенной цепочки коррелятивных функций для ансамбля взаимодействующих *элементарных флуктуаций плотности* (ЭФП). Они с определенной вероятностью возникают и исчезают случайным образом на фоне однородной макроскопической системы с заданными термодинамическими параметрами, и поэтому их можно рассматривать в качестве квазичастиц. Их коррелятивные функции введены аналогично тому, как это сделано для системы реальных частиц (атомов либо молекул) в известном методе Боголюбова – Борна – Грина – Кирквуда – Ивона (ББГКИ). В качестве потенциалов взаимодействия ЭФП с однородной средой (без учета флуктуаций) и между собой используются энергии образования одиночных и парных (бинарных) ЭФП. Конкретные численные расчеты таких энергий выполнялись для простой молекулярной системы с межчастичным взаимодействием Леннарда-Джонса, которая представляет собой сферическую наночастицу, находящуюся в термостате с заданными термодинамическими параметрами (температура и химический потенциал). В связи с этим для статистического описания такой открытой системы используется большой термодинамический потенциал, который является функционалом поля плотности при наличии ЭФП в объеме системы.

Хорошо известно, что вклад тепловых флуктуаций в термодинамические характеристики равновесных систем оказывается существенным вблизи линий фазовых переходов. Причем эти вклады наиболее ярко проявляются в окрестности критической точки жидкость – газ в молекулярных системах, что приводит к степенным зависимостям характеристик системы, описываемым с помощью критических индексов. В частности, это связано с формой фазовой диаграммы в очень близкой окрестности критической точки. В связи с этим, с учетом экстремальных свойств большого термодинамического потенциала, в данной работе в рамках двухуровневого статистического метода выполнены теоретические построения фазовых диаграмм температура – плотность и давление – плотность во всем интервале фазового перехода жидкость – газ. Детальные расчеты проведены с относительной погрешностью не более 2% при локализации критической точки и определении критических параметров: температуры, давления и плотности.

Ключевые слова: двухуровневый статистический метод, флуктуации плотности в наночастицах, фазовые диаграммы, критическая точка, критические индексы.

Для цитирования: Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В., Наркевич Г. Э. Статистическое исследование формы фазовой диаграммы молекулярной системы в окрестности критической точки // Труды БГТУ Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 26–30.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-5.

I. I. Narkevich¹, E. V. Farafontova¹, G. E. Narkevich²¹Belarusian State Technological University²Moscow Institute of Physics and Technology**STATISTICAL RESEARCH OF MOLECULAR SYSTEM PHASE DIAGRAM
FORM IN THE CRITICAL POINT NEIGHBOURHOOD**

Previously, the first steps were taken to practically implement the idea of the fundamental possibility of an abbreviated description of density field fluctuations using the introduced chain of correlative functions for an ensemble of interacting *elementary density fluctuations* (EDF). With a certain probability, they appear and disappear randomly against the background of a homogeneous macroscopic system with given thermodynamic parameters and therefore they can be considered as quasiparticles. Their correlative functions are introduced in the same way as was done for a system of real particles (atoms or molecules) in the well-known Bogolyubov – Born – Green – Kirkwood – Yvon (BBGKY) method. As potentials of interaction of EDFs with a homogeneous medium (without taking into account fluctuations) and among themselves, this work uses the formation energies of single and paired (binary) EDFs. Specific numerical calculations were performed for a simple molecular system with Lennard-Jones interparticle interaction,

which is a spherical nanoparticle located in a thermostat with given thermodynamic parameters (temperature and chemical potential). That is why to statistically describe such a system, a large thermodynamic potential is used, which is a functional of the density field in the presence of an EDF in the volume of the system.

As known, the contribution of thermal fluctuations to the thermodynamic characteristics of equilibrium systems appears significant near the phase transition lines. Moreover, these contributions are most significant in the vicinity of the liquid-gas critical point in molecular systems, which leads to power laws of the system characteristics described by critical indices. In particular, this is connected with the shape of the phase diagram in a close neighborhood of the critical point. In this connection, taking into account the extreme properties of the large thermodynamic potential, theoretical phase diagrams temperature-density and pressure-density in the entire interval of the liquid-gas phase transition have been built in this work with the help of the two-level statistical method. The calculations were performed with relative error no more than 2% to localize the critical point and determine the critical parameters: temperature, pressure, and density.

Keywords: two-level statistical method, density fluctuation in nanoparticles, phase diagrams, critical point, critical indices.

For citation: Narkevich I. I., Farafontova E. V., Narkevich G. E. Statistical research of molecular system phase diagram form in the critical point neighbourhood. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 26–30 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-5.

Введение. К настоящему времени в рамках двухуровневого статистического метода [1] сформулирована идея о принципиальной возможности сокращенного статистического описания термодинамических флуктуаций с помощью статистического ансамбля взаимодействующих ЭФП [2, 3], которые возникают случайным образом на фоне однородной макроскопической системы с заданными термодинамическими параметрами. Для этого введены эффективные потенциалы взаимодействия одиночных ЭФП со средой ($\Psi(x_i)$) и друг с другом (для двух $\Psi(x_i, x_j)$, трех $\Psi(x_i, x_j, x_k)$ и так далее флуктуаций). В результате большой термодинамический функционал $\Omega\{\rho_l\}$ неоднородной системы с произвольным полем плотности ρ_l , сформированным с помощью соответствующего ансамбля ЭФП, можно представить в виде разложения по неприводимым эффективным потенциалам Ψ взаимодействия ЭФП, т. е. квазичастиц [4]:

$$\Omega\{\rho_l\} = \Omega\{\rho_{cp}\} + \sum_{i=1}^M \Psi(x_i) + \sum_{i<j}^M \Psi(x_i, x_j) + \sum_{i<j<k}^M \Psi(x_i, x_j, x_k); \quad (1)$$

$$\Psi_1(x_i) = \tilde{\Omega}(x_i); \quad (2)$$

$$\Psi(x_i, x_j) = \tilde{\Omega}(x_i, x_j) - \tilde{\Omega}(x_i) - \tilde{\Omega}(x_j); \quad (3)$$

$$\Psi(x_i, x_j, x_k) = \tilde{\Omega}(x_i, x_j, x_k) - \tilde{\Omega}(x_i, x_j) - \tilde{\Omega}(x_i, x_k) - \tilde{\Omega}(x_j, x_k) - \tilde{\Omega}(x_i, x_k). \quad (4)$$

Здесь $\tilde{\Omega}(x_i)$ – флуктуационная часть большого потенциала системы с одиночной ЭФП (с амплитудой x_i в ее центре), которую можно рассматривать как энергию образования этой флуктуации, а $\tilde{\Omega}(x_i, x_j)$ и $\tilde{\Omega}(x_i, x_j, x_k)$ – аналогичные потенциалы системы с двумя и тремя ЭФП и т. д.

Основная часть. Все численные расчеты большого термодинамического потенциала Ω однородной системы, а следовательно, и давления p ($\Omega = -pV$, V – объем системы) выполнены с помощью специальных компьютерных программ (разработанных с использованием системы Mathcad) для сферической наночастицы как молекулярной термодинамической системы, находящейся в равновесии с термостатом с заданными, но произвольными параметрами (μ – химический потенциал, θ – температура, ρ – плотность) в широкой области их значений, в том числе и в близкой окрестности с постепенно и с большой точностью локализованной критической точкой жидкость – газ. При этом все величины заранее обезразмерены с помощью линейного и энергетического параметров потенциала Леннард-Джонса. Численные расчеты выполнены для сферической наночастицы радиусом $R = 109,6$, что примерно соответствует 45 нанометрам. Она находится в термостате с плотностью $\rho = 1 / v = n / \omega$, здесь n – средние числа заполнения элементарных ячеек гипотетической кубической решетки, которая используется в статистическом методе условных распределений [5] для описания коррелированного распределения всех молекул по всему объему системы, v – молекулярный объем, ω – объем ячеек, для которых безразмерное расстояние между ближайшими узлами $d = 1,096$.

Следует отметить, что расчеты в этой работе выполнены с учетом взаимодействия всех молекул системы со своими двумя ближайшими соседями в элементарных ячейках, по которым с определенной вероятностью распределены молекулы исследуемой термодинамической системы (в ранее опубликованных статьях для численных расчетов использовалась гранецентрированная кристаллическая решетка). При этом решалась

(как и ранее) замкнутая система интегральных уравнений (1)–(19), которая описана в работе [6]. Здесь приведем только формулы, которые определяют функционалы энтропии S , внутренней энергии U и свободной энергии F неоднородной системы в виде сферической наночастицы:

$$S\{n_p\} = -\sum_{p=1}^P Z_p (n_p \ln n_p + (1-n_p) \ln(1-n_p) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^J n_p n_j g_{pj} \ln g_{pj}); \quad (5)$$

$$U\{n_p\} = \sum_{p=1}^P Z_p \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^J (n_p n_j g_{pj} \psi(b_p, r_{pj}, b_j)); \quad (6)$$

$$F\{n_p\} = U\{n_p\} - \theta S\{n_p\}. \quad (7)$$

Здесь Z_p – число узлов решетки, принадлежащих координационной сфере с номером p ; $J=18$ – число узлов, принадлежащих двум координационным сферам с центрами, совпадающими с центром ячейки ω_p , по узлам которых выполняется суммирование в уравнениях (5), (6). В этой работе расчеты проводились для однородной системы, поэтому все числа заполнения n одинаковы для всех ячеек и все функционалы оказываются функциями n , а следовательно, и средней плотности ρ . Поэтому большой термодинамический потенциал Ω при заданных значениях температуры θ и химического потенциала μ рассчитывался по следующей формуле:

$$\Omega(n) = U(n) - \theta S(n) - \mu N(n), \quad (8)$$

где $N(n)$ – число молекул в объеме наночастицы заданного размера ($R = 109,6$).

С учетом принципа экстремальности для потенциала $\Omega(n)$ параметры сосуществующих фаз в состоянии термодинамического равновесия определялись для заданных температур при тех значениях химического потенциала, при которых минимумы потенциала $\Omega(n)$ имеют одинаковую глубину.

Поскольку потенциал $\Omega = -pV$, то для удобства на рис. 1 приведены соответствующие зависимости давления $p = -\Omega/V$ от чисел заполнения ячеек. Равновесные значения чисел заполнения n , а значит, и плотностей ρ для сосуществующих фаз (жидкой и газообразной) определяются с помощью построения общих горизонтальных касательных к изотермам, проведенных через точки, соответствующие максимальным значениям давления. Для примера на рис. 1 показаны касательная к изотерме при $\theta = 1,6$ и равновесные значения чисел заполнения, соответствующие жидкой $n_{\text{ж}}$ (точка A) и газовой $n_{\text{г}}$ (точка B) фазам.



Рис. 1. Изотермы давления

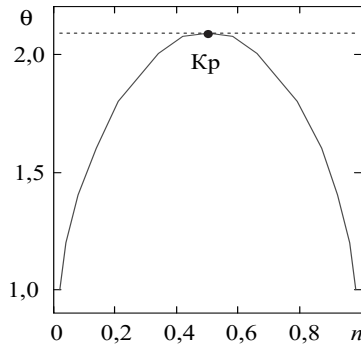
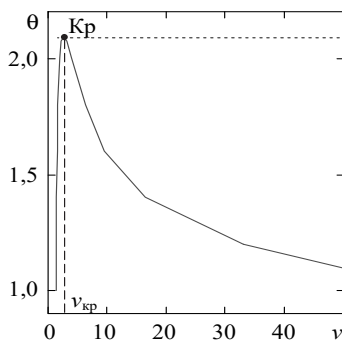
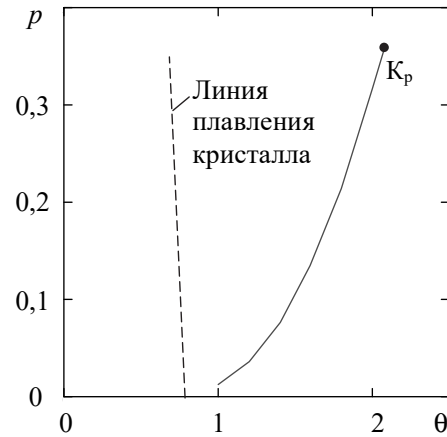
В таблице приведены найденные с относительной погрешностью не более 2% значения параметров сосуществующих фаз для 8 температур θ , начиная с критической ($\theta_{\text{кр}} \approx 2,08$, $v_{\text{кр}} \approx 2,63$). Заметим, что отклонение теоретических значений параметров от экспериментальных ($\theta_{\text{кр}}^{\text{эксп}} \approx 1,26$, $v_{\text{кр}}^{\text{эксп}} \approx 3,16$) для простых веществ связано в первую очередь с приближениями, которые использовались при численном решении достаточно сложной системы уравнений (1)–(19) из работы [6].

Значения параметров сосуществующих фаз в состоянии термодинамического равновесия при разных температурах

θ	μ	$n_{\text{г}}$	$n_{\text{ж}}$	ρ
2,08	–3,49	0,50	0,50	0,359
2,075	–3,51	0,42	0,58	0,358
2,0	–3,54	0,34	0,66	0,316
1,8	–3,62	0,21	0,79	0,214
1,6	–3,70	0,14	0,86	0,135
1,4	–3,80	0,08	0,92	0,076
1,2	–3,94	0,04	0,96	0,036
1,0	–4,10	0,02	0,98	0,013

На рис. 2–4 изображены фазовые диаграммы соответственно температура – числа заполнения и температура – молекулярный объем, а также давление – температура. Следует отметить, что использование гипотетической кубической решетки (число ближайших соседей $Z = 6$) привело к лучшему согласованию теоретических параметров критической точки с экспериментальными значениями для аргона по сравнению с результатами расчетов

в работе [6], в которой использовалась границен-
трированная решетка ($Z = 12$). Следовательно,
применение простой кубической решетки пред-
почтительнее для теоретического описания струк-
туры флюидных фаз.

Рис. 2. Фазовая диаграмма $\theta - n$ Рис. 3. Фазовая диаграмма $\theta - v$ Рис. 4. Фазовая диаграмма $p - \theta$

Заключение. Выполненные в работе чис-
ленные исследования показали, что точность
расчетов, с которой проведена локализация
критической точки, недостаточна для установ-
ления критических показателей [7], определяю-
щих форму околоскритических поверхностей и
законы убывания поверхностного натяжения σ
и поведения химического потенциала μ , изотер-
мической сжимаемости κ и других характери-
стик при приближении к критической точке.
Для их определения в дальнейших расчетах
нужно увеличить относительную точность пара-
метров критической точки на порядок, а может
быть, и более того.

Список литературы

1. Наркевич И. И. Двухуровневый статистический метод описания неоднородных систем. Ч. 1. Симбиоз методов коррелятивных функций и термодинамических функционалов плотности: монография. Нордерштедт: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. 114 с.
2. Narkevich I. I., Farafontova E. V. Two-level statistical description of structure of homogeneous macroscopic system and spherical crystalline nanoparticles // Nanoscience and Technology: An International Journal. 2019. No. 10 (4). P. 365–376.
3. Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В. Практическая реализация идеи о сокращенном описании флуктуаций поля плотности с помощью двухуровневого статистического метода // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 2 (260). С. 49–54. DOI: 10.52065/2520-6141-2022-260-2-9.
4. Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В., Волосевич З. Г. Статистическое исследование амплитудных и спектральных характеристик энергии образования флуктуаций поля плотности в наноразмерных системах // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2023. № 2 (272). С. 40–46. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-7.
5. Ротт Л. А. Статистическая теория молекулярных систем. М.: Наука, 1979. 280 с.
6. Решение модифицированного интегрального уравнения для потенциалов средних сил и расчет параметров фазовых переходов в гетерогенных системах, содержащих кристаллические наночастицы / И. И. Наркевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2020. № 2 (236). С. 48–56.
7. Ма Ш. Современная теория критических явлений. М.: Мир, 1980. 298 с.

References

1. Narkevich I. I. *Dvukhurovnevyy statisticheskiy metod opisaniya neodnorodnykh sistem. Simbioz metodov korrelyativnykh funktsiy i termodinamicheskikh funktsionalov plotnosti* [Two-level statistical method for describing heterogeneous systems. Symbiosis of methods of correlative functions and thermodynamic functionals of density]. Norderstedt, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. 114 p. (In Russian).

2. Narkevich I. I., Farafontova E. V. Two-level statistical description of structure of homogeneous macroscopic system and spherical crystalline nanoparticles. *Nanoscience and Technology: International Journal*, 2019, no. 10 (4), pp. 365–376.

3. Narkevich I. I., Farafontova E. V. Practical implementation of the idea of a reduced description of density field fluctuations using a two-level statistical method. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2022, no. 2, pp. 49–54. DOI: 10.52065/2520-6141-2022-260-2-9 (In Russian).

4. Narkevich I. I., Farafontova E. V., Volosevich Z. G. Statistical research of amplitude and spectral characteristics of density field fluctuations formation energy in nanosimensional systems. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2024, no. 2 (272), pp. 40–46. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-272-2-7 (In Russian).

5. Rott L. A. *Statisticheskaya teoriya molekulyarnykh sistem* [Statistical theory of molecular systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 280 p. (In Russian).

6. Narkevich I. I., Farafontova E. V., Kulesh A. A., Rogach A. A. Solution of the modified integral equation for potentials of average forces and calculation of phase transition parameters in heterogeneous systems containing crystalline nanoparticles. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2020, no. 2 (236), pp. 48–56. (In Russian).

7. Ma Sh. *Sovremennaya teoriya kriticheskikh yavleniy* [Modern theory of critical phenomena]. Moscow, Mir Publ., 1980. 298 p. (In Russian).

Информация об авторах

Наркевич Иван Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: narkevich@belstu.by

Фарафонтова Елена Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: farafontova@belstu.by

Наркевич Григорий Эдуардович – студент. Московский физико-технический институт (пер. Институтский, 9, 1417016, Долгопрудный, Московская обл., Россия).

Information about the authors

Narkevich Ivan Ivanovich – DSc (Physics and Mathematics), Professor, Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: narkevich@belstu.by

Farafontova Elena Valer'yevna – PhD (Physics and Mathematics), Assistant Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: farafontova@belstu.by

Narkevich Grigoriy Eduardovich – student. Moscow Institute of Physics and Technology (9 Institutsky lane, 1417016, Dolgoprudny, Moscow reg., Russia).

Поступила 30.12.2024

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ MODELLING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.518

А. А. Королёв, Д. С. Карпович, Т. П. Фокин

Белорусский государственный технологический университет

КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АНАЛИТИКЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Статья посвящена основным категориям данных, применяемых в современных системах Big Data. В статье проводится классификация данных на структурированные, полуструктурированные и неструктурированные с описанием особенностей каждого типа, анализу их ключевых характеристик, а также сравнению их преимуществ и недостатков. Также в статье приведено описание больших данных, рассмотрены общие понятия и особенности больших данных, сферы их применения, источники их появления. Проведен анализ основных типов данных, используемых в системах Big Data, посредством сравнения их между собой по таким характеристикам, как гибкость, масштабируемость, сложность анализа, сложность интеграции, вид представления данных, эффективность хранения, сложность запросов для выборки данных. Рассматриваются технологии, которые обеспечивают эффективное использование различных типов данных в рамках Big Data, а также роль этих технологий в улучшении процессов обработки и принятия решений на предприятиях. Подчеркнута важность анализа каждого из существующих типов данных для оптимизации бизнес-операций.

Ключевые слова: большие данные, структурированные данные, полуструктурированные данные, неструктурированные данные.

Для цитирования: Королёв А. А., Карпович Д. С., Фокин Т. П. Классификация типов данных, используемых в аналитике больших данных // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 31–35.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-6.

A. A. Korolyov, D. S. Karpovich, T. P. Fokin

Belarusian State Technological University

CLASSIFICATION OF DATA TYPES USED IN BIG DATA ANALYTICS

The article is devoted to the main categories of data used in modern Big Data systems. The article classifies data into structured, semi-structured and unstructured with a description of the features of each type, an analysis of their key characteristics, and a comparison of their advantages and disadvantages. The article also describes big data, considers general concepts and features of big data, areas of their application, and sources

of their appearance. An analysis of the main types of data used in Big Data systems is carried out by comparing them with each other according to such characteristics as flexibility, scalability, complexity of analysis, complexity of integration, type of data representation, storage efficiency, complexity of queries for data selection. The technologies that ensure the efficient use of various types of data within Big Data are considered, as well as the role of these technologies in improving the processes of processing and decision-making at enterprises. The importance of analyzing each of the existing data types for optimizing business operations is emphasized.

Keywords: big data, structured data, semi-structured data, unstructured data.

For citation: Korolyov A. A., Karpovich D. S., Fokin T. P. Classification of data types used in big data analytics. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 31–35 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-6.

Введение. В промышленной и информационной индустрии данные играют центральную роль. С развитием более быстрых сетей, более широкого пространства для хранения и новых сенсорных технологий компании получают доступ к все большим объемам информации, и иногда этот объём оказывается даже слишком большим.

Термин Big Data описывает огромные объемы данных, как структурированных, так и неструктурированных, собираемых каждый день предприятиями. Большие данные могут поступать из любого количества источников – от социальных сетей и поиска Google до данных, собранных датчиками с промышленного оборудования.

Большие данные отличаются от других наборов данных тем, что из-за их размера их сложно обрабатывать с использованием традиционных методов обработки данных. Большие данные определяются с применением следующих четырех измерений – 4V больших данных [1, 2]:

- объем: объем (структурированных и неструктурированных) данных, сгенерированных и сохраненных;
- разнообразие: различные типы доступных данных, такие как текст, изображения, видео и т. д.;
- достоверность: достоверность и качество данных, включая точность, согласованность и полноту;
- скорость: скорость, с которой компания генерирует и обрабатывает данные.



Сферы применения больших данных

Чтобы получить полное представление о больших данных, необходимо изучить различные особенности и типы больших данных, а также то, какой вклад они вносят в науку о данных.

Большие данные можно условно разделить на три основных типа:

- структурированные данные;
- полуструктурированные данные;
- неструктурированные данные.

В зависимости от типа структуры данных применяются различные подходы для получения информации, требуемой из различных структур данных.

Основная часть. Структурированные данные. Структурированные данные в Big Data можно определить как отформатированные, четко определенные данные, которые следуют общепринятым правилам. В отличие от неструктурированных данных, они поступают в виде схемы, которая может быть представлена в табличной форме.

Различные графики, такие как столбчатые диаграммы, круговые диаграммы и т. д., создаются только из структурированных данных. Они также известны как количественные данные, поскольку значения в структурированных данных представлены в количественном выражении.

Для управления структурированными данными в среде больших данных используется SQL [3].

Согласно определению структурированных данных, это не что иное, как организованные данные, которые хранятся в базах данных, наборах данных и электронных таблицах. Он был изобретен ученым IBM Эдгаром Коддом и используется такими компаниями, как IBM, Microsoft, Oracle и др. Структурированные данные играют важную роль в развитии среды больших данных, поэтому они используются во всем мире на ежедневной основе. Они имеют следующие характеристики:

- простота использования: самое большое преимущество структурированных данных в больших данных заключается в том, что они делают данные пригодными для использования

даже среднестатистическим бизнес-пользователем, так как нет необходимости иметь подробную информацию о различных типах данных и их взаимосвязях;

– структурное представление: данные хранятся как в столбцах, так и в строках, и это легко позволяет обеспечить безопасность данных, и они также имеют определенную структуру, которая помогает в легком хранении и доступе к данным;

– каждая из таблиц имеет определенный атрибут: таблицу можно настраивать, что включает обновление, чтение и удаление или добавление новых данных, а это позволяет производить беспроблемные операции, зачастую выполняемые в реляционной модели при помощи языка структурированных запросов (SQL).

Неструктурированные данные. Неструктурированные данные относятся к нетрадиционной модели, в которой нельзя применять заранее определенные правила. Аналогично, в среде данных объем неструктурированных данных составляет до 90% данных, собранных с разных предприятий [4].

Тексты, аудио, видео, изображения – все это неструктурированные данные. В отличие от структурированных, в больших данных они не имеют фиксированных параметров, поэтому еще одно название неструктурированных данных – качественные данные.

Из изображений или видео возможно взять информацию, чтобы узнать ее качество и получить обратную связь с ней. Они отражены в сравнении с другими типами данных в таблице.

Сравнение типов данных, используемых в Big Data

Аспект	Данные		
	структурированные	неструктурированные	полуструктурированные
Описание	Организованные	Отсутствие predetermined структуры	Сочетание организованности и гибкости
Примеры	Операции продаж в реляционной базе данных, записи студентов в электронных таблицах	Посты в социальных сетях, отзывы клиентов, медицинские изображения и аудиозаписи	XML-документы, JSON данные, базы данных NoSQL
Эффективность хранения	Эффективное хранение и поиск благодаря организованному формату	Различная эффективность хранения в зависимости от типов контента, возможны сложности в управлении ими	Сочетают в себе эффективность хранения и гибкость, оптимизированы для сложных структур данных
Запросы	Хорошо подходят для структурированных языков запросов (SQL), эффективное выполнение запросов	Сложность запросов, требуют применения передовых методов, таких как обработка естественного языка	Требуются специализированные методы запросов, адаптируемые к сложным отношениям
Сложность данных	Хорошо организованы и просты в управлении	Хаотичны и сложны в организации из-за отсутствия структуры	Сочетают гибкость с определенным уровнем организованности и умеренной сложностью
Гибкость	Ограниченная гибкость, данные должны соответствовать predetermined структуре	Очень гибкие, могут охватывать разнообразный контент, но могут быть лишены единообразия	Обеспечивают гибкость, сохраняя при этом определенный уровень структуры, адаптируемой к изменениям
Интеграция	Хорошо подходят для традиционных реляционных баз данных и структурированных приложений	Могут потребоваться передовые методы интеграции из-за разнообразия форматов	Адаптируемы для веб-приложений, API и систем с различными источниками данных
Сложность анализа	Проще анализировать, подходят для количественного анализа и отчетности	Требуются передовые методы анализа настроений, распознавания образов и т. д.	Сложный анализ может затрагивать специализированные методы, но учитываются разнообразные структуры данных
Масштабируемость	Эффективны для управления большими объемами данных благодаря структурированному формату	Проблемы масштабируемости из-за разнообразия данных	Масштабируемы, но сложность может увеличиваться с объемом и структурой данных

Для обработки неструктурированных данных используются NoSQL базы данных, поскольку для них нет жесткой и быстрой модели. В использовании неструктурированных данных есть как важные преимущества, так и недостатки, которые необходимо учитывать заранее при возможной обработке этих данных. Одним из преимуществ использования неструктурированных данных является большее количество информации и качественных аспектов, которые структурированные данные могут упускать из виду. Также разнообразная природа неструктурированных данных более точно отражает реальные сценарии и может быть ценной для принятия решений и анализа тенденций. Наряду с этим неструктурированные данные подпитывают инновации в областях распознавания изображений и машинного обучения.

Полуструктурированные данные. Полуструктурированные данные относятся к типу данных, которые находятся где-то между структурированными данными, используемыми традиционными реляционными базами данных, и неструктурированными данными, такими как файлы мультимедиа и изображения. Хотя они не вписываются в таблицы с предопределенной схемой, как структурированные данные, полуструктурированные данные поддерживают некоторую организацию или иерархию, например, метаданные или семантические теги, что делает их доступными для поиска с помощью запросов, в отличие от неструктурированных данных. Например, XML- и JSON-документы, базы данных NoSQL являются основными вариантами представления и хранения таких данных [5]. Добавление структуры делает полуструктурированные данные более полезными, чем чисто неструктурированные данные, для предприятий, которые все больше полагаются на данные для принятия решений.

Полуструктурированные данные могут поступать из самых разных источников: от устройств и датчиков Интернета вещей (IoT) до веб-страниц, электронных писем и многого другого. Организациям необходимо иметь возможность извлекать информацию из всех своих данных, независимо от типа.

Так как полуструктурированные данные – это гибрид структурированных и неструктурированных данных, по этой причине они разделяют некоторые аспекты с обоими типами. Они не так жестко структурированы, как первые, но содержат идентификационную информацию или теги, которые делают их более доступными для поиска и действий, чем вторые. Организации собирают полуструктурированные данные и создают их, добавляя информацию к неструктурированным данным.

Важность полуструктурированных данных заключается в том, что неструктурированные данные составляют более 90% всех данных, генерируемых в мире, и ежегодно их количество растет на 55%, и, поскольку предприятиям, собирающим огромные объемы неструктурированных данных, необходимо сделать их пригодными для использования, они могут добавлять теги или информацию, чтобы превратить неструктурированные данные в полуструктурированные для удовлетворения этой потребности. В противном случае они упустят потенциальные идеи из большей доли данных, которые они собирают и хранят.

Заключение. В проведенной работе подчеркивается важность правильной классификации данных для эффективного анализа и принятия решений. Понимание различий между структурированными, полуструктурированными и неструктурированными данными позволяет выбрать наиболее подходящие инструменты и методы обработки. В статье акцентируется внимание на преимуществах и недостатках каждого из видов данных, проведено сравнение трех видов данных на основе таких характеристик, как гибкость, масштабируемость, сложность анализа, сложность интеграции, вид представления данных, эффективность хранения данных, сложность запросов для выборки данных. Из проведенного анализа можно сделать вывод, что в условиях роста объема и сложности данных важно продолжать совершенствовать методы их обработки и интеграции для максимальной эффективности в аналитике больших данных.

Список литературы

1. Chen M., Mao S., Liu Y. Big data: A survey // *Mobile Networks and Applications*. 2014. Vol. 19 (2). P. 171–209. DOI: 10.1007/s11036-013-0489-0.
2. Katal A., Wazid M., Goudar R. H. Big Data: Issues, challenges, tools and good practices // *6th International Conference on Contemporary Computing (IC3)*. 2013. P. 404–409. DOI: 10.1109/IC3.2013.6612229.
3. Chen C. P., Zhang C. Y. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data // *Information Sciences*. 2014. Vol. 275. P. 314–347. DOI: 10.1016/j.ins.2014.01.015.
4. Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics // *International Journal of Information Management*. 2015. Vol. 35 (2). P. 137–144. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007.
5. Papakonstantinou Y. Semistructured Models, Queries and Algebras in the Big Data Era // *SIGMOD '16: Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data*. 2016. P. 2229–2233. DOI: 10.1145/2882903.2912573.

References

1. Chen M., Mao S., Liu Y. Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 2014, vol. 19 (2), pp. 171–209. DOI: 10.1007/s11036-013-0489-0.
2. Katal A., Wazid M., Goudar R. H. Big Data: Issues, challenges, tools and good practices. *6th International Conference on Contemporary Computing (IC3)*, 2013, pp. 404–409. DOI: 10.1109/IC3.2013.6612229.
3. Chen C. P., Zhang C. Y. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. *Information Sciences*, 2014, vol. 275, pp. 314–347. DOI: 10.1016/j.ins.2014.01.015.
4. Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 2015, vol. 35 (2), pp. 137–144. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007.
5. Papakonstantinou Y. Semistructured Models, Queries and Algebras in the Big Data Era. *SIGMOD '16: Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data*, 2016, pp. 2229–2233. DOI: 10.1145/2882903.2912573.

Информация об авторах

Королёв Артём Андреевич – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: korolev@belstu.by

Карпович Дмитрий Семёнович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: d.karpovich@belstu.by

Фокин Тимофей Павлович – преподаватель-стажер кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fokin@belstu.by

Information about the authors

Korolyov Artyom Andreevich – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolev@belstu.by

Karpovich Dzmitry Semenovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.karpovich@belstu.by

Fokin Timophej Pavlovich – teacher trainee, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fokin@belstu.by

Поступила после доработки 15.01.2025

УДК 620.165.29

Д. А. Гринюк, И. Г. Сухорукова, Н. М. Олиферович
Белорусский государственный технологический университет

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

В статье проведен анализ методов контроля герметичности. Оценка герметичности производят в разных направлениях человеческой деятельности. И если в прошлом веке анализ данного параметра, который относится к системам неразрушающего контроля, производился в основном визуально оператором с использованием дополнительных приборов и веществ, то на сегодняшний момент выпускается широкая номенклатура установок и систем автоматического и автоматизированного контроля. В анализе показано, что существующие ранее классификации методов контроля герметичности требуют других подходов. Рекомендовано разделить методы оценки протечек на несколько направлений исходя из области применения и направления использования. Предложено выделить отдельно методы, которые применяются на постоянной основе при производстве изделий в промышленности. Здесь важны удобство работы с оборудованием, скорость выполнения тестов, точность, способность производить испытания в автоматическом режиме, соответствие нормативным документам и т. д.

Отдельно можно выделить методы контроля герметичности, которые применяются в условиях производства. Для данного направления характерны требования к мобильности, дистанционности, обеспечение нормативных и экологических норм эксплуатации. Отличительной особенностью является привлечение вычислительных методов анализа – от старых до современных методов машинного обучения.

Использование трубопроводов и трубопроводных систем – это один из экологических и энергоэффективных методов транспортировки и распределения жидкостей. Особенностью методов, которые применяются в данном направлении, является распределенность объекта наблюдения на большой площади, сложность доступа при нахождении в земле или воде и т. д. Предотвращение утечек и раннее их обнаружение очень важно для непрерывной работы, экологии и коммерческой выгоды. Это способствует развитию отдельного класса аппаратных и вычислительных методов оценки герметичности.

Ключевые слова: герметичность, запорная арматура, классификация методов измерения.

Для цитирования: Гринюк Д. А., Сухорукова И. Г., Олиферович Н. М. Развитие систем контроля герметичности // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 36–46.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-7.

D. A. Hryniuk, I. G. Suhorukova, N. M. Oliferovich
Belarusian State Technological University

DEVELOPMENT OF LEAK DETECTION SYSTEMS

The article analyzes the methods of leak control. Leak assessment is performed in different areas of human activity. In the last century, the analysis of this parameter, which relates to non-destructive testing systems, was performed mainly visually by the operator using additional devices and substances, but today a wide range of automatic and automated control systems and installations is produced. The analysis shows that previously existing classifications of leak control methods require other approaches. It is recommended to divide the leak assessment methods into several areas based on the area of application and direction of use. It is proposed to single out separately the methods that are used on a permanent basis in the production of products in industry. Here, ease of use with equipment, speed of testing, accuracy, the ability to perform tests in automatic mode, compliance with regulatory documents, etc. are important. Separately, we can highlight the leak control methods that are used in production conditions. This area is characterized by requirements for mobility, remoteness, ensuring regulatory and environmental standards of operation. A distinctive feature is the involvement of computational methods of analysis, from old to modern methods of machine learning.

Pipelines and pipeline systems are one of the ecological and energy-efficient methods of transportation and distribution of liquids. The peculiarity of the methods that are used in this direction is the distribution of the object of observation over a large area, the complexity of access, when they are in the ground or water, etc. Preventing leaks and their early detection is very important for continuous operation, ecology and commercial benefits. This contributes to the development of a separate class of hardware and computational methods for assessing leak.

Keywords: leak control, valves, classification of measurement methods.

For citation: Hryniuk D. A., Suhorukova I. G., Olfierovich N. M. Development of leak detection systems. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematic. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 36–46 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-7.

Введение. Сегодня понятие «герметичность» все более актуализируется. Этому способствует повышение качества продукции, износ старой арматуры, увеличение трубопроводной инфраструктуры и т. д. Увеличение капитальных затрат на решение вопросов во многих странах также связано с численностью и качеством человеческих ресурсов. Изучение данной темы в литературных источниках указывает на наибольший интерес инженеров и ученых к разработке приборов и методов контроля герметичности трубопроводной сети, а также диагностике промышленной арматуры по месту установки. Развитие данного направления в условиях производства и ремонта демонстрирует умеренный прогресс и совершенствование в соответствии с общими трендами промышленности.

В последнее время организация автоматических испытаний на герметичность обусловлена требованиями ISO 9000, повышением требований к качеству продукции, необходимостью электронного документооборота, защиты окружающей среды, защиты прав потребителей, обеспечения условий работы операторов на рабочем месте.

Герметичность. В работе сделана попытка классификации методов контроля герметичности [1]. Выбранный подход строился на выявлении всех методов, которые используются для контроля герметичности и их систематизации. Один такой вариант не позволяет решать задачи, для которых производят классификацию. Это во многом является следствием самого понятия «герметичность».

Чаще всего герметичность определяют по пороговому значению расхода утечки. Значения могут формироваться стандартами предприятия, отрасли или государственными документами.

Самой популярной единицей измерения герметичности в литературе является миллибар на литр в секунду (мбар·л/с). То есть если в объеме одного литра давление газа падает на 1 мбар в течение 1 с, это соответствует скорости утечки (оттока газа) 1 мбар·л/с. Единица 1 мбар·л/с = Па·м³/с = торр·л/с = атм·м³/с.

В нормативных документах СССР часто нормы герметичности выражаются через поток Q контрольной среды через течь, создающий в объеме V изделия в 1 м³ падение или повышение P на 1 Па за время τ в 1 с:

$$Q = \frac{PV}{\tau}, \text{ Вт (м}^3 \cdot \text{Па/с)}.$$

Доступно большое количество методов проверки на утечку, которые включают все подходы от очень простых до более сложных систем. Наиболее часто применяемые методы проверки на утечку – это подводное испытание на пузырьки, использование мыльной краски, распада под давлением и вакуумом, детекторов трассирующего газа (галоген, гелий и водород). Первые три метода из-за их характеристик и чувствительности могут использоваться только для обнаружения крупных утечек (утечки хладагента 300 г/год или более). Методы проверки утечки газа-индикатора намного точнее предыдущей группы, но во многих случаях их теоретическая чувствительность больше, чем требуется. Однако на практике это ограничивается условиями окружающей среды и работы.

То есть часто герметичность – это относительный термин. Требование к герметичности объекта всегда связано с условиями места его использования. Метод испытания на герметичность, уровень герметизации и допустимая скорость утечки должны быть установлены в соответствии с этими условиями во время изготовления элемента. Например, отдельные детали в двигателях внутреннего сгорания должны быть водонепроницаемыми или маслонепроницаемыми; другие не должны допускать утечки топлива или газа. Как правило, испытание объекта на герметичность должно проводиться как можно на более ранней стадии производственного процесса. Это должно дать представление о том, будет ли компонент герметичным в последующих условиях эксплуатации. При испытании на погружение воздух выходит из детали и образовавшиеся пузырьки поднимаются, как только достигают диаметра 1 мм. Один пузырек в 30 с дает утечку 0,001 см³/мин. Для шины легкового автомобиля (внутренний объем около 40 л) такая утечка приведет к падению давления в шине на 0,1 атм в течение 10 лет. При увеличении скорости истечения в 10 раз такое же изменение давления произойдет за год. Возникает вопрос: остается ли шина герметичной? В некоторых отраслях, например при производстве и ремонте арматуры, нормы расхода определены, в других – что считать герметичным – определяется по-разному, в зависимости от приложения, производителя и по другим причинам.

Методы контроля. Герметичность относится к методам неразрушающего контроля и используется для широкого класса задач и объектов. При построении классификаций следует производить декомпозицию методов контроля герметичности,

так как перечисленные методы очень часто имеют узкую направленность в конкретной области промышленности. Так, к примеру, даже контроль герметичности клапанов может преследовать различные цели. Одним из вариантов декомпозиции методов контроля герметичности является их деление по следующим направлениям:

1) методы контроля в условиях производства объекта тестирования;

2) методы контроля герметичности в условиях эксплуатации на предприятиях;

3) методы контроля герметичности трубопроводов и сопутствующей аппаратуры, когда они представляют разветвленную сеть, охватывающую обширные территории.

Для приборов и методов первого пункта важными будут: точность, повторяемость, время теста, удобство для оператора, автоматизируемость, интеграция в информационную структуру предприятия. Здесь важно понимание физики и метрологии. Применяемые алгоритмы обычно детерминированные [2].

Методы второго пункта должны обеспечивать мобильность, проверку по месту без остановки производства. Они больше относятся к методам диагностики. Например, оценка протечки запорной арматуры, которая установлена в трубопроводах. Для анализа приборов данного направления широко применяют математические методы для диагностики утечки. Это дает хороший результат из-за диагностики утечек на небольшой площади.

Методы контроля герметичности трубопроводов, которые представляют собой развернутые сети, также требуют мобильности. Только здесь больше неопределенности: трубопроводы часто являются скрытыми, так как проложены в земле. Использование различных методов математической обработки наиболее характерно для данного направления. Важным является не столько величина протечки, сколько необходимость локализации места потери герметичности, а также сам факт наличия протечки.

Некоторые методы могут использоваться в разных местах. Одним из наиболее универсальных является метод оценки герметичности по изменению давления, тогда как акустический метод контроля применяется только в условиях эксплуатации.

Методы испытания на герметичность в условиях производства и ремонта. Выбор и применение методов оценки герметичности в данной области не являются однородными. Отдельно здесь следует выделить методы контроля герметичности запорной арматуры. Этот класс объектов исследования часто должен соответствовать нормативным документам, которые характерны для страны или группы стран. Некоторые из них:

ГОСТ 33257–2015 [3], API Standard 521 [4], ANSI/API Standard 598 [5], ISO 5208 [6], Standard MSS SP-61-2013 [7], ANSI/API Standard 6D [8], European Standard. EN-12266-1:2012 [9], British Standards Institute (BSI), BS 6755-1 [10] и ANSI/FCI 70-2-2013 [11]. Производство элементов пневмо- и гидросистем, деталей двигателей внутреннего сгорания подчиняется внутренним документам предприятий или техническому заданию.

Запорная арматура. Клапан, или запорная арматура, – это механическое устройство, которое можно использовать для управления, регулирования или направления потока жидкости путем открытия, закрытия или частичного перекрытия трубопровода или канала. Клапаны имеют множество применений и встречаются практически в каждом промышленном процессе. На электростанциях клапаны устанавливаются для управления объемом потока, необходимым для системы; слива компонента при необходимости; защиты компонента от избыточного давления; выпуска воздуха, который попадает в системы.

Клапаны бывают разных типов, форм и размеров. Наиболее распространенными типами клапанов, используемых сегодня, являются задвижки, пробковые, шаровые, дроссельные, обратные, предохранительные клапаны. Как правило, клапаны можно разделить на три основные функциональные области: запорные (изоляционные), обратные и дросселирующие. Запорные или изолирующие клапаны выполняют функцию блокировки или изоляции потока жидкости через них в полностью закрытом положении, при этом позволяют жидкости течь через них в полностью открытом. Обратные клапаны пропускают жидкость только в одном направлении. Дроссельные клапаны позволяют контролировать и регулировать поток в любой точке – от полностью открытого до полностью закрытого положения.

Требования к герметичности для разных клапанов могут сильно отличаться в зависимости от назначения и типоразмера. С точки зрения организации работ по испытаниям они характеризуются удобством сопряжения, что позволяет добиться высокой степени автоматизации процесса тестирования.

Приборы контроля герметичности при производстве и ремонте имеют цели оценки качества и классификации. При этом измерение утечек запорной арматуры по месту эксплуатации имеет несколько другие цели и требования.

На диаграмме (рис. 1) обобщены характеристики различных методов проверки на герметичность [12]. Также указаны возможности увеличения точности за счет усложнения методики и приборов контроля.

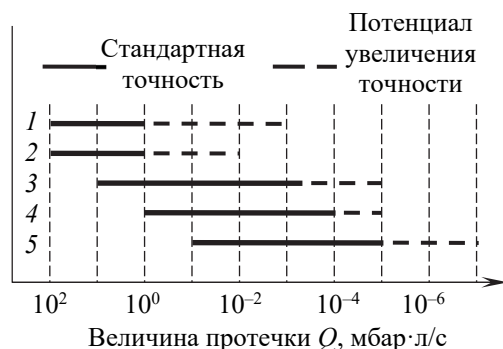


Рис. 1. Базовый и дополнительные пределы контроля герметичности для основных промышленных методов:
 1 – подводный визуальный контроль;
 2 – автоматические методы с использованием воздуха;
 3 – контроль гелия при атмосферном давлении;
 4 – интегральные тесты при атмосферном давлении; 5 – интегральные тесты под вакуумом

Одним из самых старых и популярных методов контроля является подводный визуальный осмотр. Это относительно точный метод при условии соблюдения установленных правил и норм. Автоматические установки данного типа обычно оборудованы измерителями концентрации. А в качестве газа используют гелий [13]. Данный метод подходит для широкого класса объектов разного размера и формы. Он недорогой, определение утечки мгновенное и может быть быстро локализовано. Из недостатков следует отметить высокие требования к оператору, высокую длительность, необходимость часто производить сушку объектов исследований. Для обеспечения требуемой точности нужен длительный период калибровки. Для хорошей воспроизводимости требуется осуществить до 50 испытаний на эталонных моделях.

Методы автоматического контроля. В промышленных условиях наибольшее применение находят методы автоматического контроля. Установки, как правило, оснащены измерительными преобразователями с аналоговыми или цифровыми выходами, которые подключены к аппаратуре управления, регистрации, анализа и формирования протокола испытания. Наиболее популярные решения приведены на рис. 2.

В таких методах в большинстве используются воздух для проверки на герметичность. Особенно он хорош для серийных деталей. Основные преимущества:

- надежность проведения испытаний;
- достоверность и точность количественных измерений;
- скорость проведения испытаний;
- финансовая доступность основных компонентов оборудования;

- низкие нагрузки на объект испытания;
- легкость калибровки;
- отсутствие сложности интеграции в современные системы MES-системы.

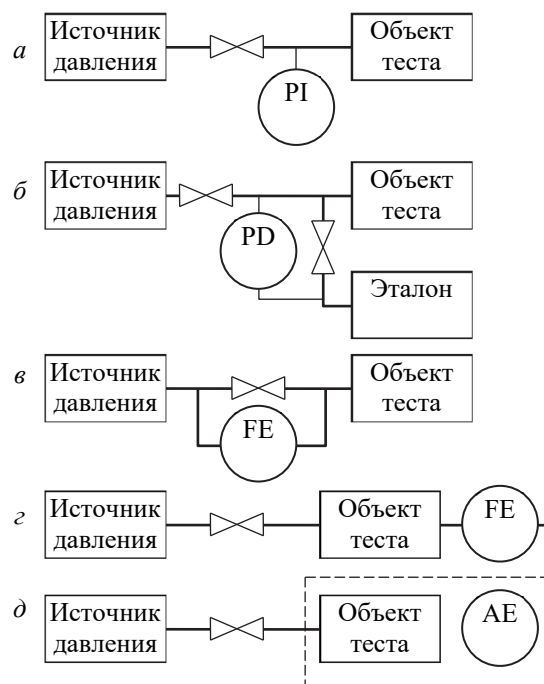


Рис. 2. Основные схемы автоматизированных методов контроля герметичности на производстве:
 а – объемный (контроль давления);
 б – объемный (контроль перепада давления);
 в – массовый (линия высокого давления);
 г – массовый (линия низкого давления);
 д – путем контроля концентрации

Контроль герметичности по первому методу (рис. 2, а) производится по контролю изменения давления. Это один из самых простых и универсальных методов, но имеет ограничение по точности. Длительность – средняя.

Использование датчика дифференциального давления (рис. 2, б) повышает чувствительность, однако усложняет аппаратное оформление. Эталонная часть должна быть максимально эквивалентна тестируемой, поэтому при смене типоразмеров приходится перенастраивать [14].

Вариант использования массового расхода (рис. 2, в) обеспечивает еще лучшую чувствительность, чем предыдущие методы. Также он характеризуется более широким диапазоном давления испытания и коротким временем проведения тестов. Контроль массового расхода позволяет исключить погрешности пересчета, которые характерны для предыдущих методов. Стоимость такого оборудования, как правило, значительно выше, чем у предыдущих.

Установки по вариантам рис. 2, г, д не столь универсальны. Схема на рис. 2, г очень часто применяется для контроля герметичности запорной

арматуры. Для измерения расхода утечки используют подсчет пузырьков различными способами, рассчитывают косвенно путем измерения перепада давления или непосредственно используют расходомер.

Процедура проведения испытаний. При выборе метода испытания на герметичность важно обращать внимание на все аспекты процедуры испытания. Так, при использовании испытаний давлением важными элементами являются характеристики испытательного давления, допустимая скорость утечки, объем испытаний, а также время испытаний.

Скорость утечки существенно зависит от давления испытания. При этом для большинства объектов могут проявляться нелинейные эффекты. Используемое оборудование испытания должно по максимуму моделировать условия эксплуатации. Это касается выбора между вакуумом и избыточным давлением с соответствующим диапазоном.

В некоторых случаях требуется устанавливать связь между значением давления испытания и величиной утечки. Обычно если величина утечки значительна, то ее скорость примерно пропорциональна испытательному давлению, но при малых значениях скорости утечки, обычно имеет нелинейный характер.

На результаты испытаний могут повлиять некоторые внешние факторы, например влага. Не всегда являются постоянными малые утечки. Появляются большие трудности в применимости на практике результатов испытаний, если оборудование, например предохранительные клапаны котлов и химических установок, эксплуатируется при высоких температурах. Экономика тоже играет большую роль. Нет никакого смысла очень точно определять величину скорости утечек, которые имеют значение значительно ниже допустимых.

Установки автоматических испытаний очень часто определяют величину протечки по перепаду давления тестирования. Однако по этим значениям нельзя судить напрямую о количественной величине протечки. На практике можно увидеть два варианта испытаний: на объемный расход (фактически избыточное давление) и на массовый расход.

В первом варианте к детали прилагается соответствующее давление от источника сжатого воздуха, деталь отделяется от источника и путем контроля давления в детали определяется величина протечки. Второй вариант, массовый контроль, предполагает контроль количества вещества, которое переходит от источника воздуха в исследуемый объект. Испытание давления на герметичность встречается чаще в промышленности. При малых объемах испытаний можно обнару-

жить утечки объемом до $0,1 \text{ см}^3/\text{мин}$. Такое оборудование обычно компактно, надежно и пригодно для широкого диапазона допустимой величины протечки. Точность в основном определяется величиной давления и чувствительностью измерительной аппаратуры.

Считается, что метод дифференциального давления может обеспечить большую точность при более высоких испытательных давлениях, чем метод избыточного давления. Зависимость точности измерения будет определяться чувствительностью измерительного преобразователя.

Следует отметить, что метод дифференциального давления в большей степени моделирует условия работы деталей. Однако температурные эффекты, влияние деформаций уплотнений в процессе испытаний на величину протечки могут проявляться более существенно.

Чувствительность первого метода существенно зависит от свободного объема исследуемой детали. Чем больше объем, тем меньше чувствительность метода. Контроль массового расхода дает измерительный сигнал, который не зависит от размера испытательного объема. Также на него оказывают меньшее влияние атмосферное давление и температура. Нет необходимости делать пересчеты, как это происходит в первом методе.

Алгоритмы измерения. Обычно автоматический процесс испытания на герметичность состоит как минимум из четырех фаз: I – заполнение; II – балансировка, III – измерение, IV – сброс (рис. 3).

Первые два этапа часто являются самыми нестабильными по времени. В течение этих этапов давление должно стабилизироваться. Турбулентность, возникающая в процессе заполнения, должна успокоиться, уплотнения должны приобрести стабильную деформацию.

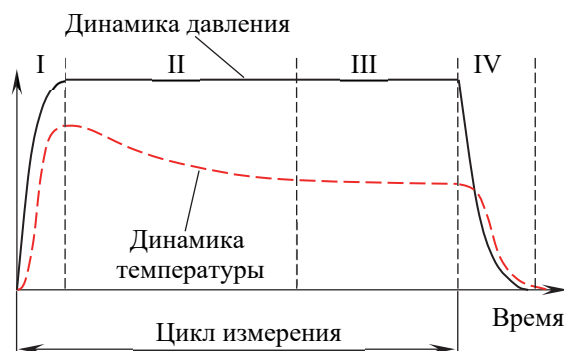


Рис. 3. Динамические процессы при измерении:

- I – время установки давления;
- II – установка температурных процессов;
- III – период измерения; IV – сброс давления

Как правило, более длительными бывают тепловые процессы. Температура испытательного воздуха обычно не совпадает с температурой детали. Также в процессе заполнения испытательный

воздух расширяется и, как следствие, охлаждается. Воздух в детали, наоборот, сжимается и нагревается. При прохождении через узкие места воздух может нагреваться вследствие силы трения. Если температура воздуха, как следствие сжатия, расширения и трения, обычно уравнивается достаточно быстро (на рис. 3 отражены именно эти процессы), то дрейфы температуры из-за балансировки температуры между деталью и воздухом могут происходить в некоторых случаях с большей длительностью. Процесс утечки может также оказывать свое влияние, что требует адаптивной фильтрации [15].

Идеальное изотермическое состояние труднодостижимо. Изменение температуры в детали оказывает влияние на давление. Часто этап балансировки сокращают. Используя газовые законы, границу между II и III можно сдвинуть и производить измерение протечки на более ранней фазе. В патентах можно встретить и другие предложения по сокращению полного времени тестирования.

Интересно отметить, что большинство уравнений расчета не учитывают уровень испытательного давления. Считается, что испытательное давление не влияет на величину изменения давления в испытательной камере.

Другими словами, величина падения давления в испытательной части всегда одинакова для одной и той же скорости утечки, независимо от того, составляет ли давление в испытательной части 1 бар или 10 бар. Однако скорость утечки через пористую область становится больше по мере приращения большего давления.

Методы контроля герметичности при эксплуатации. Количество методов, которые активно используются на промышленных предприятиях с запорной арматурой, системой трубопроводов и прочих элементов, гораздо больше, чем при их производстве и ремонте. Контроль герметичности также осуществляется часто нерегулярно и по мере необходимости. В источниках информации можно встретить разные подходы к классификации методов контроля герметичности [16] в условиях производства. Классификация на рис. 4 отражает методы контроля общего заводского применения.

Многие стандарты, которые упомянуты выше, применяются и в этой области. Однако при контроле герметичности арматуры и трубопроводной арматуры руководствуются не только нормативными документами.

Появление значимых утечек на производстве может существенно влиять на экономические показатели. На электростанциях, которые используют дымовые газы и пар для выработки электроэнергии, сотни единиц различного вида запорной арматуры, которые учувствуют в перераспреде-

лении материальных потоков высокого давления. И даже небольшие утечки могут давать существенный экономический эффект. Следует отметить, что герметичность запорной арматуры приходится часто оценивать с помощью косвенных измерений. Отличительной особенностью использования данного метода для анализа размеров утечек является применение большого количества новых способов обработки данных наряду со старыми спектральными методами.

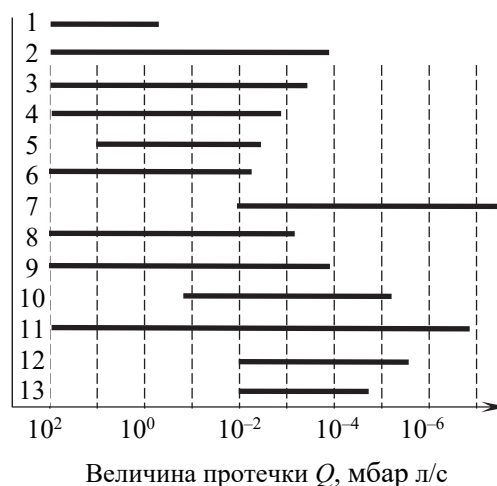


Рис. 4. Базовые пределы методов контроля герметичности:

- 1 – ультразвук; 2 – пузырьковый (с мылом);
- 3 – пузырьковый (гелий, спирт);
- 4 – погружения в воду (пузырьки);
- 5 – акустический; 6 – падение давления (без диф. давления); 7 – падение давления (с диф. давлением); 8 – падение вакуума;
- 9 – термопроводимость;
- 10 – использование галогенов;
- 11 – детектор водорода; 12 – вакуумная камера для проверки на утечку гелия изнутри;
- 13 – проверка на утечку гелия снаружи внутри

В целом оценка скорости утечки может быть выполнена двумя способами. Первый использует аналитические методы, основанные на известных физических соотношениях, из которых выводятся эмпирические выражения. Эти модели требуют эмпирических входных данных, поскольку проблема слишком сложна для моделирования с помощью чисто аналитических выражений. Наиболее релевантный пример этого метода был опубликован в работе [17], согласно которому скорость утечки двух типов клапанов определялась с помощью известной зависимости между акустической эмиссией и скоростью утечки. Второй способ оценки утечек – прямое сравнение с другими клапанами, которые, как известно, имеют утечки. Данные с этих эталонных негерметичных клапанов собираются на испытательном стенде. Метод сравнения между новым негерметичным клапаном

и эталонным набором может быть выполнен, например, с помощью регрессии [18]. В качестве данных для автоматического обнаружения и оценки могут быть использованы метод акустической эмиссии [19, 20, 21], измерение вибраций [22], динамика давления [23], тепловые эффекты [24].

Анализ данных можно проводить на основании частотных спектров для предоставления характеристик сигнатуры, определения среднеквадратических отклонений во временной области [25], вейвлет-преобразований [26], нейронных сетей [27], машинного обучения [28].

Такое разнообразие подходов затрудняет выбор лучшего варианта. Одни варианты обработки измерительной информации с датчика давления или акустического преобразователя (рис. 5) достаточно просты, другие требуют применения устройств с высокой вычислительной способностью. Лучший вариант до сих пор обсуждается [29].

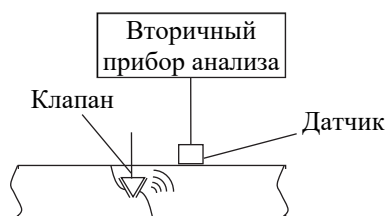


Рис. 5. Система акустического контроля герметичности

Считается, что метод акустической эмиссии (АЭ) может обеспечить более раннее обнаружение проблем с клапаном по сравнению с вибрацией, поскольку он менее восприимчив к шумам оборудования и более чувствителен к потокам жидкости и деформациям материала на микроскопическом уровне. АЭ с его широким диапазоном частот (от 100 кГц до 4 МГц) может улавливать характеристики динамики клапана и динамики потока, что обеспечивает более прямой способ обнаружения аномальных ударов и потоков клапана во время залипания. Относительно АЭ количество методов анализа во временной и частотной областях достаточно велико: кратковременное преобразование Фурье (STFT), быстрое преобразование Фурье (FFT), дискретное вейвлет-преобразование (DWT), вейвлет-пакетное преобразование (WPT), метод разложения ансамбля эмпирических мод (EEMD), метод локального среднего разложения (LMD) и алгоритм снижения размерности на основе главных компонент (PCA) и базисное преследование и сопоставление волн.

Контроль герметичности распределенных систем. Данное направление разработки методов и практик определения герметичности трубопроводных систем в последние годы развивается наиболее интенсивно. Это обусловлено многими причинами. Трубопроводная сеть постоянно рас-

ширяется, но данный вид транспорта не является абсолютно надежным. Трубы подвержены коррозии, существует также много внешних причин, которые приводят к утечкам. Потери в трубопроводах приводят в основном к экономическим потерям, тогда как утечки на газо- и нефтепроводах влекут за собой также экологические угрозы, ухудшают безопасность и т. д. Существуют и другие продукты, которые перемещаются с помощью трубопроводов со своими рисками.

В последнее время было опубликовано несколько обзоров в данном направлении, например [30, 31, 32, 33, 34].

Другие указывают на трудность построения четкой классификации и необходимость проведения декомпозиции методов обнаружения утечек по различным согласованным категориям. Выделяют следующие критерии [32]:

- аппаратная (техническое оформление метода контроля утечек);
- вычислительная (какие методы обработки лежат в основе)
- мобильность (физические аспекты как структура, мобильность, размещение);
- размещение (близость к трубопроводным системам) и т. д.

Каждый из коллективов авторов предоставляет свое видение подходов к классификации методов контроля герметичности. Классификации похожи, но придерживаются в каждом случае своих методологии и критериев. Один из вариантов представлен на рис. 6.

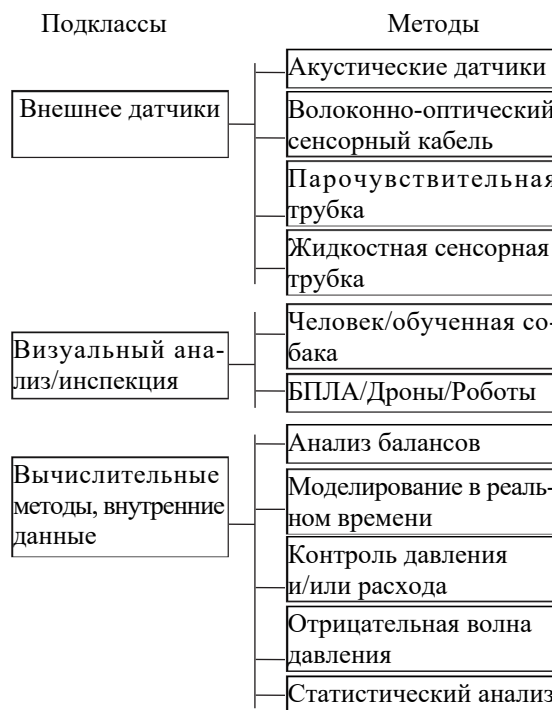


Рис. 6. Методы анализа герметичности распределенных трубопроводных систем

Как и в предыдущем случае, при обнаружении утечек трубопроводных систем используется большое количество математических методов обработки данных.

Статистический анализ является наиболее распространенным методом: анализ главных компонент (PCA); анализ независимых компонент (ICA), используется для пространственного уплотнения данных без потери достоверной информации; системы байесовского анализа (BIS); системы нечеткой обработки (FIS); линейный фильтр Калмана (KF); регрессия опорных векторов (SVR); теория графов; вейвлет-анализ; лагранжевые модели. Широко используются инструменты машинного обучения: искусственные нейронные сети (ANN); опорные векторные машины (SVM). Комбинация выше указанных методов позволяет построить гибридные решения по поиску утечек. Достаточно часто для обнаружения утечек используют методы модели переходного процесса в реальном времени (RTTM) и волновой анализ отрицательного давления (NPW) [35]. При RTTM утечка определяется по заметному отличию расчетных величин от замеров расхода в начале и конце трубы и промежуточных давлений. Фиксация прохождения волн падения давления, которые исходят от места утечки, лежит в основе NPW. Последние методы часто комбинируют.

Из обсуждения проблемы контроля герметичности распределенных сетей следует, что, в отличие от предыдущих областей, эффективную систему обнаружения утечек и их локализации невозможно построить без серьезного анализа данных, составления математических моделей наблюдаемых трубопроводных систем.

Некоторые авторы высказывают идею, что наиболее верной стратегией является использование гибридных решений. При этом выбирать следует, по возможности, ортогональные варианты.

Математические методы позволяют обнаружить наличие утечки, однако для локализации

рекомендуется использовать методы АЭ, растворы или визуальный анализ. Также хорошо использовать для этой цели волоконно-оптическое зондирование DTS или DAS. Однако для этого требуются большие первоначальные капитальные затраты. Следует отметить, что существуют ограничения на использование некоторых технологий для морских трубопроводов.

Заключение. Из приведенного анализа в статье следует, что в последние два десятилетия проблема анализа герметичности актуализировалась. Однако в зависимости от приложения развитие методов анализа герметичности происходит в разном ключе. На предприятиях, где анализ герметичности является встроенной операцией технологического цикла, имеется устойчивый набор приборов и установок, чаще всего промышленного изготовления. В данном направлении происходит только совершенствование методик испытаний, развитие дизайна для удобства оператора, повышение быстродействия автоматизации с интеграцией в общую систему управления предприятия.

В двух других направлениях происходит интенсивное развитие методологии диагностики протечек. Много усилий направлено на использование машинного обучения, нейронных сетей и других вычислительных методов, которые появились относительно недавно. Использование машинного обучения, которое так популярно в последнее время, сдерживается необходимостью и длительностью процесса обучения на реальных объектах.

В настоящее время активно развиваются методы диагностики с использованием беспилотных систем. В области сенсорики динамично развиваются детекторы ионизации пламени, инфракрасные камеры, ультразвуковые обнаружители утечек, а также оптические системы дистанционного зондирования и тепловизионный анализ.

Список литературы

1. Сухорукова И. Г. Анализ методов измерения герметичности конструкций для автоматического испытания запорной арматуры // Труды БГТУ. 2010. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 125–129.
2. Hilleret N. Leak Detection. CERN, Geneva, Switzerland. 203–212. 1999. Report number, CERN-OPEN-2000-280.
3. Методы контроля и испытаний. Арматура трубопроводная: ГОСТ 33257-2015. М.: Стандартинформ, 2016. 58 с.
4. American Petroleum Institute (API). API Standard 521: Pressure-relieving and Depressuring Systems. 6th ed. Washington, D.C: API Publishing, 2014. 260 p.
5. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 598: Valve Inspection and Testing. 11th ed. Washington, D.C: API Publishing, 2023. 17 p.
6. International Standard Organization (ISO). ISO 5208: Industrial valves – Pressure testing of metallic valves. 4th ed. Switzerland: ISO Publishing, 2015. 13 p.
7. Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fittings Industry, Inc. (MSS). Standard MSS SP-61-2019: Pressure Testing of Valves. Vienna, Virginia: MSS Publishing, 2019. 8 p.
8. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 6D: Specification for Pipeline and Piping Valves. 24th ed. Washington, D.C: API Publishing, 2014. 112 p.

9. European Standard. EN-12266-1:2012: Industrial Valves – Testing of Metallic Valves. Part 1. Pressure Tests, Test Procedures and Acceptance Criteria – Mandatory Requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2012. 17 p.
10. British Standards Institute (BSI). BS 6755-1: 1986. Testing of valves. Part 1. Specification for production pressure testing requirements. London: BSI Publishing, 1986. 14 p.
11. American National Standard Institute (ANSI). ANSI/FCI 70-2-2021. Control Valve Seat Leakage. Cleveland, OH: Fluids Controls Institute, 2021. 12 p.
12. Leak Test Handbook Measuring, Testing, Practical Use. URL: https://www.jwf.com/fileadmin/userupload/downloadfiles/200423-jwf-lecktestfibel_EN_LOWRES.pdf (accessed 13.12.2024).
13. Werner G. B. Helium leak detectors: from a laboratory device to dedicated industrial leak test units // Vacuum. 1993. Vol. 44, issues 5–7. P. 627–632. DOI: 10.1016/0042-207X(93)90112-N.
14. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Повышение чувствительности измерителя протечек запорной арматуры // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 132–136.
15. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Влияние условий фильтрации и сглаживания в информационных каналах на критерий серий // Труды БГТУ. 2016. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 117–121.
16. Study on Leak Testing Methods / R. Bhosale [et al.]. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323219717> (accessed 13.12.2024).
17. Kaewwaewnoi W., Prateepasen A., Kaewtrakulpong P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage // Measurement. 2010. Vol. 43. P. 274–282.
18. Wagner H. Innovative techniques to deal with leaking valves // Tech Papers ISA. 2004. Vol. 454. P. 105–117.
19. A study of the characteristics of the acoustic emission signals for condition monitoring of check valves in nuclear power plants / J. H. Lee [et al.] // Nuclear Eng Des. 2006. Vol. 236. P. 1411–1421.
20. Novel leakage detection method by improved adaptive filtering and pattern recognition based on acoustic waves / Z. Chi [et al.] // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 2022. Vol. 36 (2). P. 2259001. DOI: 10.1142/S0218001422590017.
21. Pouye A., Rondeau A., Lafargue E. Acoustic Emissions – Application on Industrial Valve Leak Rate Quantification // 29th International Congress on Sound and Vibration 9–13 July 2023. Prauge, Czech Republic, 2023. P. 1–8.
22. Thompson G., Zolkiewski G. Experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis // Proc Inst Mech Eng. Part E. J Process Mech Eng., 1997. Vol. 211. P. 195–207.
23. Online valve monitoring systems used on off-shore platforms in the north sea / T. Juvik [et al.] // In 21st International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering. Oslo, Norway, 5, 2002. P. 1–5. DOI: 10.1115/OMAE2002-28403.
24. Hamilton S., Charalambous B. Leak Detection: Technology and Implementation. IWA Publishing. 2013. 112 p. DOI: 10.2166/9781789060850.
25. Quantification of valve leakage rates / E. Meland // American Institute of Chemical Engineers Journal. 2012. Vol. 58 (4). P. 1181–1193. DOI: 10.1002/aic.12630.
26. Investigation of Pressure Signal and Leak Detection in Pipes by Using Wavelet Transform in Transient Flow / R. N. Vafaei [et al.] // Engineering Proceedings. 2024. Vol. 69 (1). P. 76. DOI: 10.3390/engproc2024069076.
27. Convolutional neural networks-based valve internal leakage recognition model / S.-B. Zhu [et al.] // Measurement. 2021. Vol. 178. P. 109395. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109395.
28. Machine learning modeling for spectral transient-based leak detection / V. Asghari [et al.] // Automation in Construction. 2023. Vol. 146. P. 104686. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104686.
29. Detection and estimation of valve leakage losses in reciprocating compressor using acoustic emission technique / H. Y. Sim [et al.] // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107315. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107315.
30. A review on current technologies and future direction of water leakage detection in water distribution network / M. R. Islam [et al.] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 107177–107201. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212769.
31. Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors / X. Wan [et al.] // Journal of Water Resources Planning and Management. 2022. Vol. 148 (10). P. 03122002. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001597.
32. Review and analysis of pipeline leak detection methods / N. V. S. Korlapati [et al.] // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2022. Vol. 2, issue 4. P. 100074. DOI: 10.1016/j.jpse.2022.100074.
33. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective / L. Romero-Ben [et al.] // Annual Reviews in Control. 2023. Vol. 55. P. 392–419. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.03.012.

34. A Review of Leakage Detection Strategies for Pressurised Pipeline in Steady-State / D. Zaman [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. 2019. P. 104264. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104264.

35. Альперович И. В. Численные эксперименты с методом RTFS на математической модели отборов из нефтепровода при стационарном режиме перекачки // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2023. № 2. С. 11–15.

References

1. Sukhorukova I. G. Analysis of methods for measuring the tightness of structures for automatic testing of shut-off valves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2010, no. 6, Physics and Mathematics. Informatics, pp. 125–129 (In Russian).
2. Hilleret N. Leak Detection. CERN, Geneva, Switzerland, 203–212, 1999, Report number, CERN-OPEN-2000-280.
3. GOST 33257–2015. Methods of control and testing. Pipeline fittings. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 58 p. (In Russian).
4. American Petroleum Institute (API). API Standard 521: Pressure-relieving and Depressuring Systems. 6th ed. Washington, D.C., API Publishing, 2014. 260 p.
5. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 598: Valve Inspection and Testing. 11th ed. Washington, D.C., API Publishing, 2023. 17 p.
6. International Standard Organization (ISO). ISO 5208: Industrial valves – Pressure testing of metallic valves. 4th ed. Switzerland, ISO Publishing, 2015. 13 p.
7. Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fittings Industry, Inc. (MSS). Standard MSS SP-61-2019: Pressure Testing of Valves. Vienna, Virginia, MSS Publishing, 2013. 8 p.
8. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 6D: Specification for Pipeline and Piping Valves. 24rd ed. Washington, D.C, API Publishing, 2014. 112 p.
9. European Standard. EN-12266-1:2012: Industrial Valves – Testing of Metallic Valves. Part 1. Pressure Tests, Test Procedures and Acceptance Criteria – Mandatory Requirements. Brussels, European Committee for Standardization Publ., 2012. 17 p.
10. British Standards Institute (BSI). BS 6755-1: 1986. Testing of valves. Part 1. Specification for production pressure testing requirements, 1986. 14 p.
11. American National Standard Institute (ANSI). ANSI/FCI 70-2-2013. Control Valve Seat Leakage. Cleveland, OH, Fluids Controls Institute Publ., 2013. 12 p.
12. Leak Test Handbook Measuring, Testing, Practical Use. Available at: https://www.jwf.com/fileadmin/userupload/downloadfiles/200423-jwf-lecktestfibel_EN_LOWRES.pdf (accessed 13.12.2024).
13. Werner G. B. Helium leak detectors: from a laboratory device to dedicated industrial leak test units. *Vacuum*, 1993, vol. 44, issues 5–7, pp. 627–632. DOI: 10.1016/0042-207X(93)90112-N.
14. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobey I. O. Increasing the sensitivity of the leakage meter for shut-off valves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 132–136 (In Russian).
15. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobey I. O. The influence of filtering and smoothing conditions in information channels on the series criterion. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 117–121 (In Russian).
16. Bhosale R., Kumbhar P., Mahajan K., Yachkal A., Katarkar Anil. Study on Leak Testing Methods, 2017. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/323219717> (accessed 13.12.2024).
17. Kaewwaewnoi W., Prateepasen A., Kaewtrakulpong P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage. *Measurement*, 2010, vol. 43, pp. 274–282.
18. Wagner H. Innovative techniques to deal with leaking valves. *Tech Papers ISA*, 2004, vol. 454, pp. 105–117.
19. Lee J. H., Lee M. R., Kim J. T., Luk V., Jung Y. H. A study of the characteristics of the acoustic emission signals for condition monitoring of check valves in nuclear power plants. *Nuclear Eng Des*, 2006, vol. 236, pp. 1411–1421.
20. Chi Z., Jiang J., Diao X., Chen Q., Ni L., Wang Z., Shen G. Novel leakage detection method by improved adaptive filtering and pattern recognition based on acoustic waves. *Int. J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2022, vol. 36 (2), p. 2259001. DOI: 10.1142/S0218001422590017.
21. Pouye A., Rondeau A., Lafargue E. Acoustic Emissions – Application on Industrial Valve Leak Rate Quantification. *29th International Congress on Sound and Vibration 9–13 July, 2023*. Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1–8.
22. Thompson G, Zolkiewski G. Experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis. *Proc Inst Mech Eng. Part E. J Process Mech Eng*, 1997, vol. 211, pp. 195–207.

23. Juvik T., Hermansen T., Carr R., Hale S. Online valve monitoring systems used on off-shore platforms in the north sea. In *21st International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering*. Oslo, Norway, 5, 2002, pp. 1–5. DOI: 10.1115/OMAE2002-28403.
24. Hamilton S., Charalambous B. Leak Detection: Technology and Implementation. IWA Publishing, 2013, 112 p. DOI: 10.2166/9781789060850.
25. Meland E., Thornhill N., Lunde E., Rasmussen M. Quantification of valve leakage rates. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 2012, vol. 58 (4), pp. 1181–1193.
26. Vafaei R. N., Nadian H. A., Ranzi R., Rahmanshahi M., Bejestan M. S. Investigation of Pressure Signal and Leak Detection in Pipes by Using Wavelet Transform in Transient Flow. *Engineering Proceedings*, 2024, vol. 69 (1), p. 76. DOI: 10.3390/engproc2024069076.
27. Zhu S.-B., Li Z.-L., Li X., Xu H.-h., Wang X., Convolutional neural networks-based valve internal leakage recognition model. *Measurement*, 2021, vol. 178, pp. 109395. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109395.
28. Asghari V., Kazemi M. H., Duan H.-F., Hsu S.-C., Keramat A. Machine learning modeling for spectral transient-based leak detection. *Automation in Construction*, 2023, vol. 146, p. 104686. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104686.
29. Sim H. Y., Ramli R., Saifizul A., Soong M. F. Detection and estimation of valve leakage losses in reciprocating compressor using acoustic emission technique. *Measurement*, 2020, vol. 152, p. 107315. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107315.
30. Islam M. R., Azam S., Shanmugam B., Mathur D. A review on current technologies and future direction of water leakage detection in water distribution network. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 107177–107201. DOI: 10.1109/access.2022.3212769.
31. Wan X., Kuhanestani P. K., Farmani R., Keedwell E. Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2022, vol. 148 (10), p. 03122002. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001597.
32. Korlapati N. V. S., Khan F., Noor Q., Mirza S., Vaddiraju S. Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2022, vol. 2, issue. 4, p. 100074. DOI: 10.1016/j.jpse.2022.100074.
33. Romero-Ben L., Alves D., Blesa J., Cembrano G., Puig V., Duviella E. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annual Reviews in Control*, 2023, vol. 55, pp. 392–419. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.03.012.
34. Zaman D., Tiwari M. K., Gupta A. K., Sen D. A. Review of Leakage Detection Strategies for Pressurised Pipeline in Steady-State. *Engineering Failure Analysis*, 2019, p. 104264. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104264.
35. Alperovich I. V. Numerical experiments with the RTFS method on a mathematical model of selections from an oil pipeline under a steady-state pumping mode. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials], 2023, no. 2, pp. 11–15. (In Russian).

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: hryniukda@gmail.com

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Олиферович Надежда Михайловна – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniukda@gmail.com

Suhorukova Irina Gennad'yevna – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

Поступила после доработки 15.01.2025

ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ PROCESSING AND TRANSMISSION OF INFORMATION

УДК 004.56

А. А. Хартанович

Белорусский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ И КОДОВ РИДА – СОЛОМОНА В СИСТЕМАХ ИЗБЫТОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Обеспечение надежного хранения и передачи данных представляет собой серьезную проблему в современном информационном обществе. Кодирование информации является одним из направлений исследований и разработок, которое позволяет достаточно эффективно решать проблему достоверности информации. В рамках такого подхода известны методы, основанные на комбинации двух различных кодов, которые позволяют исправлять различные типы ошибок. В статье предлагается ранее не исследованная комбинация, состоящая из кодов LDPC и Рида – Соломона для коррекции случайных и пакетных ошибок соответственно. Исследуются и анализируются производительность исправления ошибок и вычислительная эффективность упомянутой комбинации кодов. Моделирование Монте-Карло показывает, что данный подход обеспечивает более низкий коэффициент битовых ошибок. При этом скорость кодирования и декодирования предлагаемой комбинации достаточна для обработки различных объемов данных. Описаны методы повышения производительности и направления использования комбинирования низкоплотностных кодов и кодов Рида – Соломона в системах защиты информации и стеганографических системах. Результаты показывают, что сильные стороны обоих методов кодирования в комбинации значительно повышают целостность данных в зашумленных каналах связи, сохраняя при этом разумные скорости кодирования и декодирования.

Ключевые слова: кодирование, избыточные коды, коды Рида – Соломона, коды LDPC, комбинированный подход.

Для цитирования: Хартанович А. А. Использование низкоплотностных кодов и кодов Рида – Соломона в системах избыточного кодирования информации // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 47–55.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-8.

A. A. Khartanovich

Belarusian State Technological University

USING LOW-DENSITY CODES AND REED – SOLOMON CODES IN REDUNDANT INFORMATION CODING SYSTEMS

Ensuring reliable storage and transmission of data is a serious problem in the modern information society. Information coding is one of the areas of research and development that allows solving the problem of information reliability quite effectively. Within the framework of this approach, methods are known based on a combination of two different codes that allow correcting various types of errors. The article proposes a previously unexplored combination consisting of LDPC and Reed – Solomon codes for correcting random and burst errors, respectively. The error correction performance and computational efficiency of the mentioned code combination are investigated and analyzed. Monte Carlo simulation shows that this approach provides a lower bit error rate. At the same time, the encoding and decoding speed of the proposed combination is sufficient to process various data volumes. The methods for increasing the performance and directions of using a combination of low-density codes and Reed – Solomon codes in information security systems and steganographic systems are described. The results show that the strengths of both coding methods in combination significantly improve data integrity in noisy communication channels while maintaining reasonable encoding and decoding rates.

Keywords: coding, redundant codes, Reed – Solomon codes, LDPC codes, combined approach.

For citation: Khartanovich A. A. Using low-density codes and Reed – Solomon codes in redundant information coding systems. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 47–55 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-8.

Введение. В современном мире информация играет важную роль, так как она влияет на все аспекты жизни и развития общества. Обеспечение безопасности и достоверности при обмене информацией является одной из главных задач. Информация, передаваемая или хранимая различными способами, должна удовлетворять условию целостности данных, что помогает удостовериться в том, что она не была изменена или повреждена. В связи с этим возникает проблема, связанная с защитой информации от искажения при передаче и хранении, например, из-за действия шумов в каналах связи или при несанкционированном доступе к данным с целью их изменения и впоследствии к утрате корректных данных [1].

Наиболее популярным решением данной проблемы является применение избыточного кодирования [2], которое использует дополнительные данные с целью обнаружения и исправления ошибок, возникающих в процессе передачи или хранения информации в различных системах, структурах или каналах. Особенность данного кодирования представляется в виде добавления к исходному сообщению (исходной информации) избыточных данных, которые не влияют на смысл передаваемого сообщения, а лишь используются для того, чтобы при получении сообщения проверить его корректность. В случае, если сообщение оказывается некорректным, то можно использовать избыточные данные для исправления ошибок и получения достоверного сообщения.

В каналах связи возникают случаи, когда из-за действия шумов в сообщении возникают случайные одиночные и (или) множественные и (или) пакетные ошибки (ошибки в нескольких последовательных битах) [3–4]. В зависимости от выбираемого алгоритма кодирования избыточные коды способны исправлять оба типа ошибок. Однако нередко возникает проблема, когда полученное сообщение содержит одновременно и пакетные, и случайные ошибки. К таким сообщениям необходимо последовательно применять два избыточных кода, что снизит пропускную способность канала: первым может быть код, который исправит пакетные ошибки, а вторым – код, исправляющий случайные ошибки.

В настоящее время заслуживающим внимание решением данной проблемы является метод комбинирования известных избыточных кодов с целью исправления большего числа ошибок и приближения к оптимальной пропускной способности канала [5]. Для этого необходимы коды, исправляющие различные виды ошибок с высо-

кими корректирующими способностями, а также эффективные конструкции декодирования сообщения.

Для исправления пакетных ошибок наиболее известными и эффективными являются коды Фейра, Рида – Соломона (РС), БЧХ, турбокоды и операции перемежения/деперемежения совместно с традиционными кодами. Среди избыточных кодов, исправляющих одиночные ошибки, эффективными являются циклические и фонтанные коды, коды Хэмминга и LDPC.

В данной статье рассматривается новый подход в использовании комбинации различных кодов для коррекции пакетных и случайных ошибок на основе РС и LDPC соответственно, а также описывается оценка эффективности упомянутого комбинирования.

Основная часть. Коды LDPC (low-density parity-check) характеризуются их определением как low-density, то есть матрицы проверки на четность должны быть разреженными, что означает то, что они должны содержать в основном нули и небольшое количество единиц [6, 7]. За счет данного свойства значительно упрощается процесс кодирования и декодирования. Коды LDPC способны корректировать большое количество случайных ошибок с относительно низкой вычислительной сложностью и могут достигать производительности, близкой к пределу Шеннона [8]. Данные коды не имеют строгого предела по количеству исправляемых ошибок, так как оно зависит главным образом от скорости кода и длины кодового слова: более низкая скорость приводит к лучшему исправлению ошибок. Однако недостатком LDPC является их слабая способность исправления пакетных ошибок. Поэтому в качестве второго кода для комбинированного подхода предлагается использовать РС [9].

Коды РС особенно эффективны для исправления пакетных ошибок и стираний. Если код добавляет к исходному сообщению $2t$ избыточных символов, то он может исправить до t ошибок в блоке.

Исходя из свойств кодов LDPC и РС можно сделать вывод о том, что они взаимодополняемы, что делает возможным их совместное применение в схеме на основе использования комбинирования двух кодов. Данное кодирование способно исправлять оба типа ошибок и работать более эффективно, уменьшая количество избыточных битов, минимизируя при этом время обработки.

Система на основе комбинированного подхода предполагает использование внутреннего

кода для исправления пакетных ошибок, чтобы не нарушать последовательность бит, и внешнего кода для исправления оставшихся случайных ошибок (рис. 1).

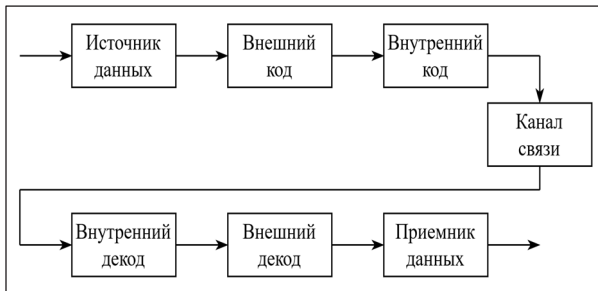


Рис. 1. Структурная схема информационной системы на основе комбинирования двух кодов

В качестве внутреннего предлагается использование кода PC, а в качестве внешнего – LDPC. Чтобы оценить эффективность комбинирования двух кодов, необходимо учитывать такие показатели, как частота ошибок по битам (BER – Bit Error Rate) после декодирования, равная количеству битовых ошибок, деленных на общее количество бит, скорость кода и отношение сигнал/шум (SNR – Signal-to-noise Ratio), равное мощности полезного сигнала к мощности шума.

После проведенного анализа эффективных кодов [10, 11] был построен график зависимости BER от SNR среди турбокода, кодов LDPC, PC, сверточного и БЧХ. Для построения кривой графика комбинации LDPC и PC используется моделирование Монте-Карло [12] с помощью библиотек языка Python, которое основывается на первоначальном кодировании информации с помощью LDPC, после – кодом PC, далее на передаче сообщения по шумному каналу и последующем декодировании (рис. 2). При моделировании приме-

няются различные длины блоков, скорость кодов, количество ошибок и уровень SNR.

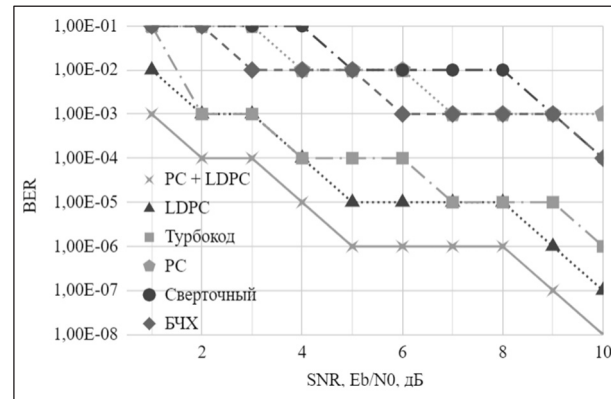


Рис. 2. График зависимости BER от SNR

Возможность комбинированного кода с исправлением пакетных и случайных ошибок обеспечивает самый низкий BER на всех уровнях SNR, что особенно эффективно в смешанных шумовых средах. В этом заключается рациональное использование предлагаемой комбинации.

Исходя из анализа можно сделать некоторые выводы, которые для наглядности представлены в виде табл. 1.

LDPC, турбокоды, БЧХ и сверточные коды способны исправлять случайные ошибки, коды PC – пакетные. LDPC обеспечивает самый низкий BER для случайных ошибок и хорошо работает в средах с высоким SNR, но ухудшается сильнее при низком SNR без дополнительных слоев коррекции ошибок. Турбокод эффективен в средах с низким SNR, особенно для случайных ошибок, но менее эффективен, чем LDPC в условиях с высоким SNR. PC лучше всего подходит для пакетной коррекции, но менее эффективен для случайного шума, особенно при низком SNR.

Таблица 1

Сравнение производительности комбинированного и одиночных кодов

Код	Тип исправляемых ошибок	Производительность
LDPC + PC	Случайные и пакетные	Достаточно хорошая производительность как для пакетных, так и для случайных ошибок. Производительность, близкая к пределу Шеннона для комбинированных систем
Турбокод	Случайные	Производительность близка к пределу Шеннона. Чувствительность к пакетным ошибкам по сравнению с PC + LDPC
LDPC	Случайные	Производительность вблизи предела Шеннона. Менее эффективна против пакетных ошибок
PC	Пакетные	Отлично подходит для пакетных ошибок. Слабее для случайных ошибок. Повышенная вычислительная сложность для длинных блоков
Сверточный	Случайные	Умеренная производительность. Обычно более низкая способность исправления ошибок по сравнению с LDPC и турбокодами
БЧХ	Случайные	Более сильная коррекция ошибок, чем у сверточных кодов. Недостаточно эффективная производительность, как у LDPC или турбокодов для высоких скоростей передачи данных

БЧХ код является достаточно хорошим для коррекции случайных ошибок, но менее эффективен, чем код LDPC и турбокод. Сверточный код в целом уступает коду LDPC и турбокоду, особенно в средах с высоким SNR. Комбинированный подход на основе данного анализа обеспечивает наилучшую производительность как для случайной, так и для пакетной коррекции ошибок, что делает его наиболее надежным вариантом для всех уровней SNR.

В связи с уменьшением коэффициента BER уменьшается и скорость кода. На основе работ [13–17] выяснено, что самая высокая скорость наблюдается у кодов LDPC, БЧХ и сверточного, которая напрямую зависит от размера блока, количества ошибок для исправления, длины ограничения и алгоритма Витерби соответственно, но они не способны исправлять по-отдельности все типы ошибок. Другие коды имеют умеренную скорость, зависящую в основном от размера блока данных. С учетом индивидуальных скоростей кодирования и декодирования LDPC и PC совокупная скорость комбинированной системы в большей степени будет зависеть от более медленного из двух кодов, поэтому предполагать скорость работы комбинации нужно исходя из скорости PC. В силу того, что код LDPC имеет высокую скорость за счет итеративных вычислений и разреженной матрицы проверки на четность, а код PC может быть интенсивно вычислительным из-за того, что использует алгебраический метод (синдромы, полиномы) кодирования и декодирования блоков данных, комбинированный подход обеспечивает достойное исправление ошибок, но его следует рассматривать для данных относительно небольших размеров для достижения наилучших показателей скорости работы, а также не следует использовать в системах, где требуется быстрое действие передачи больших объемов данных.

Комбинированный подход для малых объемов эффективен, так как скорость кодирования LDPC показывает отличные результаты на всех объемах данных, а PC лучше всего работает с данными размеров до 1 килобайта (Кб), что обеспечивает в совокупности комбинированное кодирование с максимальной скоростью

до 200 мегабит в секунду (Мб/с). Декодирование также эффективно из-за скорости кода PC и того, что LDPC коду для небольших блоков данных потребуется всего несколько итераций для исправления. Такая комбинация приведет к низкому коэффициенту битовых ошибок даже в шумных условиях.

Данные о скорости работы кодов представлены в виде табл. 2, где М – кодируемое сообщение объемом до 1 Кб, 100 Кб и 10 Мб. Предполагаемая скорость комбинации основывается на максимальной скорости кодирования и декодирования PC, так как он имеет значительное влияние из-за более медленной работы по сравнению с LDPC.

По мере увеличения размера данных увеличиваются и размеры блоков, обрабатываемых кодами PC и LDPC, что приводит к более медленному процессу кодирования. Скорость декодирования общей схемы замедляется из-за необходимости увеличения количества итераций у кода LDPC, в то же время PC по-прежнему хорошо обрабатывает пакетные ошибки, но значительно уступает в скорости. BER остается низким, поскольку декодирование LDPC обеспечивает исправление большинства случайных ошибок после того, как код PC справится с пакетными ошибками. Однако производительность может ухудшиться, особенно если SNR очень низкое. Для больших объемов данных сложность кодирования PC и LDPC становится значительной, так как скорость LDPC на больших блоках замедляется, а время на кодирование PC, особенно с большой длиной кода, становится слабым местом. Декодирование PC должно обрабатывать большие блоки, а итеративное декодирование LDPC становится ограниченным в производительности, которое особенно медленно при работе с большими наборами данных в шумных средах, так как для точности требуется больше итераций. Комбинированный подход по-прежнему обеспечивает достаточно высокое качество исправления ошибок для больших объемов, особенно в средах, подверженных пакетным ошибкам, однако компромиссом является скорость, поскольку время декодирования резко увеличивается, что является особенно существенным для приложений, работающих в реальном времени.

Таблица 2

Сравнение максимальной скорости работы кодов

Код	Скорость кодирования, Мб/с			Скорость декодирования, Мб/с		
	М < 1 Кб	М < 100 Кб	М < 10 Мб	М < 1 Кб	М < 100 Кб	М < 1 Мб
Турбокод	200	100	20	100	70	15
LDPC	800	400	200	700	400	150
PC	200	100	50	150	80	30
Сверточный	300	150	100	200	100	70
БЧХ	250	150	80	200	100	50
PC + LDPC	200 (максимальная PC)	100 (максимальная PC)	50 (максимальная PC)	150 (максимальная PC)	80 (максимальная PC)	30 (максимальная PC)

В итоге скорость кодирования и декодирования комбинированного подхода выполняется относительно быстро для небольших объемов данных, но уменьшается для средних и больших. В то же время комбинация обеспечивает отличную производительность исправления ошибок для всех размеров данных, гарантируя низкий BER в большинстве сред. Комбинация кодов PC и LDPC на основе анализа хорошо подходит для приложений реального времени, таких как телекоммуникации или потоковая передача, где необходимо быстро обрабатывать небольшие сообщения. Подходит для систем со средней пропускной способностью, например, спутниковая связь, хранение данных с умеренными требованиями к задержке, где их целостность имеет решающее значение, а пакетные ошибки являются обычным явлением. А также подходит для автономных или приложений не в реальном времени, требующих высокой эффективности исправления ошибок, таких как, например, архивное хранение или передача больших объемов данных по шумным каналам. Как итог, данный подход имеет преимущество в использовании для систем, где целостность данных важнее скорости работы.

Несколько комбинированных подходов к кодированию с исправлением ошибок используются в современном мире в различных системах передачи и хранения. Сравнительные выводы о характеристиках известных комбинаций с рассматриваемым LDPC и PC были сделаны на основе нескольких работ [18–22]. Эти коды часто объединяют различные типы исправления ошибок, используемых в промышленности. Их основные преимущества и недостатки представлены в виде табл. 3.

Производительность PC и LDPC максимальная среди всех рассматриваемых кодов на небольших объемах данных размером до 1 Кб, что свидетельствует о том, что данная комбинация является целесообразной и практичной для реализации и использования.

Подводя итог, необходимо подчеркнуть, PC и LDPC обеспечивает сильную сбалансированную производительность, но лучше всего подходит для приложений, где исправление имеет приоритет над задержкой, особенно когда необходимо устранить как пакетные, так и случайные ошибки.

Существуют методы, позволяющие улучшить производительность предлагаемого комбинированного подхода путем распараллеливания работы кода LDPC, что существенно снизит задержки при передаче данных и ускорит работу кодирования. Для этого могут использоваться оптимизация матрицы проверки на четность, многоуровневое декодирование, метод уменьшения количества итераций при кодировании и декодировании сообщения, в том числе механизм раннего завершения для уменьшения количества итераций в зависимости от условий канала, а также параллельный метод использования нескольких субдекодеров [23, 24]. Для улучшения производительности кода PC возможны случаи применения как систематических кодов, так и алгоритмов Берлекэмп – Мессе, Форни или параллельной обработки [25].

Преимуществом использования подхода комбинирования кодов PC и LDPC является надежная возможность исправления двух видов ошибок, что значительно снижает возникновение некорректности, требующей повторной передачи данных, из-за чего повышается эффективность пропускной способности канала.

Таблица 3

Сравнение известных комбинированных кодов с кодом PC + LDPC

Комбинированный код	Преимущества	Недостатки	Сравнение с PC + LDPC
Коды турбопродуктов	Близкий к пределу Шеннона, хорошая коррекция случайных ошибок	Низкая скорость декодирования, слабая коррекция пакетных ошибок	PC + LDPC эффективнее для пакетных ошибок, но скорость работы ниже
PC + Сверточный	Хорошая коррекция пакетных ошибок	Слабая коррекция случайных ошибок	PC + LDPC эффективнее для исправления случайных ошибок
Полярный + CRC	Высокая производительность, эффективен для небольших данных	Высокая задержка для больших данных, слабая коррекция пакетных ошибок	PC + LDPC скорость работы выше для больших данных, эффективнее для пакетных ошибок
LDPC + БЧХ	Высокая пропускная способность, низкая задержка	Слабая коррекция пакетных ошибок	PC + LDPC эффективнее для пакетных ошибок, но скорость работы ниже
Турбокод + PC	Низкое значение BER, хорошая коррекция случайных ошибок	Низкая скорость декодирования	PC + LDPC скорость работы выше для больших данных

Система на основе комбинирования кодов, обеспечивая надежное исправление ошибок скрытых данных при внедрении, может улучшить стеганографию [26].

Когда сообщение встраивается в определенные области контейнера, искажения могут повлиять на последовательные биты, вызывая при этом пакетные ошибки – коды РС способны восстановить исходную информацию, даже если сегмент данных поврежден. Случайные ошибки могут возникнуть в стеганографических системах из-за шума в каналах или искажений в процессе сжатия – коды LDPC исправят это, что сделает скрытые данные более устойчивыми к различным типам атак.

Подход комбинирования на основе избыточных кодов, позволяя внедрять меньше данных, сохраняя при этом высокую надежность, обеспечивает эффективное исправление ошибок [27]. Это сводит к минимуму изменения в контейнере-носителе, тем самым снижает вероятность обнаружения методами стеганоанализа.

На основе анализа выявлено, что особым преимуществом пользуется встраивание информации в контейнер-изображение методом дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), который обеспечивает некоторую устойчивость к сжатию, обрезке, вращению и масштабированию, сохраняя при этом незаметность, так как данные внедряются в коэффициенты преобразования [28]. ДВП раскладывает изображение на поддиапазоны (LL, LH, HL, HH) различных частотных значений, где высокочастотные поддиапазоны (LH, HL, HH) используются для встраивания сообщения. В силу

того, что внедрение происходит в частотные характеристики изображения, данные меньше подвержены изменениям и потере в случае модификации контейнера.

Применение комбинации РС и LDPC с методом ДВП может позволить восстановить исходное сообщение даже при значительных изменениях в силу преимуществ обоих.

Заключение. Предложенный и проанализированный подход комбинированного кодирования информации основан на двух избыточных кодах: РС как внутреннего и LDPC как внешнего. Данная комбинация способна исправить множественные ошибки, включая пакетные и случайные, что значительно повышает корректирующую способность. На основе проведенных анализов рассмотрены характеристики комбинированного РС и LDPC, а также некоторых одиночных и комбинированных кодов, в ходе чего выявлены основные преимущества и недостатки. Особым достоинством предлагаемого подхода является низкий коэффициент битовых ошибок после декодирования и достаточно эффективная скорость работы для небольших объемов данных.

Научный и практический интерес представляет дальнейшее развитие исследований в данной предметной области, связанное с оценкой пропускной способности канала, корректирующими способностями комбинации на основе кодов РС и LDPC для повышения надежности и эффективности системы избыточного кодирования, а также метод использования комбинации в стеганографических приложениях.

Список литературы

1. Урбанович П. П. Защита информации методами криптографии, стеганографии и обфускации. Минск: БГТУ, 2016. 220 с.
2. Hamming R. W. Error detecting and error correcting codes // The Bell System Technical Journal. 1950. Vol. 29, no. 2. P. 147–160. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.
3. Meggitt J. E. Error-correcting codes for correcting bursts of errors // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part I. Communication and Electronics. 1961. Vol. 79, no. 6. P. 708–711. DOI: 10.1109/TCE.1961.6373036.
4. Nguyen H., Shwedyk E. Probability theory, random variables and random processes // A First Course in Digital Communications. Cambridge University Press. 2009. P. 77–134. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841583.004>.
5. Compiled Code Study of Joint Parity and Cyclic Redundancy Check / G. Xiaoqing [et al.] // IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2022. P. 77–80. DOI: 10.1109/ICEICT55736.2022.9909046.
6. Gallager R. Low-density parity-check codes // IRE Transactions on Information Theory. 1962. Vol. 8, no. 1. P. 21–28. DOI: 10.1109/TIT.1962.1057683.
7. Хартанович А. А. Сравнительный анализ современных избыточных кодов и их применение в стеганографии // Информационные технологии: материалы 88-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. Минск, 2024. С. 19–22.
8. Computational complexities and relative performance of LDPC codes and turbo codes / J. Zuo [et al.] // IEEE 4th International Conference on Software Engineering and Service Science. 2013. P. 251–254. DOI: 10.1109/ICSESS.2013.6615299.

9. Burst-error-correcting algorithm for Reed-Solomon codes and its performance over a bursty channel / L. Yin [et al.] // IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. 2002. Vol. 1. P. 77–81. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCAS.2002.1180576>.
10. Bingrui W., Qingli Z. Study of performance comparison of satellite error correction codes for correcting big burst data errors // IEEE 3rd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA). 2018. P. 254–258. DOI: <https://doi.org/10.1109/icbda.2018.8367687>.
11. Performance comparison of turbo codes with LDPC codes and with BCH codes for forward error correcting codes / M. Alwan [et al.] // IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). 2015. P. 556–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCORED.2015.7449398>.
12. Monte Carlo simulation of the binary communications system based on Matlab / J. Liu [et al.] // International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011. P. 2368–2370. DOI: [10.1109/ICECENG.2011.6057010](https://doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6057010).
13. Воробьев Э. И., Преображенский Ю. П. Исследование помехоустойчивого кодирования различных файлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4: Системы безопасности. С. 535–544. DOI: [10.26102/2310-6018/2018.23.4.040](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.23.4.040).
14. Li J. The efficient implementation of Reed-Solomon high rate erasure resilient codes // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2005. Vol. 3. P. 1097–1100. DOI: [10.1109/ICASSP.2005.1415905](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2005.1415905).
15. New architectures for fast convolutional encoders and threshold decoders / D. Haccoun [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1988. Vol. 6, no. 3. P. 457. DOI: [10.1109/49.1923](https://doi.org/10.1109/49.1923).
16. Ma X., Yang, E. Low-Density Parity-Check Code with Fast Decoding Speed // IEEE Transactions on Information Theory. 2006. 44 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0602081>.
17. Abbasfar A. Turbo-like Codes: Design for High Speed Decoding. 2007. 84 p.
18. Turbo Product Codes: Applications, Challenges, and Future Directions / H. Mukhtar [et al.] // IEEE Communications Surveys And Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 4. P. 3052–3069. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2587863>.
19. Mergu K. Performance Analysis of Reed-Solomon Codes Concatenated with Convolutional Codes Over AWGN Channel // APTIKOM Journal on Computer Science and Information Technologies. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.11591/APTIKOM.J.CSIT.100>.
20. Performance Analysis of CRC-Polar Concatenated Codes / L. Sari [et al.] // Jurnal infotel. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.20895/INFOTEL.V12I4.494>.
21. Design and Simulation of Parallel BCH Code with LDPC Code For Flash Memories / A. Mahdy [et al.] // 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG). 2020. P. 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171743>.
22. On the concatenation of turbo codes and Reed-Solomon codes / G. Zhou [et al.] // IEEE International Conference on Communications. 2003. Vol. 3. P. 2134–2138. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2003.1204021>.
23. Романенко Д. М., Пацей Н. В. Защита информации методами избыточного кодирования на основе каскадных схем // Эпоха науки. 2019. № 20. С. 194–200. DOI: [10.24411/2409-3203-2019-12034](https://doi.org/10.24411/2409-3203-2019-12034).
24. Пацей Н. В. Параллельное каскадное вероятностное декодирование кодов низкой плотности проверок на четность // Труды БГТУ. Физико-математические науки и информатика. 2015. № 6. С. 157–161.
25. Das A., Toubia N. A. Systematic b-adjacent symbol error correcting reed-solomon codes with parallel decoding // IEEE 36th VLSI Test Symposium (VTS). 2018. P. 1–6. DOI: [10.1109/VTS.2018.8368650](https://doi.org/10.1109/VTS.2018.8368650).
26. Урбанович П. П. Особенности использования методов избыточного кодирования в стеганографических приложениях // Информационные технологии и системы 2022: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 23 ноября 2022 г. Минск: БГУИР, 2022. С. 173–174.
27. Урбанович П. П. Коррекция одиночных и двойных парных ошибок в стенографических каналах передачи информации // Информационные системы и технологии: материалы Междунар. науч. конгр. по информатике, Минск, 27–28 октября 2022 г. Минск, 2022. С. 113–119.
28. Хартанович А. А. Сравнение эффективности стеганографических методов для различных форматов изображений // 75-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ, Минск, 22–27 апреля 2024 г. Минск: БГТУ, 2022. С. 789–790.

References

1. Urbanovich P. P. *Zashchita informatsii metodami kriptografii, steganografii i obfuskatsii* [Information protection by cryptography, steganography and obfuscation methods]. Minsk, BGTU Publ., 2016. 220 p. (In Russian).
2. Hamming R. W. Error detecting and error correcting codes. *The Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, no. 2, pp. 147–160. DOI: [10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x).

3. Meggitt J. E. Error-correcting codes for correcting bursts of errors. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part I. Communication and Electronics*, 1961, vol. 79, no. 6, pp. 708–711. DOI: 10.1109/TCE.1961.6373036.
4. Nguyen H., Shwedyk E. Probability theory, random variables and random processes. *A First Course in Digital Communications. Cambridge University Press*, 2009, pp. 77–134. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841583.004>.
5. Xiaoqing G., Guangzu L., Linlin S., Jun Z. Compiled Code Study of Joint Parity and Cyclic Redundancy Check. *IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, 2022, pp. 77–80. DOI: 10.1109/ICEICT55736.2022.9909046.
6. Gallager R. Low-density parity-check codes. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, vol. 8, no. 1, pp. 21–28. DOI: 10.1109/TIT.1962.1057683.
7. Khartanovich A. A. Comparative analysis of modern redundant codes and their application in steganography. *Informatsionnyye tekhnologii: materialy 88-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Information technologies: materials of the 88th Scientific and Technical Conference of the teaching staff, researchers and postgraduates]. Minsk, 2024, pp. 19–22 (In Russian).
8. Zuo J., Sun Q., Zhao F. Computational complexities and relative performance of LDPC codes and turbo codes. *IEEE 4th International Conference on Software Engineering and Service Science*, 2013, pp. 251–254. DOI: 10.1109/ICSESS.2013.6615299.
9. Yin L., Lu J., Letaief K. B., Wu Y. Burst-error-correcting algorithm for Reed-Solomon codes and its performance over a bursty channel. *IEEE 2002 International Conference on Communications. Circuits and Systems and West Sino Expositions*, 2002, vol. 1, pp. 77–81. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCAS.2002.1180576>.
10. Bingrui W., Qingli Z. Study of performance comparison of satellite error correction codes for correcting big burst data errors. *IEEE 3rd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA)*, 2018, pp. 254–258. DOI: <https://doi.org/10.1109/icbda.2018.8367687>.
11. Alwan M. H., Singh M., Mahdi H. F. Performance comparison of turbo codes with LDPC codes and with BCH codes for forward error correcting codes. *IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)*, 2015, pp. 556–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCoRED.2015.7449398>.
12. Liu J., Wu S., Chen C., Xiong G. Monte Carlo simulation of the binary communications system based on Matlab. *International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011, pp. 2368–2370. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057010.
13. Vorobyov E. I., Preobrazhensky Y. P. Study of noise-resistant coding of various files. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii; Sistemy bezopasnosti* [Modeling, optimization and information technology: Security systems]. 2018, vol. 6, no. 4, pp. 535–544. DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.040 (In Russian).
14. Li J. The efficient implementation of Reed-Solomon high rate erasure resilient codes. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2005, vol. 3, pp. 1097–1100. DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1415905.
15. Haccoun D., Lavoie P., Savaria Y. New architectures for fast convolutional encoders and threshold decoders. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1988, vol. 6, no. 3, p. 457. DOI: 10.1109/49.1923.
16. Ma X., Yang, E. Low-Density Parity-Check Code with Fast Decoding Speed. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006. 44 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0602081>.
17. Abbasfar A. Turbo-like Codes: Design for High Speed Decoding, 2007. 84 p.
18. Mukhtar H., Al-Dweik A., Shami A. Turbo Product Codes: Applications, Challenges, and Future Directions. *IEEE Communications Surveys And Tutorials*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 3052–3069. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2587863>.
19. Mergu K. Performance Analysis of Reed-Solomon Codes Concatenated with Convolutional Codes Over AWGN Channel. *APTIKOM Journal on Computer Science and Information Technologies*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.11591/APTIKOM.J.CSIT.100>.
20. Sari L., Assiddiq U. P., Alam S., Surjati I. Performance Analysis of CRC-Polar Concatenated Codes. *Jurnal infotel*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.20895/INFOTEL.V12I4.494>.
21. Mahdy A., Abdelaziz M., El-azeem M. Design and Simulation of Parallel BCH Code with LDPC Code For Flash Memories. *12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, 2020, pp. 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171743>.
22. Zhou G., Lin T., Wang W., Lindseyn W. On the concatenation of turbo codes and Reed-Solomon codes. *IEEE International Conference on Communications*, 2003, vol. 3, pp. 2134–2138. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2003.1204021>.

23. Romanenko D. M., Patsey N. V. Information protection by methods of redundant coding based on cascade schemes. *Epokha nauki* [The Age of Science], 2019, no. 20, pp. 194–200 (In Russian). DOI: 10.24411/2409-3203-2019-12034.
24. Patsey N. V. Parallel cascade probabilistic decoding of low-density parity-check codes. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 157–161 (In Russian).
25. Das A., Touba N. A. Systematic b-adjacent symbol error correcting reed-solomon codes with parallel decoding. *IEEE 36th VLSI Test Symposium (VTS)*, 2018, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/VTS.2018.8368650>.
26. Urbanovich P. P. Features of using redundant coding methods in steganographic applications. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy 2022: materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Information technologies and systems 2022: materials of the international scientific conference]. Minsk, 2022, pp. 173–174 (In Russian).
27. Urbanovich P. P. Correction of single and double paired errors in stenographic information transmission channels. *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii: materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa po informatike* [Information systems and technologies: materials of the international scientific congress on informatics]. Minsk, 2022, pp. 113–119 (In Russian).
28. Khartanovich A. A. Comparison of the effectiveness of steganographic methods for different image formats. *75-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya uchashchikhsya, studentov i magistrantov: sbornik nauchnykh rabot* [75rd Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and undergraduates: collection of scientific papers]. Minsk, 2024, pp. 789–790 (In Russian).

Информация об авторе

Хартанович Алина Александровна – магистрант кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alinakhartanovichlo@gmail.com

Information about the author

Khartanovich Alina Aleksandrovna – Master's degree student, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alinakhartanovichlo@gmail.com

Поступила 31.10.2024

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

SYSTEMS ANALYSIS AND TRAINING SYSTEMS

УДК 004.853

Н. И. Гурин, Н. В. Ржеутская

Белорусский государственный технологический университет

СТРУКТУРА СЕМАНТИЧЕСКОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ

В статье описана процедура создания и структурирования семантической базы знаний для системы тестирования на естественном языке. База знаний с семантической структурой содержит все ключевые понятия по предметной области и их смысловые связи в виде триад «субъект» – «отношение» – «объект», образующих семантическую сеть, которая может быть представлена как направленный граф. В системе тестирования вопрос и ответ представляются простыми, неразвернутыми предложениями, а проверка правильности получаемого ответа основана на проверке соответствия семантики вопроса и ответа. База знаний привязана к веб-странице и хранится в виде двумерного текстового массива, состоящего из записей, каждая из которых включает семантическую триаду, а также тестовый вопрос и число символов, подлежащих проверке в полученном ответе.

Разработаны правила создания шаблонов для сказуемого и подлежащего в ответных предложениях теста, используемых в регулярных выражениях при тестировании. Система тестирования действует как веб-приложение с программным модулем, созданным на языке JavaScript. Для функционирования системы создан пользовательский интерфейс веб-страницы с дизайном на основе стилей CSS и библиотеки jQuery.

Ключевые слова: база знаний, семантическая сеть, интеллектуальная обработка текста, система тестирования на естественном языке.

Для цитирования: Гурин Н. И., Ржеутская Н. В. Структура семантической базы знаний для системы тестирования на естественном языке // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 56–61.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-9.

N. I. Gurin, N. V. Rzhetskaya

Belarusian State Technological University

SEMANTIC KNOWLEDGE BASE STRUCTURE FOR A NATURAL LANGUAGE TESTING SYSTEM

The article describes the procedure for creating and structuring a semantic knowledge base for a natural language testing system. A knowledge base with a semantic structure contains all the key concepts in the subject area and their semantic connections in the form of triads “subject” – “relation” – “object” forming a semantic network that can be represented as a directed graph. In the testing system, the question and answer are presented as simple, not detailed sentences, and the verification of the correctness of the answer is based on checking the correspondence of the semantics of the question and answer. The knowledge base is tied to a web page and is stored as a two-dimensional text array consisting of entries, each of which includes a semantic triad, as well as a test question and the number of characters to be checked in the answer received. Rules for creating templates for the predicate and subject in the response sentences of the test used in regular expressions during testing have been developed. The testing system acts as a web application with a software module created in JavaScript. For the functioning of the system, the user interface of the web page was developed with a design based on CSS styles and the jQuery library.

Keywords: knowledge base, semantic network, intelligent text processing, natural language testing system.

For citation: Gurin N. I., Rzhetskaya N. V. Semantic knowledge base structure for a natural language testing system. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 56–61 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-9.

Введение. При проведении тестирования знаний, в частности, в такой широко используемой в учебных заведениях системе электронного обучения, как Moodle, допускаются ответы на вопросы в виде слова или фразы, однако их проверка не автоматизирована и фактически требует участия преподавателя. Существующие системы автоматизированного тестирования на естественном языке [1–3], как правило, рассматривают обработку развернутых вопросов и ответов, что требует создания сложных программных модулей для интеллектуальной обработки исходной текстовой информации с учетом многочисленных лингвистических особенностей языка, особенно такого сложного, как русский [4]. База знаний в указанных системах имеет многокомпонентную структуру [5] и требует достаточно сложной обработки для использования ее в системах тестирования на естественном языке.

В работе предлагается хранить в базе знаний для системы тестирования только простые, несоставные предложения, передающие напрямую семантическую связь между субъектом и объектом в каждом высказывании. Использование такой семантической базы знаний позволяет получать точечные (однозначные) ответы на заданные в диалоге с ней вопросы. Именно такая однозначная реакция требуется при обработке того или иного воздействия на робота, а такой диалог характерен в целом для всех систем с искусственным интеллектом [6].

В отличие от общего подхода с обработкой развернутых вопросов и ответов использование семантической базы знаний программный модуль системы тестирования значительно упрощается.

Поскольку семантическая база знаний может быть построена только на простых предложениях, несущих прямую связь между субъектом и объектом, то, естественно, что для построения такой базы знаний потребуются значительная предварительная трудоемкая работа по выделению в учебном материале простых предложений из возможных сложносочиненных, сложноподчиненных предложений, предложений со скобками и т. п., которые могут присутствовать в исходном тексте. Такой процесс проводится на этапе формирования семантической базы знаний и должен выполняться составителями тестов фактически «вручную», без соответствующей автоматизации, разработка которой, безусловно, является насущной проблемой, требующей своего разрешения.

Для успешного функционирования системы тестирования в структуру массива семантической базы знаний встраиваются соответствующие каждой записи массива тестовые вопросы и некоторые другие дополнительные элементы.

Основная часть. Общая структура базы знаний, хранящей список всех простых предложений

по учебному материалу, строится на основе семантической сети со связями между «субъектами» и «объектами» в предложениях и может быть представлена в виде направленного графа, фрагмент которого показан на рис. 1.

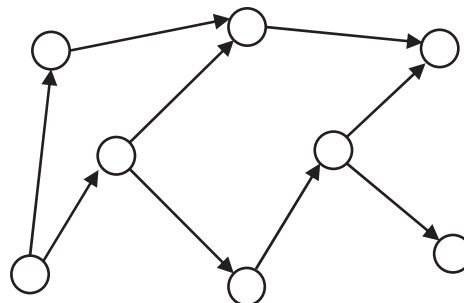


Рис. 1

Здесь кружками изображены «субъекты» и «объекты», а стрелки отображают связи – «отношения» между ними, причем стрелки направлены всегда от «субъекта» к «объекту». В итоге семантическая база знаний хранит список простых предложений как список триад: «субъект» – «отношение» – «объект», связывающих составные структурные блоки простого предложения: «подлежащее» – «сказуемое» – «дополнительные члены предложения» [7, 8].

Например, для простого предложения:

«Электрон имеет отрицательный заряд»

запись-триада состоит из следующих слов: «субъект» – электрон, «отношение» – имеет, «объект» – «отрицательный заряд».

В этой парадигме проверка знания при проведении теста заключается в установлении правильного отношения «субъекта» с «объектом», а фактически в объяснении, как «субъект» связан с «объектом». При этом одним из основных требований, предъявляемых к формированию записей для каждого простого предложения семантической базы знаний, является использование в триадах, в которых «субъект» совпадает, различных сказуемых для «отношений», пусть и аналогичных по своему действию (синонимических). В противном случае однозначность ответа при диалоге с базой знаний будет потеряна.

Такая семантическая база знаний хранится в двумерном текстовом массиве в программном модуле системы, созданном на языке JavaScript. При этом для того чтобы обрабатывать мультимедийный учебный материал (иллюстрации, схемы, анимации, видео), система тестирования функционирует как веб-приложение с соответствующими гиперссылками html-разметки для мультимедийных элементов, а программный модуль, выполняемый на стороне сервера и защищенный паролем доступа, привязан к веб-странице с динамическим

интерактивным дизайном, который обеспечивает функционирование системы тестирования.

С целью проведения теста на естественном языке в структуру базы знаний в каждую запись двумерного массива, содержащего семантические блоки-триады, прежде всего, добавляется еще один четвертый элемент в виде текста вопроса, соответствующего этой триаде. Например, для приведенного выше простого предложения добавим четвертым элементом в запись двумерного массива всю фразу соответствующего вопроса

«Какой заряд имеет электрон?».

В структуре этого вопроса присутствует вопросное слово (слова) – «Какой заряд», далее следует сказуемое – «имеет», а за ним субъект – «электрон». Таким образом, в вопросе всегда присутствует урезанная семантическая триада: «субъект» – «отношение».

Пусть в качестве ответа на этот вопрос тестируемый введет фразу, например:

«Электрон имеет положительный заряд»,

что будет являться неправильным ответом, и он должен получить неудовлетворительный результат. В этом ответе слово «положительный» несет ключевой смысл в поставленном вопросе и требует соответствующей проверки.

Для проверки правильности введенного тестируемым ответного предложения программный модуль системы тестирования, прежде всего, разбивает это предложение на отдельные слова с использованием метода `split()` языка JavaScript, который превращает текст приведенного выше ответа в массив отдельных слов. Например:

```
var words = answer.split(' ');
```

где `words` – одномерный массив из отдельных слов ответного предложения (в результате получим массив: [«Электрон», «имеет», «положительный», «заряд»]), `answer` – переменная, содержащая текст ответного предложения. Затем определяет для ответного предложения семантические блоки триады: «субъект» – «отношение» – «объект» и, наконец, находит соответствие этих триад с семантическими триадами базы знаний.

В общем случае для обеспечения диалога с базой знаний необходимо создавать и использовать шаблонные выражения для семантических блоков вводимых предложений, которые подвергаются обработке программным модулем системы, поскольку подлежащие и сказуемые в них и в массиве базы знаний могут стоять в отличающихся склонениях и падежах, однако должны быть засчитаны как совпадающие по передаваемому в них смысловому содержанию [8].

Важной особенностью диалога с базой знаний в режиме проведения тестирования является

то обстоятельство, что при выдаче тестового вопроса в нем всегда будут присутствовать два семантических блока – «субъект» и «отношение», как это показано в диалоговом окне разработанной системы тестирования на рис. 2.

ТЕСТ ПО ТЕМЕ 'ШИФРОВАНИЕ'

1. Сколько существует типов шифрования данных?

Введите ответ, начав с повтора сказуемого в вопросе

Ваш результат

Рис. 2

В ответном же предложении должны содержаться семантические блоки «отношение» и «объект». При этом программному модулю системы тестирования достаточно проверять на соответствие именно эти два элемента триады из ответного предложения и аналогичные блоки: «отношение» и «объект» во всех записях двумерного массива базы знаний.

Заметим, что поскольку семантический блок «отношение» уже содержится в задаваемом вопросе диалогового окна, он может быть напрямую использован тестируемым при формировании ответа. Поэтому в диалоговом окне испытуемому предлагается набрать в строке ввода ответ, начав его с повтора сказуемого, уже имеющегося в вопросе.

При этом необходимо отметить, что блок сказуемого, хотя и не требует от испытуемого обдумывания при формулировании ответа, должен обязательно использоваться в процедуре проверки, в противном случае будет потеряна семантическая связь блоков сказуемого и подлежащего при сопоставлении ответа с записями в базе знаний.

Таким образом, в ответе тестируемому фактически остается правильно сформулировать только текст блока «объект», что и будет являться ответом на заданный вопрос, поскольку ответное предложение, содержащее все элементы семантической триады, будет полностью сформировано.

Шаблон для блока подлежащего в ответе строится по следующей схеме. Прежде всего, из массива отделяется часть его элементов (слов), полученных из ответного предложения после найденного в этом предложении сказуемого (процедура поиска программным модулем сказуемого в предложении описана ранее [8]), после воздействия на него методом `slice()`. Например, следующим образом:

```
words.slice(i + 1),
```

где i – номер слова в массиве `words`, определенного в ответе как сказуемое. При этом мы получим новый массив слов, следующих за сказуемым,

который и будем использовать для построения шаблона для подлежащего в блоке «объект».

Если блок подлежащего в ответе состоит из нескольких слов, то при создании для него шаблона они объединяются в одну последовательность символов, при использовании метода `join(„.“)` языка JavaScript со связкой символов «.» для объединения всех слов этого блока в единую последовательность символов, задаваемых на проверку их соответствия выражению в блоке подлежащего в базе знаний.

Таким образом, шаблон для блока подлежащего в ответном предложении определяется как

```
var subject = words.slice(i + 1).join(„.“),
```

где *subject* – переменная для хранения шаблона подлежащего, а регулярное выражение для него будет иметь вид

```
subject = new RegExp(„.“ + subject).
```

Например, для «объекта» в семантической триаде приведенного выше примера ответа шаблоном будет являться последовательность символов:

```
«положительный.*заряд.*».
```

Программный модуль системы при проверке в связке со сказуемым этого шаблона «объекта» ответного предложения даст отрицательный результат, поскольку в общей совокупности проверяемых символов в шаблоне отсутствует совокупность символов «отрица», которая должна присутствовать в правильном ответе.

Программный модуль системы проверяет в цикле по всем записям массива базы знаний выполнение сложного условия для шаблонов семантических блоков «отношение» и «объект» в ответном предложении на соответствие аналогичным блокам в каждой записи массива базы знаний, используя при этом метод `test()` для обработки регулярных выражений:

```
for (var j = 0; j < knowledge.length; j++)
  {if (predicate.test(knowledge[j][1]) &&
    subject.test(knowledge[j][2]))
    result+=n + " - ПРАВИЛЬНО!";},
```

где *predicate* – шаблон для блока сказуемого; *subject* – шаблон для блока подлежащего; *knowledge* – массив базы знаний; *result* – переменная для хранения результата проверки ответа; *n* – номер вопроса.

Результат проверки системой каждого вопроса выводится на экран фразой «ПРАВИЛЬНО!» при получении правильного ответа и предложением получить новый вопрос для продолжения теста. Если введенный ответ неверен, то испытуемый в этом случае может попытаться еще раз ввести

новый вариант ответа на тот же вопрос, пока он не сделал запрос на вывод следующего тестового вопроса. Однако это приведет к дополнительной трате общего времени, выделенного для ввода ответов на все вопросы при выполнении теста, как показано на рис. 3.

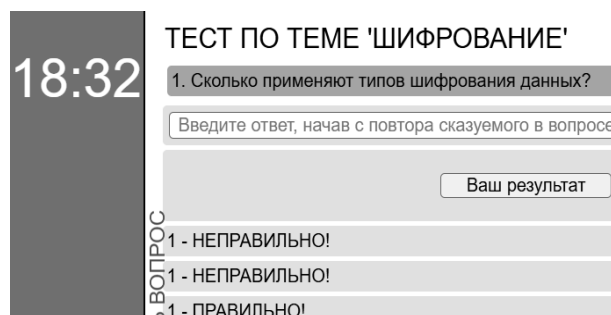


Рис. 3

Отметим, что в ответе могут встретиться и большие по размеру блоки подлежащего семантического элемента «объект», состоящие из многих слов, однако не все из них являются ключевыми словами, требующими проверки на соответствие с записями в базе знаний. При этом проверка образованного шаблона блока подлежащего в ответе выполняется для заданного заранее количества символов с учетом также и того, что символы в шаблоне «.» в проверке не участвуют. В противном случае верным окажется ответ, состоящий из любого символа, введенного в качестве ответа, если этот символ присутствует в блоке «объект» базы знаний.

Поэтому при проверке правильности полученного от тестируемого ответа на заданный ему вопрос основной сложностью является необходимость определения минимального количества символов в элементе «объект» семантической триады ответного приложения, которые позволят засчитать его ответ как правильный. В проверяемом шаблоне, построенном из элемента «объект» ответного предложения, состоящего из совокупности всех символов «объекта», необходимо определить минимальное количество ключевых символов, соответствующих правильному ответу. Например, пусть на вопрос

«Сколько применяют типов шифрования данных?»

обрабатывается ответ

«Для данных применяют два типа шифрования».

В этом случае в «объекте» ответного предложения ключевыми будут являться слова «два типа», которым в соответствующем шаблоне «объекта»,

«. *два. *типа. *шифрования»,

подлежащем проверке, необходимо проверить на совпадение только 7 символов, а остальные символы, входящие в слово «шифрования», будут принадлежать дополнительным словам ответного предложения и не будут влиять на результат, хотя они и могут присутствовать в набранном ответе.

Для того чтобы автоматически учитывать минимальное количество символов, подлежащих проверке в ответе, в структуру двумерного массива базы знаний, в каждую его запись, добавляется еще один, пятый элемент – число, равное этому минимальному количеству проверяемых символов. Причем при формировании массива базы знаний необходимо дополнительно проверить, чтобы это минимальное количество проверяемых символов не повторялось в других вопросах теста.

Таким образом, структура записи в массиве базы знаний, например, для первого вопроса будет иметь следующий вид:

[*"Для данных",*
"применяют",
"два типа шифрования",
"1. Сколько применяют типов шифрования
данных?",
 7].

При этом в программе проверки ответа в системе тестирования необходимо будет использовать это значение из четвертого столбца и наложить условие

$$k = \text{knowledge}[n][4];$$

$$\text{if } (\text{subject} > k-1),$$

где k – количество проверяемых символов; *knowledge* – текстовый двумерный массив базы знаний; n – номер записи в базе знаний; *subject* – шаблон для элемента «объект» в семантической триаде проверяемого ответа.

Аналогично для вопроса

«Какие существуют типы шифрования?»

число k будет равно 26, поскольку проверяемыми ключевыми словами в ответе на соответствие с записями в базе знаний должны быть слова «симметричное и асимметричное».

При подготовке записей в базе знаний необходимо учесть, что в том случае, когда «субъект» триады в записи базы знаний совпадает (при представлении базы знаний в виде семантической сети это соответствует случаю ветвления отношений

для «субъекта»), например, слова «для данных» в приведенных выше двух записях массива, то сказуемое – второй элемент триады «отношение» в базе знаний должен быть обязательно другим, хотя и совпадающим по смыслу (синонимичным). В частности, в первой записи триады нельзя использовать подходящее по смыслу сказуемое «существует», поскольку «субъекты» триады в обеих записях базы знаний совпадают. В этом заключается одна из особенностей работы программного модуля системы тестирования на естественном языке, которую необходимо учитывать при подготовке базы знаний.

Заключение. Семантическая база знаний с настроенной специальным образом структурой и с учетом приведенных выше ограничений и замечаний на запись в массив триад позволяет проводить тестирование знаний обучаемых на естественном языке с обработкой простых ответов на простые вопросы. Поскольку в массив семантической базы знаний при ее создании включаются все ключевые понятия учебного материала в виде записей из триад, то использующая такую базу знаний система тестирования позволяет провести полную проверку знаний обучаемых по учебному материалу.

Необходимо отметить, что само формирование семантической базы знаний с записями в текстовый массив связано с необходимостью преобразования в общем случае сложных предложений учебного материала в простые, из которых уже можно составить триады, что является трудоемким процессом, который выполняется «вручную» составителем теста. Однако это та цена, которую требуется заплатить за простоту автоматической обработки вопросов в системе тестирования на естественном языке.

В структуру семантической базы знаний системы тестирования знаний на естественном языке внесен ряд дополнений, позволяющих автоматизировать и упростить выдачу вопросов и проверку полученных ответов.

Программный модуль обработки тестовых заданий разработан на языке JavaScript и позволяет включать в тесты мультимедийную информацию с использованием динамического интерактивного дизайна веб-страницы на основе библиотеки jQuery, а также подключать речевые сервисы для распознавания и синтеза речи при задании вопросов и формировании ответов на них в режиме тестирования.

Список литературы

1. Кожевников В. А., Сабинин О. Ю. Система автоматической проверки ответов на открытые вопросы на русском языке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11, № 3. С. 57–72.
2. Burrows S., Gurevych I., Stein B. The eras and trends of automatic short answer grading // Internet Journal of Artificial Intelligence in Education. 2015. Vol. 25. P. 60–117.

3. Horbach A., Palmer A., Pinkal M. Using the text to evaluate short answers for reading comprehension exercises // *Proc. of the 2nd Joint Conf. on Lexical and Computational Semantics*. Atlanta, USA: Association for Computational Linguistics, 2013. Vol. 1. P. 286–295.
4. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика / Е. И. Большакова [и др.]. М.: МИЭМ, 2011. 269 с.
5. Веремчук С. Э., Гурин Н. И. Система тестирования знаний на естественном языке на основе семантической сети обучающей системы // *Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика*. 2019. № 1 С. 190–196.
6. Гурин Н. И., Герман О. В. Компьютерные обучающие системы в издательском деле. В 2 ч. Минск: БГТУ, 2015. Ч. 2. 192 с.
7. Гурин Н. И., Жук Я. А. Генератор семантической сети информационной системы в таблицу реляционной базы данных // *Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика*. 2015. № 6. С. 181–185.
8. Жук Я. А., Гурин Н. И. Реализация диалога с компьютерной обучающей системой на языке JavaScript с помощью веб-сервисов // *Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика*. 2018. № 2. С. 190–196.

References

1. Kozhevnikov V. A., Sabinin O. Y. System of automatic verification of answers to open questions in Russian. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU. Informatics. Telecommunications. Management], 2018, vol. 11, no. 3, pp. 57–72 (In Russian).
2. Burrows S., Gurevych I., Stein B. The eras and trends of automatic short answer grading. *Internet Journal of Artificial Intelligence in Education*, 2015, vol. 25, pp. 60–117.
3. Horbach A., Palmer A., Pinkal M. Using the text to evaluate short answers for reading comprehension exercises. *Proc. of the 2nd Joint Conf. on Lexical and Computational Semantics*. Atlanta, USA, Association for Computational Linguistics, 2013, vol. 1, pp. 286–295.
4. Bolshakova E. I., Klyshinsky E. S., Lande D. V., Noskov A. A., Peskova O. V., Yagunova E. V. *Avtomaticheskaya obrabotka tekstov na estestvennom yazyke i komp'yuternaya lingvistika* [Automatic Text Processing in Natural Language and Computer Linguistics]. Moscow, MIEM Publ., 2011 (In Russian).
5. Veremchuk S. E., Gurin N. I. System of testing knowledge in natural language on the basis of the semantic network of the educational system. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2019, no. 1, pp. 190–196 (In Russian).
6. Gurin N. I., German O. V. *Komp'yuternyye obuchayushchie sistemy v izdatel'skom dele* [Computer Learning Systems in Publishing. Part 2]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 192 p (In Russian).
7. Gurin N. I., Zhuk Ya. A. The information system semantic network generator to a relational database table generator. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2015, no. 6, pp. 181–185 (In Russian).
8. Zhuk Ya. A., Gurin N. I. Implementation of dialogue with a computer learning system in the JavaScript language with the help of web services. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 2, pp. 190–196 (In Russian).

Информация об авторах

Гурин Николай Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ngourine@mail.ru

Ржеутская Надежда Викентьевна – старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lucky_nana@mail.ru

Information about the authors

Gurin Nikolay Ivanovich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ngourine@mail.ru.

Rzheutskaya Nadezda Vikentevna – Senior Lecturer, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lucky_nana@mail.ru.

Поступила после доработки 07.02.2025

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

ALGORITHMIC AND PROGRAMMING

УДК 004.272.2

O. N. Karasik¹, A. A. Prihozhy²

¹ISsoft Solutions (part of Coherent Solutions)

²Belarusian National Technical University

THREAD-SAFE BITSET WITH FAST EXTRACT MIN OPERATION

Even in today's ever-changing world where every modern PC, game console, mobile device, or TV is equipped with GBs of RAM and CPUs have multiple cores, fast, thread-safe, space-efficient data structures remain an active field of research. Bitsets (binary array of individually accessible bits) have many applications in various industry domains like operating systems, database design, searching and allocating resources. The existing implementations of bitsets are mainly focused on compression and encoding of bits to reduce memory footprint, disk storage consumption and speed up bulk bitwise operations (primarily in cases of search and database design), or on low- and non-concurrent scenarios for tracking and allocating resources, or on the usage of bitset as a set of unique integers to insert, remove and test their presence. This paper proposes the implementation of fast, thread-safe bitset designed for high-concurrent scenarios like reservation and tracking of resources. High performance is achieved using an additional index array and a novel non-blocking synchronization mechanism. Experiments carried out on a server equipped with two Intel Xeon E5-2620 v4 processors have shown the speedup of 2 – 6 times compared to implementation which uses standard blocking synchronization mechanisms like mutexes and locks.

Keywords: bitset, concurrent data structure, find first set bit, extract min.

For citation: Karasik O. N., Prihozhy A. A. Thread-safe bitset with fast extract min operation. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 62–69.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-10.

О. Н. Карасик¹, А. А. Прихожий²

¹Иностранное производственное унитарное предприятие «Иссофт Солюшенз»

²Белорусский национальный технический университет

ПОТОКО-БЕЗОПАСНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БИТОВОГО МНОЖЕСТВА С БЫСТРОЙ ОПЕРАЦИЕЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ЧЛЕНА

Потоко-безопасные компактные структуры данных остаются активной областью исследований даже сегодня, когда каждый современный ПК, игровая консоль, мобильное устройство или телевизор оснащены гигабайтами оперативной памяти и многоядерными процессорами. Битовые множества (двоичный массив индивидуально-доступных битов) имеют применение в различных отраслях, таких как операционные системы, проектирование баз данных, поиск и распределение ресурсов. Существующие реализации битовых множеств сосредоточены в основном на сжатии и кодировании битов для сокращения потребляемой памяти и дискового пространства, а также на ускорении множественных битовых операций (в частности, в областях поиска и проектирования баз данных), или на сценариях с низко- и непараллельным отслеживанием и выделением ресурсов, или на использовании битовых множеств в качестве набора уникальных целых чисел с целью вставки, удаления и проверки их наличия. В данной статье предлагается потоко-безопасная реализация битового множества, предназначенная для использования в сценариях с участием огромного количества потоков, выполняющих внушительное количество параллельных операций, таких как резервирование и отслеживание ресурсов. Высокая производительность достигается за счет использования дополнительного массива индексов и нового механизма неблокирующей синхронизации. Эксперименты, проведенные на сервере, оснащенный двумя процессорами Intel Xeon E5-2620 v4, показали ускорение в 2–6 раз по сравнению с реализацией, использующей блокировку потоков.

Ключевые слова: битовое множество, потоко-безопасные структуры данных, поиск первого выставленного бита, извлечение минимального члена.

Для цитирования: Карасик О. Н., Прихожий А. А. Поточно-безопасная реализация битового множества с быстрой операцией извлечения минимального члена // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 62–69 (На англ.).
DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-10.

Introduction. Conceptually, bitset (aka bitmap) is a binary array, where every bit can be set or reset independently. Every bit in the array corresponds to an integer (bit index), thus forming a set of unique integers. Because of its space efficiency (a single 64-bit word can handle unique integers from 0 to 63) and ability to perform fast bulk bitwise operations, bitset has application in various areas like database indices [1–2], web search [3], event matching [4], graphs [5], sequence predictions [6], memory and registry allocators [7–9].

Common non-thread-safe implementations of bitset include operations to *set* (include in set), *reset* (remove from set) and *test* (check if in set) individual bits; bulk operations between two or more bitsets to find *intersection* (logical AND) and *union* (logical OR); operation to *find first* (find first set bit or smallest value in a set). In non-concurrent scenarios, operations can be combined to form new operations, like *reset first* (find first set bit and reset or remove smallest value from the set) operation which is implemented as a combination of *find first* and *reset* operations.

In thread-safe implementations the bitset interface is either a more concise and includes *set*, *reset* and *test* operations (without *find first* operation).

In both implementations, the *set*, *reset* and *test* operations have constant execution time, while *find first* operation in contrary, is usually implemented as a lineal search.

In this research we propose a fast, thread-safe bitset implementation that implements *set* and *reset* operations in constant time and *reset first* operation in non-lineal time.

Main part. Non-thread-safe bitset. In a scenario of uncompressed and unencoded bitset (assuming the size of the bitset is larger than a single word), a bitset can be implemented as an array B of words W ,

where individual bits are accessed by first locating an array element and then locating a bit from the element.

The number of words N required to hold the number of bits C can be calculated as:

$$N = \lceil C / W \rceil.$$

The array element index i_B and bit position p_B within the element of the bit X can be calculated as quotient and remainder:

$$i_B = X / W \text{ and } p_B = X \bmod W.$$

Knowing i_B and p_B we can implement *set* and *reset* operations using bitwise logic (logical *and*, *or*, *not* and *shifts*). However, to implement the *find first set bit* operations we need a function to find a position of least significant bit in a word, hereinafter we denote this function as *bitscan* (modern CPUs implemented this function as *bfs* opcode). Fig. 1 presents a possible pseudocode of these functions.

Thread-safe bitset. Thread-safe versions of *set* and *reset* operations can be implemented using interlocked or atomic logical operations, supported by most of the modern CPUs. The *test* and *find first* function do not require changes because they don't modify the *bitset* and consistency of memory reads is guaranteed by cache coherency protocols.

The *reset first* operation, however, no longer can be implemented as a combination of *find first* and *reset* operations because the bit index returned from *find first* operation might be reset by a concurrent actor before the execution of *reset* operation. Therefore, it leaves two possible options for implementation:

1. Separate *reset first* operation which will iterate over array B and try to reset bits.
2. Separate *find next* operation which will accept B element index to start search from.

We yield to the first option (Fig. 2).

<pre> set(B: array, X: int, W: int) -> bool local i = X / W, p = X % W, V = B[i]; B[i] = B[i] (1 << p); return V & (1 << p) == 0; end </pre>	<pre> reset(B: array, X: int, W: int) -> bool local i = X / W, p = X % W, V = B[i]; B[i] = B[i] & ~(1 << p); return V & (1 << p) != 0; end </pre>
<i>a</i>	<i>b</i>
<pre> find_first(B: array, N: int, W: int) -> integer for (local i = 0; i < N; ++i) local p = bitscan(B[i]) if p >= 0 then return i * W + p end end return -1; end </pre>	
<i>c</i>	

Fig. 1. Pseudocode of implementations of *set* (*a*), *reset* (*b*) and *find first* (*c*) operations

<pre> atomic_set(B: array, X: int, W: int) -> bool local i = X / W, p = X % W; local V = <u>atomic_or</u>(B[i], 1 << p); return V & (1 << p) == 0; end </pre>	<pre> atomic_reset(B: array, X: int, W: int) -> bool local i = X / W, p = X % W; local V = <u>atomic_and</u>(B[i], ~(1 << p)); return V & (1 << p) != 0; end </pre>
<i>a</i>	<i>b</i>
<pre> atomic_reset_first(B: array, N: int, W: int) -> int for (local i = 0; i < N; ++i) local p = <u>bitscan</u>(B[i]), X = i * W + p; if <u>atomic_reset</u>(B, X, W) then return B; end end return -1; end </pre>	
<i>c</i>	

Fig. 2. Pseudocode of implementations of concurrent set (a), reset (b) and reset first (c) operations using interlocked or atomic operations

Non-thread-safe bitset with index. In non-concurrent scenarios the lookup speed of *find first* operation can be significantly improved by introducing an additional binary array *I* (index array) such that every bit of every element of the array represents a state of the corresponding element of array *B* (bit's index of *I* corresponds to element index of *B*) in a way that if the bit in *I* is set, then at least one bit is set in the corresponding element *B* and vice versa. The number of words *M* required to index the number of bits *C* can be calculated as:

$$M = \lceil C / W^2 \rceil.$$

Total number of words required to hold both *I* and *B* arrays is a sum of *M* and *N*.

The *I* array element index i_I and bit position p_I within the element of the bit *X* can be calculated as:

$$i_I = X / W^2 \text{ and } p_I = (X / W) \bmod W.$$

The array *I* need to be constantly synchronised with the state of the array *B*. This synchronisation is done by *set* and *reset* operations (Fig. 3).

Inclusion of an index array improves the lookup speed at the cost of:

1. Slow *set* and *reset* operations. Operations must verify and update *I* when necessary.
2. More memory to store arrays *I* and *B*.
3. No obvious way to implement concurrent versions of *set* and *reset* operations without a mutex. The atomic operations work on a single memory location while *set* and *reset* operations need to update both arrays.

<pre> index_set(I: array, B: array, X: int, W: int) -> bool local iB = X / W, pB = X % W, V = B[i]; if V == 0 then local iI = X / (W * W), pI = (X / W) % W; I[iI] = I[iI] (1 << pI) end B[iB] = B[iB] (1 << pB); return V & (1 << pB) == 0; end </pre>	<pre> index_reset(I: array, B: array, X: int, W: int) -> bool local iB = X / W, pB = X % W, V = B[i]; if V & ~(1 << pB) == 0 then local iI = X / (W * W), pI = (X / W) % W; I[iI] = I[iI] & ~(1 << pI) end B[i] = B[i] & ~(1 << pB); return V & (1 << pB) != 0; end </pre>
<i>a</i>	<i>b</i>
<pre> index_find_first(I: array, B: array, N: int, M: int, W: int) -> int for (local iI = 0; iI < M; ++iI) local pI = <u>bitscan</u>(I[iI]) if pI >= 0 then local iB = iI * W + pI, pB = <u>bitscan</u>(B[iB]); return iB * W + pB; end end return -1; end </pre>	
<i>c</i>	

Fig. 3. Pseudocode of implementations of indexed set (a), reset (b), and find first (c) operations

Bitfield. The implementation of thread-safe bitset with fast extract min operation (hereinafter “bitfield”) is based on the *non-thread-safe bitset with index*, demonstrated in previous section, with one notable exception – index array I uses two bits instead of one to represent a state of an element from a bit array B .

Index implementation. The use of two bits to represent the state has the following effects on the index array I and related calculations:

1. The number of words M required to keep the same number of bits is doubled.

2. The calculation of I array element i_I and bit position within the element p_I must be adjusted to smaller number of states per element.

Because index array element now represents states of $W \div 2$ bit array elements (capacity), the values of M , i_I and p_I are calculated as following:

$$M = \lceil C / (W \cdot (W / 2)) \rceil;$$

$$i_I = B / (W \cdot (W / 2));$$

$$p_I = ((B / W) \bmod (W / 2)) \cdot 2.$$

The “ $(W/2)$ ” part in all the equations corresponds to the capacity of index array element and the “ $\times 2$ ” part in the p_I bit position calculation is required to align the position to 2 bit boundry to ensure states don’t intersect.

Every state in the element can assume one of four possible values: 00, 01, 10 and 11, where values 00, 10 corresponds to the “reset” state and values 01, 11 to the “set” state (Table 1).

Table 1

All possible values of state within the index array element and their meaning

State	Meaning
00	The bit array element has no set bits (“reset” state)
10	
01	The bit array element has at least one set bit (“set” state)
11	

As in the *non-thread-safe bitset with index* implementation the states are updated by *set* and *reset* operations.

Set and reset operations implementation. The pseudocode of *set* (bitfield_set) and *reset* (bitfield_reset) operations is presented in Fig. 4. Below is a breakdown of both operations:

1. Both operations start with the calculation of arrays indices and bits positions (lines 04–07).

2. Then they perform atomic modifications (atomic_or in case of *set* and atomic_and in case of *reset*) of B array element. If no bits were set or reset, they stop execution and return false (lines 09–13).

3. Next, if the first bit was set (in case of *set* operation) or last bit was reset (in case of *reset* operation)

they modify the state of the I array’s element by executing atomic_xor operation with 01 (on *set*) and 11 (on *reset*) values (lines 15–17). All combinations of set and reset operations are presented in (Table 2).

```

01: bitfield_set(
02:   I: array, B: array, X: int, W: int
03: ) -> bool
04:   local iB = X / W;
05:   local pB = X % W;
06:   local iI = X / (W * (W / 2));
07:   local pI = ((X / W) % (W / 2)) * 2
08:
09:   local T = 1 << pB;
10:   local V = atomic_or(B[iB], T);
11:   if V & (~T) != 0 then
12:     return false
13:   end
14:
15:   if V == 0 then
16:     atomic_xor(I[iI], 01 << pI)
17:   end
18:   return true;
19: end

```

a

```

01: bitfield_reset(
02:   I: array, A: array, X: int, W: int
03: ) -> bool
04:   local iB = X / W;
05:   local pB = X % W;
06:   local iI = X / (W * (W / 2));
07:   local pI = ((X / W) % (W / 2)) * 2
08:
09:   local T = 1 << pB, R = ~T;
10:   local V = atomic_and(B[iB], R);
11:   if V & T == 0 then
12:     return false
13:   end
14:
15:   if V & R == 0 then
16:     atomic_xor(I[iI], 11 << pI)
17:   end
18:   return true;
19: end

```

b

Fig. 4. Pseudocode of implementations of bitfield set (a) and reset (b) operations

Table 2

All combinations of state values after the execution of set or reset operations

State	XOR	Result
00	01 (set)	01 (set)
10	01 (set)	11 (set)
01	11 (reset)	10 (reset)
11	11 (reset)	00 (reset)

It is obvious from the pseudocode that modifications of arrays B and I are separated in time. The reasons both arrays stay in sync are:

1. The B array is atomically modified first.
2. The modified bit is indeed set or reset (if not, the return).
3. The modified bit is the first set bit (in case of *set* operation) or the last reset bit (in case of *reset* operation).
4. The I array is modified only if all the above points are true. This excludes possibility of two threads modifying the I array with two same operations without having the third around them (for instance, there is no way to have *set*, *set* or *reset*, *reset* modifications without having the third *reset* or *set* operation).
5. The I array is atomically modified by bitwise XOR operation, with special values 01 (in case of set) and 11 (in case of reset) such that the reset state always becomes the set and vice-versa (Table 2).
6. The XOR operation is commutative and associative. Therefore, because of #4, no matter how many modifications (and in what order) are done to the I array, eventually the result will depend on the order of modifications done to the B array.

Table 3 includes a set of examples of concurrent *set* operations interrupted by concurrent *reset* operations, and Fig. 5 illustrates cases 1, 2 and 3 from it.

Experimental environment. All experiments were run on a rack server equipped with two Intel Xeon E5-2620v4 CPU (8 cores, 16 hardware threads) and 32 GB of RAM. All cores have private L1 and L2 cache of 32 KB and 256 KB respectively. All CPUs have 20 MB L3 shared cache.

All experiments were implemented using C++ language. The source code was compiled by GNU GCC compiler v14.1.0 with O3 optimization level.

Experimental benchmark. Benchmark emulates a highly concurrent scenario of resource allocation / release. The code instantiates 31 “noise” threads and 1 “allocator” thread and assigns them to individual hardware threads. Every “noise thread” works in

a tight loop and on every iteration sets or resets a random bit (emulating concurrent allocation and release of the resources). The “allocator” thread on every iteration executes *reset first* operation (replicating continuous resource allocation procedure). The benchmark software measures how long it takes to perform a single *reset first* operation.

Experimental results. In the experiments, we compare the “bitfield” with the “bitset with mutex” (hereinafter “Impl. #1”) and “indexed bitset with multiple mutexes” (hereinafter “Impl. #2”) implementations.

The “Impl.#1” implementation uses a “std::bitset” from C++ standard library to store the data and “std::mutex” to protect it from concurrent access. The lock is acquired every time “noise” threads sets or resets the bit and when “allocator” threads attempt to reset the bit. The search for a first set bit isn’t protected by lock.

The “Impl.#2” implementation uses an “std::array” of 64 bit unsigned longs to store bits (B array), an “std::array” of 64-bit unsigned longs to store index (I array) and an “std::array” of “std::mutex” (one for each index array element) to protect access to index and bits. The “noise” thread acquires a lock to corresponding index right before executing set or reset operation to ensure consistency between bit array and index array. The “allocator” thread acquires corresponding lock right before resetting the bit. The search for first set bit isn’t protected by the lock.

We performed a set of experiments on different number of bits for all three implementations. In each implementation, the reset first operation was repeated at least 1,000,000 times. The error % was less then 2.5% for all implementations and experiments except the last one where error% reached 7% for “bitfield” implementation. The results of the experiments are presented in the Table 4.

Table 3

Example of multiple, concurrent “set” and “reset” operations setting and resetting the bit in the same element of bit array B , which results in the modification of index array I .

The S_B and S_I denote modification of B and I array during “set” operation.

The R_B and R_I represent the corresponding modifications done by “reset”

Number	Operation sequence	Index state		Result
		00 (reset)	10 (reset)	
1	$S_B \rightarrow S_I \rightarrow R_B \rightarrow R_I$	$00 \wedge 01 \wedge 11 = 10$	$10 \wedge 01 \wedge 11 = 00$	Reset
2	$S_B \rightarrow R_B \rightarrow R_I \rightarrow S_I$	$00 \wedge 11 \wedge 01 = 10$	$10 \wedge 11 \wedge 01 = 00$	Reset
3	$S_B \rightarrow R_B \rightarrow S_I \rightarrow R_I$	$00 \wedge 01 \wedge 11 = 10$	$00 \wedge 01 \wedge 11 = 10$	Reset
4	$S_B \rightarrow R_B \rightarrow S_B \rightarrow R_I \rightarrow S_I \rightarrow S_I$	$00 \wedge 11 \wedge 01 \wedge 01 = 11$	$10 \wedge 11 \wedge 01 \wedge 01 = 01$	Set
5	$S_B \rightarrow R_B \rightarrow S_B \rightarrow S_I \rightarrow S_I \rightarrow R_I$	$00 \wedge 01 \wedge 01 \wedge 11 = 11$	$10 \wedge 01 \wedge 01 \wedge 11 = 01$	Set
6	$S_B \rightarrow R_B \rightarrow S_B \rightarrow S_I \rightarrow R_I \rightarrow S_I$	$00 \wedge 01 \wedge 11 \wedge 01 = 11$	$10 \wedge 01 \wedge 11 = 00$	Set

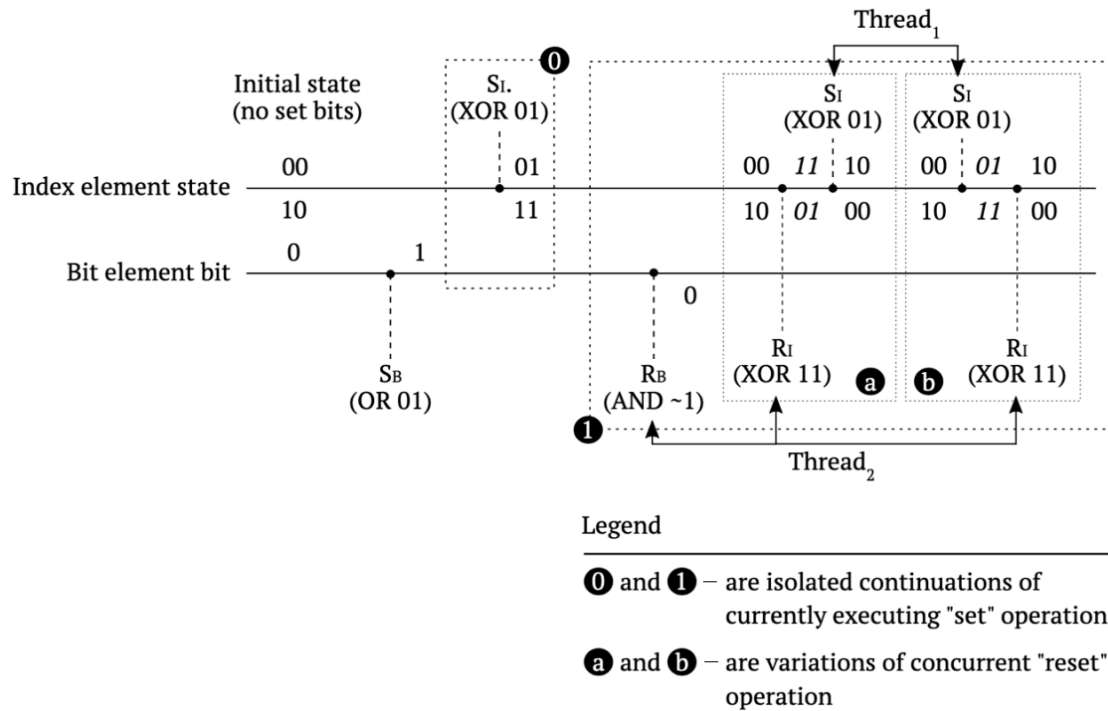


Fig. 5. An example of a situation when a set operation executed by Thread₁ is interrupted by a concurrent reset operation by Thread₂. The markers 0 and 1 present different chains of events:

- 0 – the set operation completed before the reset operation started;
- 1a – the set operation modified index after the reset operation completed;
- 1b – the set operation modified index after the reset operation modified the bit but before it modified the index. In all scenarios, the result is reset bit and reset index

The experimental results demonstrate that in a highly concurrent scenarios (500 – 10,000) the "Bitfield" surpasses both implementation in 2–6 times (compared to "Impl.#2"). Because both "Bitfield" and "Impl.#2" are based on the "indexed bitset" ideas, the difference in the execution time is attributed to the concurrency control implementation. It is also seen, that when the number of bits reaches 50,000, the "noise" threads start to fail to put pressure on the "allocator" thread and both "Bitfield" and "Impl.#2" experience a significant speedup.

Table 4

Execution time and comparison of experimental implementations on different number of bits

Bit count	Bitfield (ns)	Impl.#1 (ns)	Impl.#2 (ns)
500	1,337.38	3,113.35	2,996.29
1000	1,268.66	3,288.17	2,976.85
5000	456.53	5,195.32	2,930.34
10000	419.76	5,026.04	2,634.46
50000	207.28	9,030.44	892.79
100000	341.48	11,149.87	703.26

Potential application. The proposed "bitfield" implementation of a thread-safe bitset can be applied in different problems where multiple threads compete for a shared pool of resources, for instance, in scenario of static, shared memory pool (here,

threads temporary allocate blocks of memory from the pool using *reset first* operation); or when multiple threads calculate work items of uneven size like in [10–15] (here, "bitfield" can represent all work items to calculate and every thread, initially, will try to calculate all work items which are multiple of the thread's index and when done, will use *reset first* operation to "steal" work items from other threads). These improvements can result in both speedup and increased energy efficiency of the applications [16].

Future work. The current "bitfield" implementation works with individual bits. The future work can be focused on implementation of additional methods to set or reset multiple bits. This can enable scenarios where a thread needs to allocate/reserve multiple resources, without sacrificing speed of *reset first* operation. In addition, with more modifications, this new implementation might be even extended to support allocation/reservation of multiple consequent resources.

Conclusion. In this paper, we introduced "bitfield" a thread-safe implementation of bitset with fast and lock free "extract min" operation, which can be used in allocation, reservation or work distribution scenarios. The experiments demonstrated that "bitfield" outperforms the "indexed bitset with multiple mutexes" implementation in 2–6 times and outperforms "bitset with lock" implementation in 2–60 times in resource allocation/reservation scenarios.

References

1. Chambi S., Lemire D., Kaser O., Godin R. Better bitmap performance with Roaring bitmaps. *Software: Practice and Experience*, 2015, vol. 46, no. 5, pp. 709–719. DOI: 10.1002/spe.2325.
2. Corrales F., Chiu D., Sawin J. Variable length compression for bitmap indices: *Database and Expert Systems Applications: 22nd International Conference*, 2011, vol. 2, pp. 381–395.
3. Goodwin B., Hopcroft M., Luu D., Clemmer A., Curmei M., Elnikety S., He Y. BitFunnel: Revisiting Signatures for Search. *SIGIR'17: Proceedings of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2017, pp. 605–614. DOI: 10.1145/3077136.3080789.
4. Liang W., Shi W., Liao Z., Qian S., Zheng Z., Cao J., Xue G. BOP: A Bitset-based Optimization Paradigm for Content-based Event Matching Algorithms (S). *SEKE 2023: The 35th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering*, 2023, pp. 487–492. DOI: 10.18293/SEKE2023-142.
5. VanCompernelle M., Barford L., Harris F. Maximum Clique Solver Using Bitsets on GPUs. *Information Technology: New Generations*, 2016, pp. 327–337.
6. Gueniche T., Fournier-Viger P., Tseng V. S. Compact Prediction Tree: A Lossless Model for Accurate Sequence Prediction. *Advanced Data Mining and Applications*, 2013, pp. 177–188.
7. McIlroy R., Dickman P., Sventek J. Efficient dynamic heap allocation of scratch-pad memory: *ISMM'08: Proceedings of the 7th international symposium on Memory management*, 2008, pp. 31–40.
8. Terci G. S., Abdulhalik E., Bayrakci A. A., Boz B. BitEA: BitVertex Evolutionary Algorithm to Enhance Performance for Register Allocation, *IEEE Access*, 2024. vol. 12, pp. 115497–115514. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3446596.
9. Karasik O. N., Prihozhy A. A. Cooperative multi-thread scheduler for solving large-size tasks on multi-core systems. *Big Data and Advanced Analytics VI*. Minsk, 2020, pp. 202–212.
10. Karasik O. N., Prihozhy A. A. Blocked algorithm of finding all-pairs shortest paths in graphs divided into weakly connected clusters. *System analysis and applied information science*, 2024, no. 2, pp. 4–10. DOI: 10.21122/2309-4923-2024-2-4-10.
11. Prihozhy A. A., Karasik O. N. New blocked all-pairs shortest paths algorithms operating on blocks of unequal sizes. *System analysis and applied information science*, 2023, no. 4, pp. 4–13.
12. Prihozhy A. A., Karasik O. N. Advanced heterogeneous block-parallel all-pairs shortest path algorithm. *Trudy BSTU [Proceedings of BSTU]*, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2023, no. 1 (266), pp. 77–83 (In Russian).
13. Prihozhy A. A. Generation of shortest path search dataflow networks of actors for parallel multicore implementation. *Informatics*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 65–84.
14. Prihozhy A. A. Optimization of data allocation in hierarchical memory for blocked shortest paths algorithms. *System analysis and applied information science*, 2021, no. 3, pp. 40–50.
15. Karasik O. N., Prihozhy A. A. Tuning block-parallel all-pairs shortest path algorithm for efficient multi-core implementation. *System analysis and applied information science*, 2022, no. 3, pp. 57–65.
16. Prihozhy A. A., Karasik O. N. Influence of shortest path algorithms on energy consumption of multicore processors. *System analysis and applied information science*, 2023, no. 2, pp. 4–12.

Список литературы

1. Better bitmap performance with Roaring bitmaps / S. Chambi [et al.]. Software: Practice and Experience. 2015. Vol. 46, no. 5. P. 709–719. DOI: 10.1002/spe.2325.
2. Corrales F., Chiu D., Sawin J. Variable length compression for bitmap indices // Database and Expert Systems Applications: 22nd International Conference. 2011. Vol. 2. P. 381–395.
3. BitFunnel: Revisiting Signatures for Search / B. Goodwin [et al.] // SIGIR'17: Proceedings of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2017. P. 605–614. DOI: 10.1145/3077136.3080789.
4. BOP: A Bitset-based Optimization Paradigm for Content-based Event Matching Algorithms (S) / W. Liang [et al.] // SEKE 2023: The 35th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering. 2023. P. 487–492. DOI: 10.18293/SEKE2023-142.
5. VanCompernelle M., Barford L., Harris F. Maximum Clique Solver Using Bitsets on GPUs // Information Technology: New Generations. 2016. P. 327–337.
6. Gueniche T., Fournier-Viger P., Tseng V. S. Compact Prediction Tree: A Lossless Model for Accurate Sequence Prediction // Advanced Data Mining and Applications. 2013. P. 177–188.
7. McIlroy R., Dickman P., Sventek J. Efficient dynamic heap allocation of scratch-pad memory // ISMM'08: Proceedings of the 7th international symposium on Memory management. 2008. P. 31–40.
8. BitEA: BitVertex Evolutionary Algorithm to Enhance Performance for Register Allocation / G. S. Terci [et al.] // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 115497–115514. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3446596.

9. Karasik O. N., Prihozhy A. A. Cooperative multi-thread scheduler for solving large-size tasks on multi-core systems // Big Data and Advanced Analytics VI. Minsk, 2020. P. 202–212.
10. Karasik O. N., Prihozhy A. A. Blocked algorithm of finding all-pairs shortest paths in graphs divided into weakly connected clusters // System analysis and applied information science. 2024. No. 2. P. 4–10. DOI: 10.21122/2309-4923-2024-2-4-10.
11. Prihozhy A. A., Karasik O. N. New blocked all-pairs shortest paths algorithms operating on blocks of unequal sizes // System analysis and applied information science. 2023. No. 4. P. 4–13.
12. Prihozhy A. A., Karasik O. N. Advanced heterogeneous block-parallel all-pairs shortest path algorithm. Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2023. № 1 (266). С. 77–83.
13. Prihozhy A. A. Generation of shortest path search dataflow networks of actors for parallel multicore implementation // Informatics. 2023. Vol. 20, no. 2. P. 65–84.
14. Prihozhy A. A. Optimization of data allocation in hierarchical memory for blocked shortest paths algorithms // System analysis and applied information science. 2021. No. 3. P. 40–50.
15. Karasik O. N., Prihozhy A. A. Tuning block-parallel all-pairs shortest path algorithm for efficient multi-core implementation // System analysis and applied information science. 2022. No. 3. P. 57–65.
16. Prihozhy A. A., Karasik O. N. Influence of shortest path algorithms on energy consumption of multicore processors // System analysis and applied information science. 2023. No. 2. P. 4–12.

Information about the authors

Karasik Oleg Nikolayevich – PhD (Engineering), Lead Engineer, ISsoft Solutions (5 Chapaeva str., 220034, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karasik.oleg.nikolaevich@gmail.com

Prihozhy Anatoly Alexievich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Computer and System Software. Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prihozhy@bntu.by

Информация об авторах

Карасик Олег Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер. Иностранное производственное унитарное предприятие «Иссофт Солюшенз» (ул. Чапаева 5, 220034, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: karasik.oleg.nikolaevich@gmail.com

Прихожий Анатолий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения информационных систем и технологий. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: prihozhy@bntu.by

Received 15.11.2024

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ	5
МАТЕМАТИКА	5
Волк А. М., Вилькоцкий А. И., Янович С. В. Газоцентрибежная сепарация жидкой фазы	5
Якименко А. А. Модальная управляемость одной двумерной системы запаздывающего типа с тремя запаздываниями	11
Можей Н. П. Редуктивные пространства с разрешимой группой преобразований, не допускающие эквивалентных связностей	16
ФИЗИКА	20
Лазовская О. И., Вершиловская И. В., Леонтьев В. Н., Игнатовец О. С., Крук Н. Н. Спектрально-люминесцентные характеристики NO ₂ -замещенных порфиринов	20
Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В., Наркевич Г. Э. Статистическое исследование формы фазовой диаграммы молекулярной системы в окрестности критической точки	26
ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ	31
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	31
Королёв А. А., Карпович Д. С., Фокин Т. П. Классификация типов данных, используемых в аналитике больших данных	31
Гринюк Д. А., Сухорукова И. Г., Олиферович Н. М. Развитие систем контроля герметичности	36
ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ	47
Хартанович А. А. Использование низкоплотностных кодов и кодов Рида – Соломона в системах избыточного кодирования информации	47
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ	56
Гурин Н. И., Ржеутская Н. В. Структура семантической базы знаний для системы тестирования на естественном языке	56
АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ	62
Karasik O. N., Prihozhy A. A. Thread-safe bitset with fast extract min operation	62

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES.....	5
MATHEMATICS	5
Volk A. M., Vilkocki A. I., Yanovich S. V. Gas-centrifugal separation of the liquid phase.....	5
Yakimenka A. A. Modal controllability of one two-dimensional delayed system with three delays	11
Mozhey N. P. Reductive spaces with a solvable group of transformations that do not admit equiaffine connections	16
PHYSICS	20
Lasovskaya O. I., Vershilovskaya I. V., leontiev V. N., Ignatovets O. S., Kruk M. M. Spectral-luminescent characteristics of NO ₂ -substituted porphyrins	20
Narkevich I. I., Farafontova E. V., Narkevich G. E. Statistical research of molecular system phase diagram form in the critical point neighbourhood	26
COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES	31
MODELLING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS	31
Korolyov A. A., Karpovich D. S., Fokin T. P. Classification of data types used in big data analytics	31
Hryniuk D. A., Suchorukova I. G., Oliferovich N. M. Development of leak detection systems	36
PROCESSING AND TRANSMISSION OF INFORMATION	47
Khartanovich A. A. Using low-density codes and Reed – Solomon codes in redundant information coding systems	47
SYSTEMS ANALYSIS AND TRAINING SYSTEMS	56
Gurin N. I., Rzeutskaya N. V. Semantic knowledge base structure for a natural language testing system	56
ALGORITHMIC AND PROGRAMMING.....	62
Karasik O. N., Prihozhy A. A. Thread-safe bitset with fast extract min operation.....	62

Редактор *Р. М. Рябая*
Компьютерная верстка *Д. А. Кускильдина, В. А. Маркушевская*
Корректор *Р. М. Рябая*

Подписано в печать 14.03.2025. Формат 60×84¹/₈.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 8,4. Уч.-изд. л. 9,0.
Тираж 38 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
ЛП № 38200000001984.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.