

ISSN 2588-0454
ISSNe 2588-0462

URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL



VOL. 4, № 4
2020



Ural Radio Engineering Journal

2020, Vol. 4, No. 4

Scientific and Technical Journal

Established in **2017**
Published **quarterly**

The articles are published in Russian and English

Issued in Russia

Founded by Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
19, Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russia



Ural Radio Engineering Journal

2020, Т. 4, № 4

Научно-технический журнал

Журнал основан в 2017 г.
Выходит четыре раза в год

Статьи публикуются на русском и английском языках

Издается в России

Учредитель — Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ural Radio Engineering Journal

2020, Vol. 4, No. 4

Editor in Chief

Sergey T. Knyazev, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Editorial council

Igor I. Abramov, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Bakytzhan S. Akhmetov, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Yuri P. Akulinichev, Tomsk State University of Control Systems and Technology, Tomsk, Russia

Stanislav N. Darovskikh, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Leonid G. Dorosinskiy, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Yuriy B. Gimpilevich, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Vladlen I. Gusevskij, National Research University MPEI, Moscow, Russia

Nalik T. Isemenbergenov, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, Almaty, Republic of Kazakhstan

Vyacheslav E. Ivanov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Reinhard Klette, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand

Victor G. Kobernichenko, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Vladislav Ya. Noskov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Eugenij Ochin, Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland

Kirill M. Zeyde, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Vladimir V. Sazonov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

Sergey N. Shabunin, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Nikolaj I. Vojtovich, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Managing editor

Nataliya V. Papulovskaya, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Ural Radio Engineering Journal

2020, Т. 4, № 4

Главный редактор

Князев Сергей Тихонович, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Редакционный совет

Абрамов Игорь Иванович, Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Акулиничев Юрий Павлович, Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Ахметов Бакытжан Сражатдинович, Казахский национальный
педагогический университет имени Абая, Алматы, Республика
Казахстан

Войтович Николай Иванович, Южно-Уральский государственный
университет, Челябинск, Россия

Гимпилевич Юрий Борисович, Севастопольский государственный
университет, Севастополь, Россия

Гусевский Владлен Ильич, Национальный исследовательский
университет «МЭИ», Москва, Россия

Даровских Станислав Никифорович, Южно-Уральский
государственный университет, Челябинск, Россия

Доросинский Леонид Григорьевич, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Иванов Вячеслав Элизбарович, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Исембергенов Налик Турегалиевич, Казахский национальный
технический университет им. К. И. Сатбаева, Алматы, Республика
Казахстан

Клемте Рейнхард, Оклендский технологический университет,
Окленд, Новая Зеландия

Коберниченко Виктор Григорьевич, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Носков Владислав Яковлевич, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Очин Евгений, Морской университет Щецина, Щецин, Польша

Зейде Кирилл Михайлович, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Сазонов Владимир Васильевич, Московский физико-технический
институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Шабунин Сергей Николаевич, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Управляющий редактор

Папуловская Наталья Владимировна, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

Ural Radio Engineering Journal**2020, Vol. 4, No. 4****CONTENTS**

| | |
|---|-----|
| <i>Zhdanov A. E., Dorosinskiy L. G., Borisov V. I., Negodyaev K. E., Evdochim L.</i> Estimation of ice-liquid plasma phase transition using electronic test equipment.... | 363 |
| <i>Lipchak D. A., Dushkina A. A., Chupov A. A.</i> External humidifier for ventilator: PID control based on the Ziegler-Nichols method | 376 |
| <i>Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G.</i> The gravitational radiation power of the blazar OJ 287 | 397 |
| Publication Requirements for Articles Submitted to <i>Ural Radio Engineering Journal</i> | 412 |
| Publication Ethics | 418 |
| Article Submission Guidelines | 426 |

Ural Radio Engineering Journal

2020, Т. 4, № 4

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| <i>Жданов А. Е., Доросинский Л. Г., Борисов В. И., Негодяев К. Е., Евдоким Л.</i> Оценка фазового перехода плазмы лед-жидкость с помощью радиоизмерительных приборов..... | 363 |
| <i>Липчак Д. А., Душкина А. А., Чупов А. А.</i> Увлажнитель дыхательных смесей: ПИД-регуляция с использованием метода Циглера – Никольса | 376 |
| <i>Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г.</i> Мощность гравитационного излучения блазара ОJ 287 | 397 |
| Требования к статьям, публикуемым в журнале <i>Ural Radio Engineering Journal</i> | 415 |
| Публикационная этика | 422 |
| Правила оформления статьи | 426 |

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.4.001

УДК 536.421.1

Оценка фазового перехода плазмы лед-жидкость с помощью радиоизмерительных приборов

А. Е. Жданов^{1, 2} , Л. Г. Доросинский², В. И. Борисов²,
К. Е. Негодяев², Л. Евдоким^{3, 4}

¹ АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова, Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 336

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

³ Политехнический университет Бухареста, Румыния, г. Бухарест, Букурешти-Секторул-6, Splaiul Independenței, 31

⁴ Infineon Technologies Romania SCS, Румыния, 020335, г. Бухарест, Бульвар Димитри Помпею 6, Ново Парк, Здания В и С, этаж 1

 zhdanov@ieee.org

Аннотация

В настоящее время одной из наиболее динамично развивающихся областей знаний является современная медицина. Во многом темпы развития медицины определяются технологическими возможностями. Служба крови относится к наиболее насыщенным техническими средствами отраслям медицины, так как от технологий обработки крови и ее компонентов зависит качество конечного продукта и в конечном итоге здоровье и жизнь пациента. Согласно техническому регламенту о требованиях безопасности крови, ее продуктов, кровезамещающих растворов и технических средств, используемых в трансфузционно-инфузионной терапии, утвержденному Правительством России 26.01.2010: «Компоненты донорской крови должны размораживаться и подогреваться до необходимой температуры с использованием специально предназначенного оборудования». Специально предназначенным оборудованием для размораживания и подогревания криоконсервированных продуктов крови являются размораживатели. Размораживатели криоконсервированных продуктов крови – это специализированные технические средства, используемые для измерения электрических, магнитных и электромагнитных величин, характеризующих температурные параметры объекта размораживания и подогревания. В области разморозки и подогревания криоконсервированных продуктов крови для трансфузционно-инфузионной терапии фундаментальной является задача разработки программного решения для моделирования систем размораживания, что может позволить определить оптимальные параметры систем размораживания на этапе предмакетного моделирования. Настоящая статья описывает экспериментальное исследование

по оценке фазового перехода плазмы лед-жидкость при размораживании с использованием радиоизмерительного оборудования. Полученные данные будут использованы для создания математической модели процесса размораживания продуктов крови. В качестве нагревательного элемента конструкции размораживателя используется печатный нагреватель тонких листов полиэтилентерефталата (ПЭТ).

Ключевые слова

размораживание, размораживание криоконсервированных продуктов крови, терmostатирование, тепловизор, тепловизионный снимок, гистограмма, продукты крови, трансфузионно-инфузионная терапия, служба крови, фазовый переход

Для цитирования

Жданов А. Е., Доросинский Л. Г., Борисов В. И., Негодяев К. Е., Евдоким Л. Оценка фазового перехода плазмы лед-жидкость с помощью радиоизмерительных приборов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):363–375. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.001.

Estimation of ice-liquid plasma phase transition using electronic test equipment

A. E. Zhdanov^{1, 2} , L. G. Dorosinskiy², V. I. Borisov²,
K. E. Negodyaev², L. Evdochim^{3, 4}

¹ Urals Optical-Mechanical Plant, 33 B Vostochnaya Str., Ekaterinburg, 620100, Russia

² Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

³ Polytechnic University of Bucharest, 31 Splaiul Independenței, Bucuresti-Sectorul-6, Bucharest, Romania

⁴ Infineon Technologies Romania SCS, Novo Park, Buildings B & C, floor 1, Bulevardul Dimitrie Pompeiu 6, Bucharest, 020335, Romania

 zhdanov@ieee.org

Abstract

One of the most dynamically developing areas of knowledge is modern medicine. In many ways, the pace of development of medicine is determined by technological capabilities. The blood service is one of the most technologically saturated branches of medicine since the quality of the final product and the patient's health depend on the processing technology of the blood and its components. According to the technical regulations on the safety requirements of blood, its products, blood-substituting solutions and technical means used in transfusion-infusion therapy, approved by the Government of Russia on 01/26/2010: "The components of donated blood must be thawed and heated to the required temperature using specially designed equipment". Defroster for cryopreserved blood products are specialized technical means used to measure electrical, magnetic and electromagnetic quantities characterizing the temperature parameters of

the object to be thawed and heated. In the field of defrosting and heating cryopreserved blood products for transfusion-infusion, the fundamental task is to develop a software solution for simulating defrosting systems, which can make it possible to determine the optimal parameters of defrosting systems at the stage of pre-model modeling. This article describes an experimental study to evaluate the phase transition of an ice-liquid plasma during defrosting using radio measuring equipment. The obtained data will be used to create a mathematical model of the process of defrosting blood products.

Keywords

defrosting, defrosting of cryopreserved blood products, thermostating, thermal imager, thermal imaging, histogram, blood products, transfusion-infusion therapy, blood service, phase transition

For citation

Zhdanov A. E., Dorosinskiy L. G., Borisov V. I., Negodyaev K. E., Evdochim L. Estimation of ice-liquid plasma phase transition using electronic test equipment. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):363–375. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.001.

Введение

В связи с тем что на рынке медицинской электроники представлено множество технических средств размораживания и подогревания для трансфузионно-инфузионной терапии, возникает потребность оценки сильных и слабых сторон подобных устройств. Наиболее распространенными на сегодняшний день из инструментальных методов размораживания креоконцентрированных продуктов крови являются размораживание в жидком теплоносителе и размораживание без непосредственного контакта с жидким теплоносителем. В первом случае пакеты с размораживаемым биоматериалом помещаются в специальную ванну с жидким теплоносителем. Во втором случае жидкий теплоноситель находится в герметичной емкости, где он нагревается и специальным насосом нагнетается в полимерные нагревательные подушки, а пакеты с биоматериалом помещаются между этими нагревательными подушками. В роли жидкого теплоносителя, как правило, выступает дистиллированная вода.

Среди аппаратов, осуществляющих размораживание в жидком теплоносителе, можно выделить размораживатель «Плазмотерм-4» российского производителя «Гиперион». Достоинством данного аппарата является относительно быстрое время размораживания 15–20 мин., высокая точность терmostатирования относительно других российских производителей, которая составляет ± 1 градус Цельсия. Такая точность была достигнута производителем за счет оптимального выбора параметров процесса термообработки, что и рассматривается в статье [1].

Среди иностранных аппаратов, использующих аналогичный инструментальный метод размораживания, выделяется размораживатель «DH8» американского производителя «Helmer». По характеристикам термостатирования и длительности размораживания данный аппарат аналогичен «Плазмотерм-4». Однако «DH8» имеет более эффективный режим перехода субстанции из одного фазового состояния в другое, что подтверждается в исследовании [2].

Недостатком обоих аппаратов является относительно высокая погрешность термостатирования, наличие водяной системы, водяных ТЭНов, что требует время на слив воды из ванн и соответствующее техническое обслуживание.

Среди аппаратов, осуществляющих размораживание без непосредственного контакта с жидким теплоносителем, лучшим по техническим характеристикам является размораживатель «Plasmatherm» немецкого производителя «Barkley». По техническим параметрам у данного аппарата нет аналогов в Российской Федерации.

За счет отсутствия непосредственного контакта с жидким теплоносителем возможно размораживание криоконсервированных продуктов крови при более высокой температуре, что позволяет сократить время размораживания до 10–15 мин. Результаты, подтверждающие этот факт, представлены в исследовании [3].

Недостатком аппарата является наличие замкнутой водяной системы, интегрированной с водяными ТЭНами, которая после определенного количества циклов размораживания требует замены теплоносителя замкнутой системы и соответствующего технического обслуживания.

Цель исследования

Целью настоящей статьи является описание экспериментальных данных, полученных в результате исследования по оценке фазового перехода плазмы лед-жидкость при размораживании с использованием радиоизмерительного оборудования. Полученные данные планируется использовать для создания математической модели процесса размораживания продуктов крови.

Материал и методы исследования

На сегодняшний день существует множество методов размораживания криоконсервированных продуктов крови. Однако практически реализована только малая часть этих методов. Некоторые методы в соответствии с последними исследованиями

использовать для нужд службы крови недопустимо. В качестве иллюстрации этого можно привести аппарат для размораживания продуктов крови, в основе которого лежит микроволновый способ размораживания, запатентованный Кеннетом Карром в 1989 г. в США [4]. Из относительно недавнего сравнительного анализа [5] микроволнового и контактного метода (где теплоносителем является вода) размораживания плазмы крови следует, что вследствие использования микроволнового метода была снижена активность FVII, а клиническое значение FM были завышены. Таким образом, разработанные методы и технические реализации размораживания продуктов крови, не представленные на рынке, зачастую не имеют клинических подтверждений эффективности размораживания.

Для получения экспериментальных данных фазового перехода плазмы нами был разработан стенд, состоящий из ПИД-регулятора, тепловизора и пирометра. Внутрь пакета для крови с плазмой было установлено 7 термопар, подключенных к ПИД-регулятору, а температурное поле поверхности пакета фиксировалось тепловизором и пирометром. В результате экспериментов была определена зависимость картины температурного поля пакета с плазмой от времени размораживания. В приложении [6] представлены результаты исследования размораживания с печатным (ленточным) нагревателем в момент достижения целевой температуры.

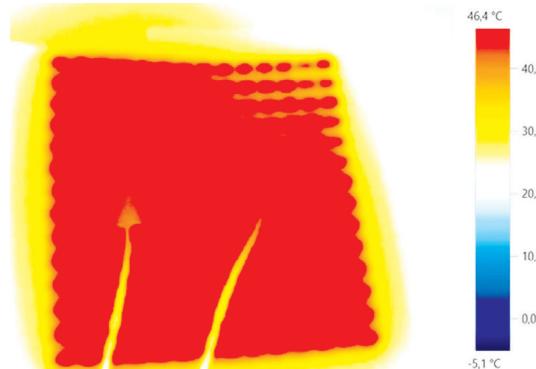


Рис. 1. Тепловизионный снимок печатного нагревателя ПЭТ на базе чернил

Fig. 1. Thermal image of an ink-based PET print heater

В качестве нагревателя для данного эксперимента были использованы печатные нагреватели на базе чернил. Данный выбор обусловлен тем, что нагреватели легкие, тонкие и равномерно выделяют тепло, а также имеется возможность саморегулировки целевой температуры. На рис. 1 показан тепловизион-

ный снимок нагревателя, где целевая температура нагревателя равна 46.4 ± 3 °C, что эквивалентно напряжению 14.5 ± 2.5 В на источнике питания. Используемые в конструкции стенда средства измерения достаточны для оценки объемного теплового поля пакета для крови. Данный стенд не позволяет устанавливать необходимые типы нагревателей и их режимы, типоразмеры камеры размораживания.

В пакет для крови была залита плазма и заморожена до -5 °C. На пакет для крови с плазмой было установлено 7 термопар (3 из них показаны на рис. 2a), подключенных к ПИД-регулятору, а температурное поле поверхности пакета фиксировалось тепловизором и пирометром. На рис. 2б показана зависимость температуры плазмы от времени размораживания, где 1 участок – плазма в состоянии льда, 2 – фазовый переход, 3 – жидкость.

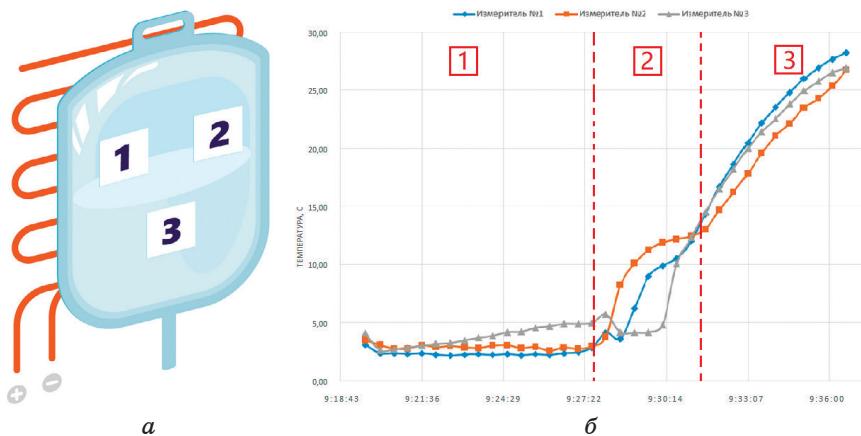


Рис. 2. Пакет для крови с установленными термопарами:
а – схема расположения термопар; б – зависимость температуры плазмы от времени размораживания

Fig. 2. Blood bag with installed thermocouples:
a – layout of thermocouples; b – dependence of the plasma temperature on the defrosting time

Установка 4 из 7 термопар схематично показана на рис. 3а. Термопары устанавливались на контейнер. На рис. 3б показана зависимость температуры плазмы от времени размораживания. 1 участок – плазма в состоянии льда, 2 – фазовый переход, 3 – жидкость.

На рис. 4а показан тепловизионный снимок пакета с плазмой, где плазма находится в состоянии льда, что соответствует участку 1 на рис. 2б и рис. 3б. На рис. 4б показана гистограмма распределения температуры поверхности пакета, где мини-

мальная температура -6 $^{\circ}\text{C}$, максимальная 21.6 $^{\circ}\text{C}$, а среднее значение температуры составляет 2.6 $^{\circ}\text{C}$.



Рис. 3. Пакет для крови с установленными термопарами:
а – схема расположения термопар; б – зависимость температуры плазмы от времени размораживания

Fig. 3. Blood bag with installed thermocouples:
a – layout of thermocouples; b – dependence of the plasma temperature on the defrosting time

На рис. 4 ε показан тепловизионный снимок пакета с плазмой, где плазма находится в состоянии фазового перехода, что соответствует участку 2 на рис. 2 δ и рис. 3 δ . На рис. 4 ε показана гистограмма распределения температуры поверхности пакета, где минимальная температура 15 $^{\circ}\text{C}$, максимальная 46.2 $^{\circ}\text{C}$, а среднее значение температуры составляет 16.6 $^{\circ}\text{C}$.

На рис. 4 δ показан тепловизионный снимок пакета с плазмой, где плазма находится в состоянии жидкости, что соответствует участку 3 на рис. 2 δ и рис. 3 δ . На рис. 4 ε показана гистограмма распределения температуры поверхности пакета, где минимальная температура 19.2 $^{\circ}\text{C}$, максимальная 28.2 $^{\circ}\text{C}$, а среднее значение температуры составляет 24.5 $^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Среди существующих на рынке размораживания следует отметить «Plasmatherm» немецкого производителя «Barkley» [7; 8]. По техническим параметрам у данного аппарата нет аналогов в Российской Федерации, так как данный аппарат реализует разморозку эритроцитов при $+45$ $^{\circ}\text{C}$. В «Plasmatherm» жидкий теплоноситель находится в герметичной емкости, где он нагревается и специальным насосом нагнетается в полимерные нагревательные подушки, а пакеты с биоматериалом

помещаются между этими нагревательными подушками. За счет отсутствия непосредственного контакта с жидким теплоносителем возможно размораживание криоконцервированных продуктов крови при более высокой температуре, соответственно, а также возможно сократить время размораживания. Результаты, подтверждающие этот факт, представлены в исследовании [9].

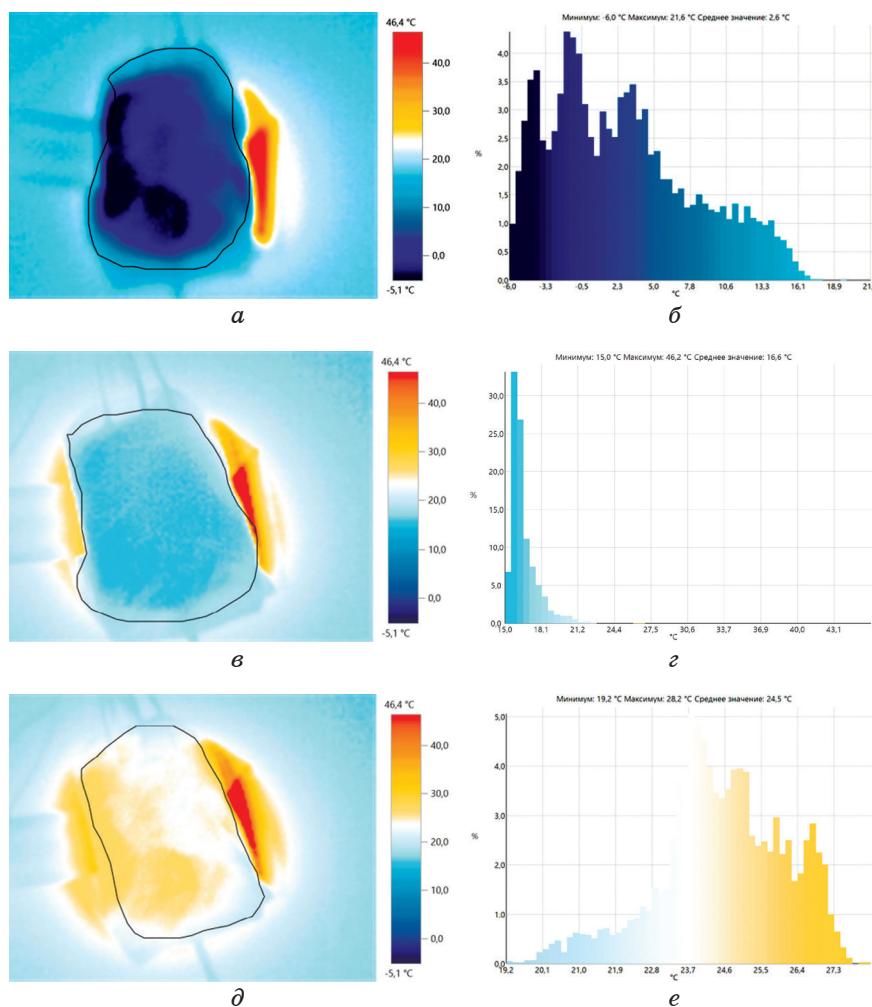


Рис. 4. Термовизионный снимок пакета с плазмой и гистограмма распределения температуры поверхности пакета:
 а, б – плазма в состоянии льда; в, г – фазовый переход плазмы;
 д, е – плазма в состоянии жидкости

Fig. 4. Thermal image of the packet with plasma and the histogram of the temperature distribution of the packet surface:
 а, б – plasma in the state of ice; в, г – plasma phase transition;
 д, е – plasma in liquid state

Выводы или заключение

Используемые в конструкции стенда средства измерения достаточно для оценки объемного теплового поля пакета для крови. Данный стенд не позволяет устанавливать необходимые типы нагревателей и их режимы, типоразмеры камеры размораживания. Необходимо доработать стенд и реализовать его многоконфигурационность для получения эмпирических данных объемных тепловых полей в пакете для крови.

При разработке технических средств быстрой высокоточной разморозки криоконсервированных продуктов крови для трансфузионно-инфузионной терапии фундаментальной является задача разработки новых методов и систем размораживания [10–12], а также разработки программного решения для моделирования систем размораживания, что может потенциально позволить определить оптимальные параметры систем размораживания на этапе предмакетного моделирования.

Благодарности

Идея написания этой статьи возникла на международной конференции IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB 2019). Благодарим за содействие ООО «Лидкор», в лице генерального директора компании Ульбина Алексея Игоревича. Данная статья является частью работы, посвященной модернизации и разработке нового оборудования для трансфузионной терапии на базе продукции ООО «Лидкор». Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90037.

Acknowledgments

The idea of this article writing had originated in the conference shortly after the IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB 2019). We are grateful for the assistance from the Leadcore LLC represented by Aleksey I. Ulybin General Manager of the company. This article is part of the work devoted to the modernization and development of new equipment for transfusion therapy based on Leadcore LLC production. The reported study was funded by RFBR, project number № 20-37-90037.

Список литературы

1. Гудков А.Г., Онуфриевич А.Д., Каюмова Л.И. и др. Размораживатель криоконсервированных продуктов крови «Плазмотерм-4»: решение проблемы обеспечения точности процесса термообработки. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2007;(6):39–43.
2. Scott E., Puca K., Heraly J., Gottschall J., Friedman K. Evaluation and comparison of coagulation factor activity in fresh-frozen plasma and 24-hour plasma at thaw and after 120 hours of 1 to 6 °C storage. *Transfusion*. 2009;49(8):1584–1591. DOI: 10.1111/j.1537-2995.2009.02198.x.

3. Kuta P., Melling N., Zimmermann R., Achenbach S., Eckstein R., Strobel J. Clotting factor activity in fresh frozen plasma after thawing with a new radio wave thawing device. *Transfusion*. 2019;59(5):1857–1861. DOI: 10.1111/trf.15246.
4. Adams G. Microwave blood plasma defroster. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 1991;26(3):156–159. DOI: 10.1080/08327823.1991.11688152.
5. Heymann C., Pruss A., Sander M., et al. Thawing Procedures and the Time Course of Clotting Factor Activity in Fresh-Frozen Plasma: A Controlled Laboratory Investigation. *Anesthesia & Analgesia*. 2006;103(4):969–974. DOI: 10.1213/01.ANE.0000240416.56803.5B.
6. Жданов А. Е., Доросинский Л. Г. Зависимость картины температурного поля пакета с плазмой от времени дефростации. *Zenodo*. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.4442368.
7. Borsani E., Rodella L. F., Sorbellini E., et al. Intraepidermal Injections of Autologous Epidermal Cell Suspension: A new promising approach to Dermatological. *Preliminary Study*. 2017. vol. 6.
- Borsani E., Rodella L. F., Sorbellini E., Rezzani R., Tabellini G., Rucco M. et al. Intraepidermal Injections of Autologous Epidermal Cell Suspension: A New Promising Approach to Dermatological Disorders. *Preliminary Study. Annals of Pharmacology and Pharmaceutics*. 2017;2(10):1107. Available at: <http://www.remedypublications.com/open-access/intraepidermal-injections-of-autologous-epidermal-cell-suspension-a-new-promising-approach-to-dermatological-disorders-preliminary-study-2385.pdf>
8. Baust J. M., Campbell L. H., Harbell L. W. Best practices for cryopreserving, thawing, recovering, and assessing cells. *In Vitro Cell Dev Biol Anim*. 2017;53(10):855–871. DOI: 10.1007/s11626-017-0201-y.
9. Pinki S., Mohan G., Rafi A. M., Innah S. J., Thomas T. Rapid dry plasma thawing system: An alternative to conventional thawing baths. *Asian Journal of Transfusion Science*. 2017;11(2):147–150. DOI: 10.4103/0973-6247.214356.
10. Negodyaev K. E., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dorosinsky L. G. Overview of Blood Mixers for Transfusion Therapy: Characteristics, Features, and Development Potential. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) (Yekaterindurg, May 14–15, 2020)*. Yekaterindurg: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 109–112.
11. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D. Reflection Coefficient in Pressure Pulse of Human Blood Flow. In: *2020 13th International Conference on Communications (COMM) (Bucharest, June 18–20, 2020)*. Bucharest: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 65–68.
12. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D., Dorosinsky L. G. Blood Mixers for Transfusion Therapy: Photoplethysmogram application for blood velocity determination. In: *2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications*

(MeMeA) (Bari, June 1, 2020 – July 1, 2020). Bari: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 1–6.

References

1. Gudkov A. G., Onufrievich A. D., Kayumova L. I. et al. Thawer for cryopreserved blood products «Plasmoterm-4»: solution to the problem of ensuring the accuracy of the heat treatment process. *Biomedical Technologies and Radio Electronics*. 2007;(6):39–43. (In Russ.)
2. Scott E., Puca K., Heraly J., Gottschall J., Friedman K. Evaluation and comparison of coagulation factor activity in fresh-frozen plasma and 24-hour plasma at thaw and after 120 hours of 1 to 6°C storage. *Transfusion*. 2009;49(8):1584–1591. DOI: 10.1111/j.1537-2995.2009.02198.x.
3. Kuta P., Melling N., Zimmermann R., Achenbach S., Eckstein R., Strobel J. Clotting factor activity in fresh frozen plasma after thawing with a new radio wave thawing device. *Transfusion*. 2019;59(5):1857–1861. DOI: 10.1111/trf.15246.
4. Adams G. Microwave blood plasma defroster. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 1991;26(3):156–159. DOI: 10.1080/08327823.1991.11688152.
5. Heymann C., Pruss A., Sander M., et al. Thawing Procedures and the Time Course of Clotting Factor Activity in Fresh-Frozen Plasma: A Controlled Laboratory Investigation. *Anesthesia & Analgesia*. 2006;103(4):969–974. DOI: 10.1213/01.ANE.0000240416.56803.5B.
6. Zhdanov A. E., Dorosinskiy L. G. Influence of the temperature field on the defrostation time of plasma BAG.. *Zenodo*. 2021. (In Russ.) DOI: 10.5281/zenodo.4442368.
7. Borsani E., Rodella L. F., Sorbellini E., et al. Intraepidermal Injections of Autologous Epidermal Cell Suspension: A new promising approach to Dermatological. *Preliminary Study*. 2017. vol. 6.
Borsani E., Rodella L. F., Sorbellini E., Rezzani R., Tabellini G., Rucco M. et al. Intraepidermal Injections of Autologous Epidermal Cell Suspension: A New Promising Approach to Dermatological Disorders. *Preliminary Study*. *Annals of Pharmacology and Pharmaceutics*. 2017;2(10):1107. Available at: <http://www.remedypublications.com/open-access/intraepidermal-injections-of-autologous-epidermal-cell-suspension-a-new-promising-approach-to-dermatological-disorders-preliminary-study-2385.pdf>
8. Baust J. M., Campbell L. H., Harbell L. W. Best practices for cryopreserving, thawing, recovering, and assessing cells. *In Vitro Cell Dev Biol Anim*. 2017;53(10):855–871. DOI: 10.1007/s11626-017-0201-y.
9. Pinki S., Mohan G., Rafi A. M., Innah S. J., Thomas T. Rapid dry plasma thawing system: An alternative to conventional thawing baths. *Asian Journal of Transfusion Science*. 2017;11(2):147–150. DOI: 10.4103/0973-6247.214356.
10. Negodyaev K. E., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dorosinsky L. G. Overview of Blood Mixers for Transfusion Therapy: Characteristics, Features, and Development Potential. In: *2020 Ural Symposium on*

Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) (Yekaterindurg, May 14–15, 2020). Yekaterindurg: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 109–112.

11. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D. Reflection Coefficient in Pressure Pulse of Human Blood Flow. In: *2020 13th International Conference on Communications (COMM) (Bucharest, June 18–20, 2020)*. Bucharest: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020, pp. 65–68.

12. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D., Dorosinsky L. G. Blood Mixers for Transfusion Therapy: Photoplethysmogram application for blood velocity determination. In: *2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (Bari, June 1, 2020 – July 1, 2020)*. Bari: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020, pp. 1–6.

Информация об авторах

Жданов Алексей Евгеньевич, магистр Университета Эрлангена-Нюрнберга (Эрланген, Германия), секретарь международного инженерного общества IEEE в области медицины и биологии EMBS Россия-Сибирь, руководитель направления медицинских изделий АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (Екатеринбург, Россия), инженер-исследователь и аспирант департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия).

Доросинский Леонид Григорьевич, доктор технических наук, профессор департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия), почетный работник высшей школы РФ, почетный радиист.

Борисов Василий Ильич, кандидат технических наук, председатель международного инженерного общества IEEE Россия-Сибирь, доцент департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия).

Негодяев Константин Евгеньевич, магистрант департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия).

Лучиан Евдоким, магистр Политехнического университета Бухареста (Бухарест, Румыния), руководитель проектов Infineon Technologies Romania SCS (Бухарест, Румыния).

Information about the authors

Aleksei E. Zhdanov, Master of Engineering Science at the Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Erlangen, Germany), Chapter Secretary of IEEE EMBS Russia- Siberia Section Chapter, Area Chief of Medical Device at the Urals Optical-Mechanical Plant (Yekaterinburg,

Russia), Research Engineer and Graduate Student of the Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems at the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia).

Leonid G. Dorosinskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems at the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia), honorary worker of the higher school of the Russian Federation, honorary radio operator.

Vasilii I. Borisov, Candidate of Technical Sciences, Chair of IEEE Russia-Siberia Chapter, Associate Professor of the Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems at the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia).

Konstantin E. Negodyaev, master student at the Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems at the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

Lucian Evdochim, Master of Science at the Polytechnic University of Bucharest (Bucharest, Romania), Project Manager at Infineon Technologies Romania SCS (Bucharest, Romania).

Поступила / Received: 26.11.2020

Принята в печать / Accepted: 28.12.2020

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.4.002

УДК 681.536.5:681.515.8:681.518.3:615.471

Увлажнитель дыхательных смесей: ПИД-регуляция с использованием метода Циглера – Никольса

Д. А. Липчак¹✉, А. А. Душкина^{1, 2}, А. А. Чупов^{1, 2}¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32² АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова», Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 336

✉ lipchak@uomz.eu

Аннотация

Ввиду повсеместного распространения коронавирусной инфекции SARS-CoV-2, с начала 2020 г. значительно вырос спрос на наркозно-дыхательные аппараты, в частности на аппараты искусственной вентиляции легких, аппараты ингаляционной анестезии и кислородных ингаляторов. В состав таких аппаратов для респираторной поддержки должны входить специальные медицинские устройства, предназначенные для нагрева и повышения влагосодержания дыхательной смеси, поступающей пациенту от аппаратов респираторной терапии. Такие медицинские изделия принято называть увлажнителями дыхательных смесей. На территории АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» организовано производство увлажнителя дыхательных смесей «ТЕВЛАР» – «УОМЗ» по ТУ 32.50.21-121-07539541-2018 с принадлежностями. В рамках проекта по модернизации увлажнителя дыхательных смесей «ТЕВЛАР» – «УОМЗ» была реализована доработка блока электронных средств измерения аппарата. В частности, с целью повышения точности терmostатирования нагревательного элемента изделия при нагревании до целевой температуры дыхательных смесей, силами конструкторского бюро медицинских изделий было модернизировано встроенное программное обеспечение, а именно реализован алгоритм устойчивого и стабильного ПИД-регулирования. В настоящей статье представлен обзор методов настройки реализованного ПИД-регулятора, обоснован выбор ПИД-регуляции с использованием настройки по методу Циглера – Никольса, а также результаты экспериментального подтверждения стабильности выбранного алгоритма.

Ключевые слова

ПИД-регулятор, ПИД-регулирование, метод Циглера – Никольса, термостат, увлажнитель, дыхательные смеси, ИВЛ

Для цитирования

Липчак Д. А., Душкина А. А., Чупов А. А. Увлажнитель дыхательных смесей: ПИД-регуляция с использованием метода Циглера – Никольса. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):376–317. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.002.

External humidifier for ventilator: PID control based on the Ziegler-Nichols method

D. A. Lipchak¹✉, A. A. Dushkina^{1, 2}, A. A. Chupov^{1, 2}

¹ Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

² Joint Stock Company “Production Association “Urals Optical & Mechanical Plant” named after Mr. E. S. Yalamov”, 33 B Vostochnaya Str., Ekaterinburg, 620100, Russia

✉ lipchak@uomz.eu

Abstract

Due to the ubiquitous spread of SARS-CoV-2 coronavirus infection, the demand for anaesthesia and respiratory devices has significantly increased since the beginning of 2020. In particular, artificial ventilation devices, inhalation anaesthesia devices, or oxygen inhalers. The respiratory support devices must include special medical devices designed to heat and increase the moisture content of the respiratory mixture supplied to the patient from the respiratory therapy apparatus. These medical devices are known to as humidifiers. The production of a humidifier for breathing mixtures “TEVLAR” – “UOMZ” according to TU 32.50.21-121-07539541-2018 with accessories was organized in the territory of Joint Stock Company “Production Association “Urals Optical & Mechanical Plant” named after Mr. E. S. Yalamov”. The electronic measuring instruments unit of the device has been modified within the framework of the project for the modernization of the humidifier of breathing mixtures “TEVLAR” – “UOMZ”. In particular, in order to increase the accuracy of thermal stability of the heating element when heating the breathing mixtures to the target temperature, the software of the electronic measuring instruments unit was modernized by the Medical Devices Design Bureau, namely, the stable PID controller was implemented and tuned. Thus, this article provides an overview of the methods for tuning the PID controller, justifies the choice of PID tuning by the Ziegler-Nichols method and also provides the experimental results to confirm device operation stability.

Keywords

PID controller, PID control, Ziegler-Nichols method, thermostat, humidifier, breathing mixtures, mechanical ventilation

For citation

Lipchak D. A., Dushkina A. A., Chupov A. A. External humidifier for ventilator: PID control based on the Ziegler-Nichols method. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):376–317. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.002.

Введение

В нормальных условиях нос и верхние дыхательные пути нагревают и увлажняют вдыхаемый воздух, так что в легких условия остаются постоянными. Тепло и влага сохраняются во время выдоха, но при нормальных условиях ежедневно из легких теряется около 250 мл воды и 350 ккал тепла. Вода теряется в виде насыщенного пара в выдыхаемых газах, а тепло теряется, поскольку скрытая теплота испарения этой воды была взята из тела. Поскольку удельная теплоемкость воздуха мала, тепловые потери мало являются прямым результатом нагрева вдыхаемого воздуха.

Вдыхаемый воздух может иметь широкий диапазон температур и влажности, но альвеолярный газ полностью насыщен водяным паром при температуре тела. Следовательно, существует градиент между носовой частью и точкой, где газ достигает 37 °С и относительной влажности 100 % (44 мг/л), граница изотермического насыщения. Обычно он находится чуть ниже киля у взрослых и меняет свое положение с изменениями содержания тепла и влаги, а также дыхательного объема вдыхаемого газа. Над границей изотермического насыщения дыхательные пути действуют как противоточная система тепло- и влагообмена, чему способствует турбулентный поток газа; ниже этой точки уровни тепла и влажности остаются постоянными, а поток газа становится ламинарным. Таким образом, кондиционирование вдыхаемого газа зависит от его объема и состава и происходит внутри самих дыхательных путей [1].

Эндотрахеальная интубация обходит большую часть нормальных зон тепло- и влагообмена, что снижает их способность кондиционировать вдыхаемые газы, так что при вентиляции теряется больше тепла и влаги [2; 3]. Кроме того, поскольку граница изотермического насыщения смещается дальше по дыхательному дереву, уровни тепла и влажности в дыхательных путях изменяются, и изменяется легочная механика. В этих условиях вентиляция медицинским сжатым газом (МСГ), который подается пациенту при комнатной температуре, но имеет незначительное содержание воды, усугубляет ситуацию, смещая границу изотермического насыщения дальше по дыхательному тракту. И наоборот, вентиляция газами, искусственно нагретыми и насыщенными водяным паром, может сдвинуть границу изотермического насыщения в головную сторону, добавляя в систему тепло и воду и снова изменяя легочную функцию [4]. Для нагрева и повышения влагосодержания дыхательной смеси, поступающей пациенту от аппарата искусственной вентиляции легких, обычно применяются увлажнители.

Во время вентиляции с сухими газами из дыхательных путей происходит значительная потеря влаги, что приводит не только к потере тепла, но и к значительному снижению веса тела из-за обезвоживания. Обезвоживание дыхательных путей вызывает повреждение эпителия, особенно трахеи и верхних бронхов. Степень гистологического повреждения прямо пропорциональна продолжительности вентиляции сухими газами, а функциональное нарушение может проявиться в течение 10 минут [5].

Известно о нескольких гистологических поражениях: разрушение ресничек и повреждение слизистых желез; дезорганизация и уплощение псевдостратифицированного столбчатого эпителия и кубовидного эпителия; дезорганизация базальной мембранны; цитоплазматическая и ядерная дегенерация; шелушение клеток; изъязвление слизистой оболочки; деактивная гиперемия после повреждения [6].

Важнейшим результатом этих изменений является нарушение функции мукоцилиарного подъемника. Это приводит к задержке мокроты и ателектазу. Повреждение базальной мембранны вместе с потерей клеток приводит к снижению эластичности тканей с окончательным разрушением бронхиол, отеком слизистой оболочки и ателектазом [7]. Восстановление структуры и функции обратно пропорционально продолжительности вентиляции сухим газом; заживление повреждений ресничек занимает 2–3 дня, а восстановление полнослойных эпителиальных повреждений – 2–3 недели.

Смещение границы изотермического насыщения вниз при вентиляции сухими газами изменяет легочную механику, вызывая гипоксемию. Также наблюдается снижение функциональной остаточной емкости и статической податливости и увеличение разницы в напряжении кислорода в альвеолярных артериях; эти изменения отражают области ателектаза с внутрилегочным шунтированием [8]. При вентиляции сухим газом активность поверхности-активного вещества снижается, что приводит к увеличению поверхностного натяжения. У чувствительных людей сухие газы действуют как сильнодействующий бронхоспазм, что еще больше ухудшает дыхательную функцию [9].

Увлажнение вдыхаемых газов снижает частоту послеоперационных легочных осложнений и увеличивает послеоперационное давление кислорода в артериальной крови. В этих исследованиях в качестве показателя послеоперационной заболеваемости использовались клинические, а также рентгенологические признаки. В других исследованиях не удалось показать различия в частоте послеоперационных легочных осложнений между увлажненными и не увлажненными группами, но использова-

лись только рентгенологические признаки, которые обеспечивают менее чувствительный индекс [10; 11]. Чрезмерное искусственное увлажнение вдыхаемых газов может привести к ситуации столь же нефизиологической, как вентиляция сухими газами. Динамическое равновесие тепло- и влагообмена в верхних дыхательных путях заменяется более статичной средой и теплом.

Тепло может поступать в дыхательные пути, если вдыхаемые газы нагреваются до температуры выше температуры тела и насыщаются водяным паром. Может возникнуть нагревание слизистой или жжение, вызывающее отек легких и образование структур. Кроме того, поскольку тепло не может быть потеряно через легкие, может возникнуть гипертермия.

Поддержание точного баланса жидкости затрудняется из-за чрезмерного увлажнения вдыхаемых газов. Значительно сокращается не только незаметная потеря воды, но и добавление воды в организм, что приводит к отравлению водой. Сообщений о физиологических изменениях, происходящих из-за чрезмерного увлажнения вдыхаемых газов, немного, но были описаны следующие: дегенерация и сращение ресничек вторичных и периферических бронхов; неровности поверхности капельки слизи; повышенный объем выделений из-за снижения испарения [12]; повышенный объем секреции может превышать возможности мукоцилиарного подъемника; конденсация капель воды в дыхательных путях может заблокировать их, что приведет к ателектазу; капли воды могут вызывать охлаждение слизистой оболочки.

Чрезмерное увлажнение вдыхаемых газов приводит к снижению функциональной остаточной емкости и статической податливости вместе с артериальной гипоксемией. Считается, что эти изменения отражают ателектаз и внутрилегочное шунтирование. Активность поверхностно-активного вещества быстро снижается при чрезмерном увлажнении вдыхаемых газов, причем изменения более заметны, чем при недостаточном увлажнении. Это может быть результатом того, что ателектаз препятствует выработке или высвобождению сурфактанта; инактивация или вытеснение сурфактанта внутриальвеолярной жидкостью; или, возможно, разбавление поверхностно-активного вещества конденсированной водой [13]. Следует отметить, что при гипоксии необходимо обеспечивать достаточную концентрацию O_2 в дыхательной смеси и осуществлять постоянное мониторирование сатурации пациента, что может быть реализовано описанными методами [14–16].

Увлажнение вдыхаемых газов оптимально, когда граница изотермического насыщения возвращается в исходное положение, чтобы моделировать условия, которые обычно преобладают в ды-

хательных путях [17]. У человека температура во рту составляет приблизительно 32 °C, а средняя абсолютная влажность во рту, которая считается оптимальной, составляет 27,3 мг H₂O/л. Увлажнение вдыхаемых газов до этого уровня должно в большинстве случаев сохранить мукоцилиарную функцию и функцию легких [12]. Таким образом, увлажнители дыхательных смесей должны соответствовать целому ряду технических требований, регламентированных в нормативной документации [18], а также требованиям, основанных на собранном пользовательском опыте клинического использования для уже представленных на рынке медицинских изделий-аналогов.

Аппаратная значимость разработанного алгоритма заключается в быстрой и бюджетной адаптируемости программного решения при изменении схемотехнических узлов и компонентов, что особенно востребовано в условиях возможного дефицита комплектующих поставок из-за рубежа в связи с текущей эпидемиологической обстановкой, а также оставляет пространство для модернизации с учетом использования более актуальных компонентов и материалов.



Рис. 1. Увлажнитель дыхательных смесей «ТЕВЛАР»:

1 – блок управления; 2 – панель индикации и управления; 3 – кнопка-ограничитель; 4 – кнопка включения; 5 – камера увлажнителя; 6 – основание камеры увлажнителя; 7 – входной и выходной патрубки; 8 – трубка системы автозаполнения

Fig. 1. External humidifier TEVLAR manufactured by Urals Optical-Mechanical Plant (Yekaterinburg, Russia):

1 – control unit; 2 – display and control panel; 3 – limit button; 4 – power button; 5 – humidifier chamber; 6 – humidifier chamber base; 7 – inlet and outlet pipes; 8 – tube of auto-filling system

Материалы и методы

Увлажнитель дыхательных смесей «ТЕВЛАР» – «УОМЗ» по ТУ 32.50.21-121-07539541-2018 с принадлежностями производства АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (Екатеринбург, Россия) (далее – увлажнитель дыхательных смесей «ТЕВЛАР»), выступающий в роли базового программно-аппаратного комплекса для экспериментальной отработки нового алгоритма ПИД-регулирования, предназначен для подогрева и увлажнения дыхательной смеси, поступающей пациенту от аппарата искусственной вентиляции легких (ИВЛ), аппарата ингаляционной анестезии (ИА) или кислородного ингалятора (рис. 1).

Основные требования, предъявляемые к прибору в эксплуатации, заключаются в следующем:

1. Прибор должен обеспечивать автоматическое поддержание выбранных врачом параметров температуры и влажности дыхательной смеси на выходе подающего шланга (у пациента) в широком диапазоне минутной вентиляции.
2. Каналы регулирования температуры и влагосодержания дыхательной смеси должны быть автономны.
3. Прибор должен обеспечивать индикация на цифровом табло задаваемой и измеренной температуры на выходе подающего шланга.
4. Необходимо наличие сигнализации о перегреве дыхательной смеси и нарушениях в работе.
5. Простое обслуживание, небольшие размеры и масса для эффективного применения совместно с любыми аппаратами ИВЛ, ИА и кислородными ингаляторами.

Принципиальные структурные особенности необходимые для разработки ПИД регулятора показаны на рис. 2.

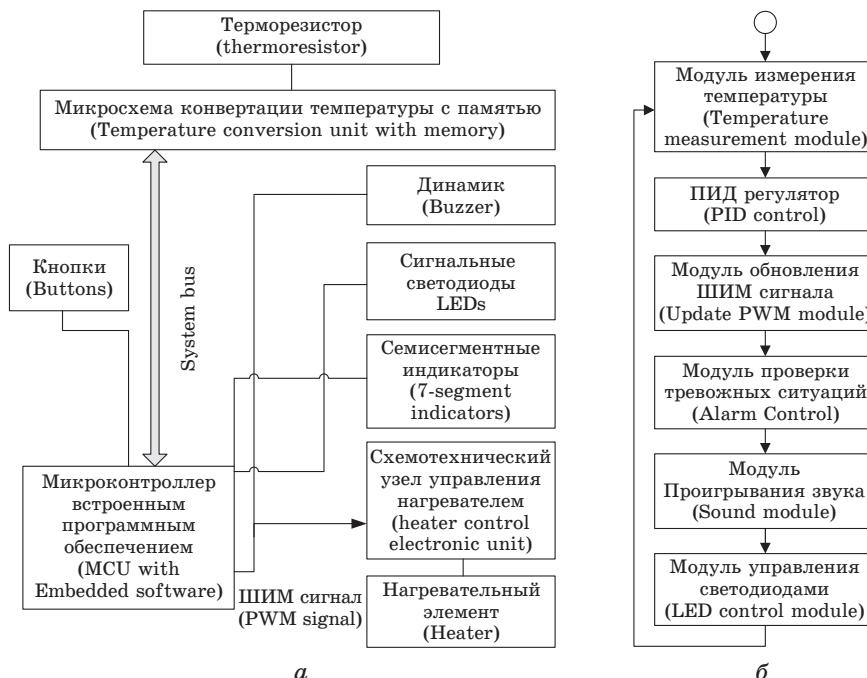


Рис. 2. Принципиальная схема устройства в части разрабатываемого встроенного программного обеспечения устройства – *а*, обобщенный алгоритм разрабатываемого ПО с ПИД регулятором – *б*

Fig. 2. (a) Principal structure of the device related to proposed embedded program structure, general algorithm of the proposed embedded program with PID regulator is shown on (b)

Постановка задачи

С целью модернизации текущего увлажнителя дыхательных смесей «ТЕВЛАР», в частности повышения точности термостатирования нагревательного элемента изделия при нагревании до целевой температуры, необходимо выбрать оптимальный метод настройки ПИД-регулятора, внедрить его в программное обеспечение, а также экспериментально подтвердить устойчивость системы при длительной работе при различных эксплуатационных условиях. При разработке алгоритма следует учитывать:

- возможности программируемого контроллера Atmel Atmega32A, а именно ограниченный ресурс памяти;
- особенности существующего аппаратного решения при управлении нагревателем – в изделии реализована схема симисторная схема управления нагревателем с переключением при переходе через нулевое напряжение, что накладывает ограничения на форму управляющего импульсного сигнала с микроконтроллера;
- требования нормативной документации по безопасности системы – отклонение температуры после выхода на режим не должно превышать 1,0 °С, на нагреватель не должно подаваться питание при возникновении тревожной ситуации (превышение температуры, неисправность измерительного узла и пр.).

Ниже приведен перечень методов, потенциально применимых для решения поставленной задачи.

1. Метод масштабирования. К условно беспоисковым методам можно отнести метод масштабирования. Его основная идея состоит в использовании уже имеющейся информации об эталонной системе автоматического регулирования (САР) с другим объектом управления, но с тем же регулятором, что и в настраиваемой замкнутой САР [19]. Алгоритм метода масштабирования заключается в следующем: аппроксимация эталонного и действительного объектов управления математической моделью; введение искусственной системы координат и определение масштабных коэффициентов, связывающих между собой координаты реальной и искусственной систем; перевод эталонных настроек регулятора из искусственной системы координат в реальную с помощью ранее определенных масштабных коэффициентов. При аппроксимации необходимо определить значения параметров, при которых модель наиболее точно описывает начальные участки переходных характеристик рабочего и эталонного объектов управления [20]. Аппроксимацию можно выполнять различными методами. Например, методом наименьших квадратов (МНК), графическим способом и с помощью специа-

лизированных программ. Источником неоднозначности реализации ММ является возможность использования математических моделей различного типа [21].

Основным недостатком данного метода является необходимость наличия библиотеки эталонных САР. Но при имеющейся базе профессиональный наладчик может выбрать наиболее предпочтительный характер управления для своего оборудования, что безусловно является полезным свойством метода. Универсальность ММ в отношении законов регулирования также является еще одним достоинством ММ.

2. Метод многомерного сканирования Ю. Н. Вишняковой. Суть метода многомерного сканирования заключается в последовательном переборе точек в пространстве параметров настройки с фиксированным шагом и вычислении в каждой точке критерия оптимальности и проверке ограничений на запас устойчивости системы по всем контурам. Затем из полученного массива настроек выбираются значения, при которых достигается наименьший минимум. Эти настройки и будут являться оптимальными. Метод многомерного сканирования требует большого объема расчетов (особенно, когда речь идет о поиске глобального минимума в многоэкстремальных задачах) в связи с необходимостью многократного повторения расчетов по одному и тому же алгоритму. Большое количество итераций является его основным недостатком [22].

3. Метод Циглера – Никольса. Наиболее известным является метод Циглера – Никольса, его идея состоит в следующем. Для начала необходимо выставить время интегрирования и дифференцирования на ноль. Затем необходимо постепенно увеличивать коэффициент передачи до тех пор, пока в контуре системы не возникнут колебания с четко определяемой степенью затухания (можно добиться незатухающих колебаний) [23]. Полученное значение коэффициента передачи зафиксировать и по графику переходного процесса определить период автоколебаний. Далее необходимо найти параметры настройки регулятора по эмпирическим формулам (см. табл. 1) [24; 25]:

$$Q = K'_p \left(err + K_d \cdot \frac{1}{T_n} \cdot \int err dt - T_v \cdot \frac{dx}{dt} \right), \quad (1)$$

где t – время, x – измеряемая величина, err – ошибка рассогласования, Q – величина управляющего воздействия, K'_p , T_n , T_v – пропорциональный, интегральный и дифференциальный множитель.

Метод Циглера – Никольса хорошо применим для хорошо управляемых, быстрых объектов.

Таблица 1. Эмпирические формулы подбора коэффициентов по методу Циглера – Никольса

Table 1. Empirical formulae for adjust the regulator's coefficients by the Ziegler – Nichols method

| Структура регулятора (Regulator structure) | Параметры регулирования (Regulator parameters) |
|--|---|
| Пропорциональный (Proportional) | $K'_p = K_{pc} / 0,5$ |
| Пропорционально – интегральный (Proportional integral) | $K'_p = K_{pc} / 0,45$ $T_n = 0,83 T_k$ |
| ПИД (PID) | $K'_p = K_{pc} / 0,6$ $T_n = 0,5 T_k$ $T_v = 0,125 T_k$ |

Примечание: K_{pc} – критический пропорциональный коэффициент, при котором возникают незатухающие колебания, T_k – период незатухающих колебаний, K'_p , T_n , T_v – пропорциональный, интегральный и дифференциальный множитель в непрерывной формуле регулятора (1).

Note: K_{pc} – critical proportional coefficient which provides the constant amplitude fluctuations, T_k – constant amplitude fluctuations period, K'_p , T_n , T_v – proportional, integral and differential factors in the known formula (1).

4. Метод Чина – Хронеса – Ресвика. Метод Чина – Хронеса – Ресвика является модифицированным методом Циглера – Никольса. Он позволяет получить больший запас устойчивости, т. е. сократить время настройки, но коэффициент передачи будет меньше, чем у Циглера – Никольса. Настройки по Чину – Хронесу – Ресвику требуют подстройки преимущественно дифференциальной составляющей.

Подробного описания данного метода приводить не будем, отметим лишь его достоинства и недостатки. Преимуществами являются простота определения настроек и меньшее время настройки. Недостатками, как и в методе Циглера – Никольса, являются неполнота информации о запасе устойчивости системы, который определяет надежность работы регулятора, и приближенная настройка [26]. Так как в реализованном техническом решении подстройка дифференциальной составляющей не потребовалась, как показано далее, предпочтение было отдано более простому методу Циглера – Никольса.

5. Адаптивный метод автоколебаний В. Я. Ротача. Опишем процедуру адаптации по частотным характеристикам системы методом автоколебаний. При настройке регулятора уже после первого вывода системы на границу устойчивости производится аппроксимация КЧХ реального объекта характеристикой настраивающей модели объекта с заранее подобранный структурой, по которой производится расчет оптимума настройки регулятора. После этого система выводится на границу устойчивости. Данная процедура повторяется до тех пор, пока не будут

получены совпадающие на очередных шагах результаты. Выход системы на границу устойчивости является довольно опасной процедурой, данная проблема может быть устранена путем включения в контур регулирования на время настройки двухпозиционного реле. Это приведет к возникновению устойчивых незатухающих колебаний, исследование которых удобно производить методом гармонического баланса (если колебания на входе релейного элемента окажутся близкими к синусоидальным). Отрицательным моментом данного метода является итерационная многошаговая процедура движения к оптимуму. Также на время настройки происходит ухудшение регулирующих свойств регулятора, т.е. данный метод можно применять тогда, когда на объект в процессе настройки не действуют существенные возмущения [27].

В ходе анализа существующих методов параметрической оптимизации было выбрано метод Циглера – Никольса ввиду простоты его программной реализации, отсутствии необходимости производить измерения временных характеристик при помощи сторонних приборов, а также ограниченного ресурса памяти выбранного микроконтроллера.

Результаты

Основная логика работы управляющей программы увлажнителя дыхательных смесей ТЕВЛАР состоит в срабатывании счетчика системного времени), который инкрементируется по прерыванию, возникающему с заданной частотой (прерывание сравнения регистра 16-битного аппаратного таймера). Модуль программных таймеров позволяет создать программный таймер, который будет исполнять подпрограмму (Callback) при достижении заданного для этого таймера индивидуального количества отсчета таймера системного времени. Таким образом, в основном цикле выполнения программы выполняется только проверка программных таймеров.

Следует отметить, что данная архитектура позволяет имитировать многозадачность, а самое главное – минимизировать количество прерываний в системе и часто связанных с работой прерываний проблем.

Подпрограмма ПИД-регулирования вызывается с периодом 1 секунда, притом измерение входящих данных температуры осуществляется перед срабатыванием подпрограммы ПИД регулирования с периодом менее 1 секунды.

Опираясь на подобранный критический пропорциональный коэффициент $K_{pc} = 26$, подобранный по методу Циглера – Никольса, в результате проведенных экспериментальных работ

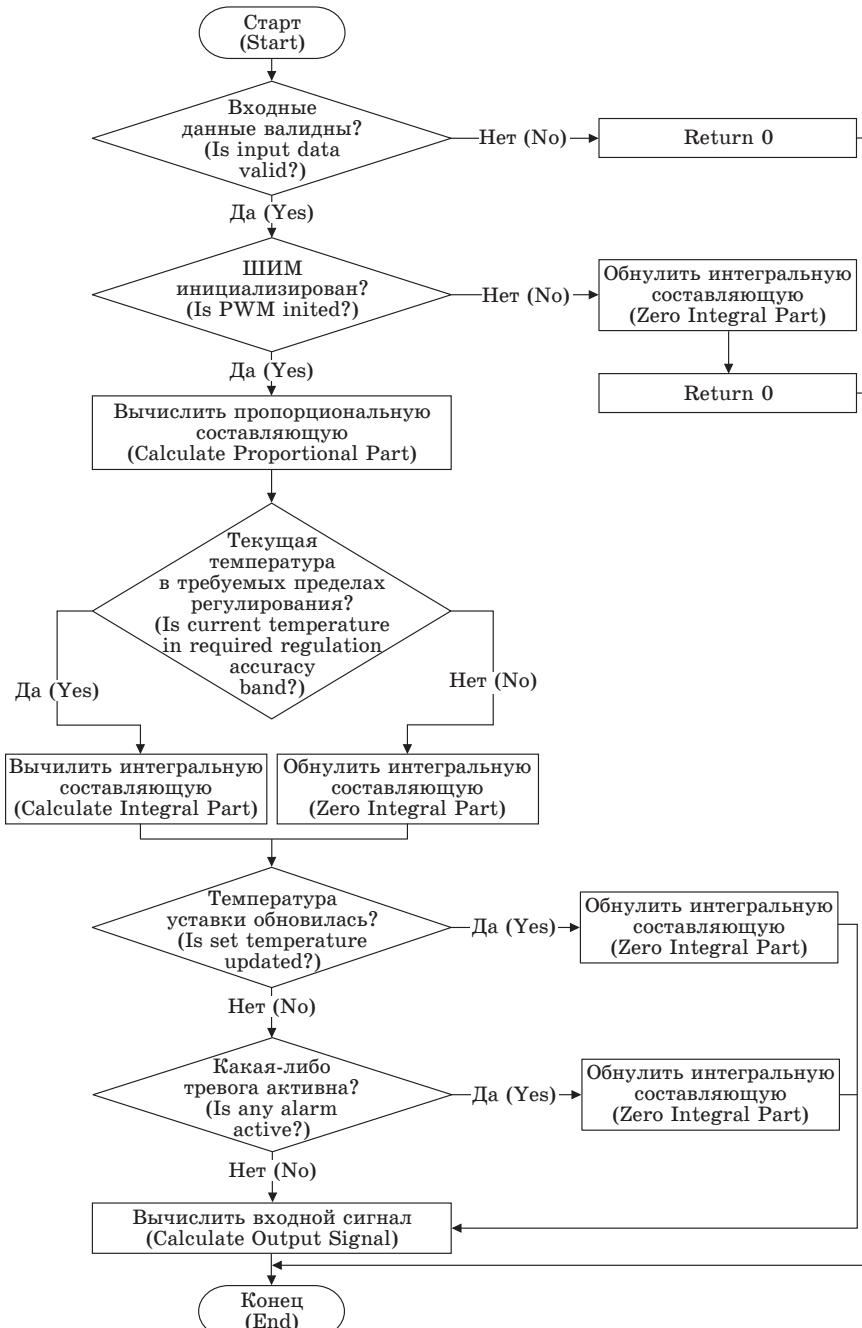


Рис. 3. Блок-схема разработанного алгоритма ПИД-регуляции методом Циглера – Никольса

Fig. 3. Block diagram of the developed PID control algorithm by the Ziegler-Nichols method

по подбору коэффициентов, следующие значения коэффициентов ПИД-регулятора показали наиболее устойчивую работу системы:

$$K_p = 13, K_d = 0, K_i = 0,02,$$

где K_p – пропорциональный коэффициент, K_d – дифференциальный коэффициент, K_i – интегральный коэффициент в известной рекуррентной схеме ПИД регулятора :

$$Q_n = K_p \cdot err_n + K_d \cdot (err_n - err_{n-1}) + K_i \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (err_i), \quad (2)$$

где Q – величина управляющего воздействия, err – отклонение измеренной величины от установленного значения, n – дискретные отчеты времени.

Тем не менее использование метода настройки Циглера – Никольса позволило сократить время разработки, а также реализовать устойчивую систему регулирования при использовании всего 8 кбайт памяти микроконтроллера.

Как показано на блок-схеме работы подпрограммы, приведенной на рис. 3, для корректной работы системы по итогам проведенных опытов в работу регулятора потребовалось ввести ряд ограничений, а именно:

- обнуление интегральной составляющей при смене температуры установки;
- обнуление интегральной составляющей при выходе температуры за границы разрешенного диапазона регулирования;
- обнуление интегральной составляющей при переинициализации работы нагревателя в случае возникновении ситуации некорректной работы устройства.

Разработанный алгоритм был апробирован на макетном образце модифицированного увлажнителя дыхательных смесей «ТЕВ-ЛАР» при подаче постоянных потоков сжатых газов в дыхательный контур, а также совместно с наркозно-дыхательным аппаратом МАИА, производства АО ПО УОМЗ, опытных аппаратов искусственной вентиляции легких SLE6000, результаты валидации ПИД-регуляции нагревательного элемента аппарата представлены на рис. 4. Была достигнута требуемая точность регуляции $\pm 1,0$ °С.

Стабильность работы регулятора подтверждена многочасовыми испытаниями на бесперебойную работу в условиях использования различных настроек минутной вентиляции и частоты дыхания подключенных аппаратов, различных установленных значениях температуры нагревательного элемента устройства [28].

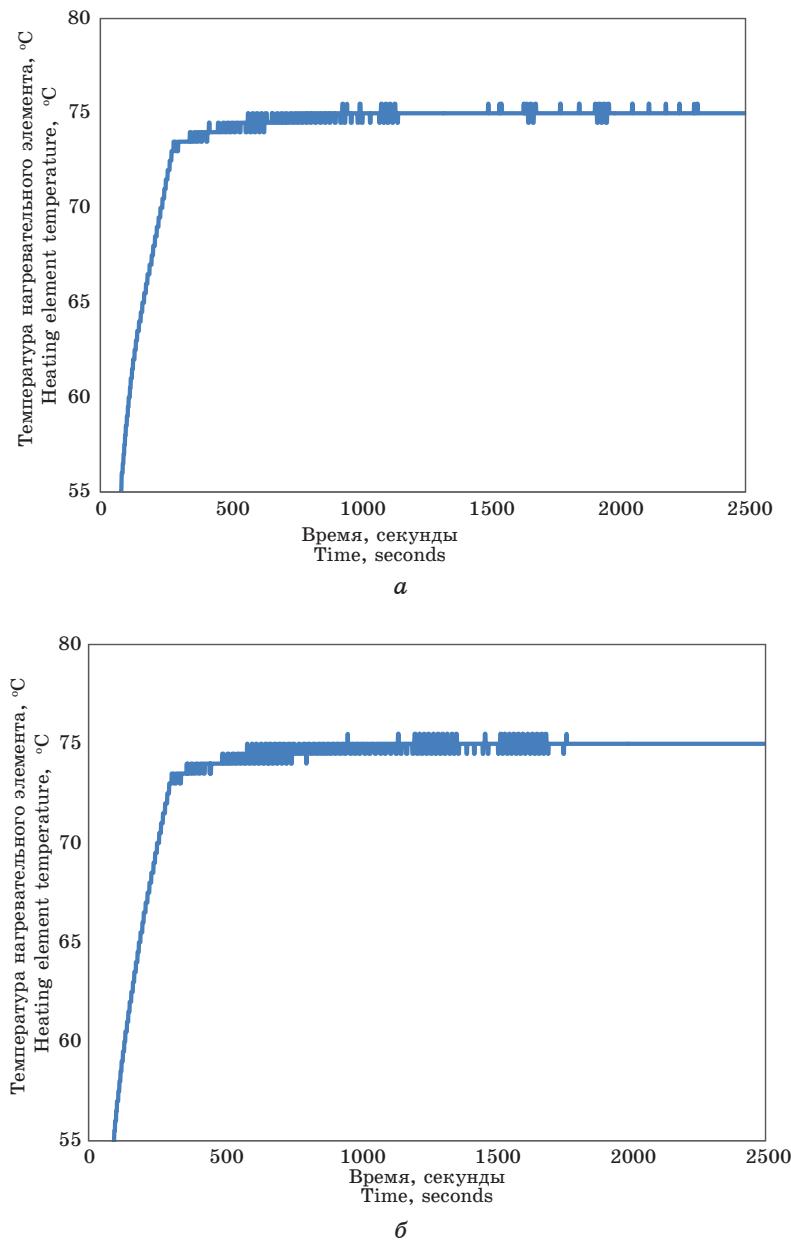


Рис. 4. Зависимость температуры нагревательного элемента увлажнителя дыхательных смесей от времени: *а* – при постоянном потоке 20 литров в минуту; *б* – при постоянном потоке 50 литров в минуту, стандартное отклонение показано серым

Fig. 4. Influence of the temperature of the heating element of the humidifier on time: (a) at a constant flow of 20 liters per minute; (b) at a constant flow of 50 liters per minute, the standard deviation is shown in gray

Заключение

В настоящей статье произведен обзор методов подбора коэффициентов ПИД-регуляции, применимых для терmostатирования нагревательного элемента увлажнителя дыхательных смесей «ТЕВЛАР», а также программно реализовано ПИД-регулирование с применением метода Циглера – Никольса для модифицированного макетного образца увлажнителя дыхательных смесей «ТЕВЛАР». Следует отметить, что на этапе макетного моделирования достигнутая точность ПИД-регуляции является приемлемой и будет доработана на этапе опытного проектирования.

Проведенные опыты показали, что использование программных алгоритмов ПИД регуляции при условии соблюдения обозначенных выше ограничений, достаточно для реализации класса медицинских увлажнителей, совместимых с реальной работой современных аппаратов респираторной поддержки, в сжатый период разработки и с использованием минимальных аппаратных возможностей.

Список литературы

1. Симаков С. С., Холодов А. С. Численное исследование содержания кислорода в крови человека при низкочастотных воздействиях. *Математическое моделирование*. 2008;20(4):87–102. Режим доступа: <http://www.mathnet.ru/links/fb6b5cef9d03c732102ce9493c41c906/mm2385.pdf>
2. Якушенко Н. Л., Нагобаде Д. Т., Копейка У. Э., Михельсон М. О. Изменение активности а-амилазы слюны, как индикатор адренергической активности во время ларингоскопии и интубации трахеи. *Анетезиология и реаниматология*. 2011;(3):29–33.
3. Дунц П. В., Ли О. Е., Шуматов В. Б. Оценка показателей клеточных медиаторов локального воспаления подсвязочного пространства трахеи при эндотрахеальной анестезии. *Анетезиология и реаниматология*. 2019;4:38–42. DOI: 10.17116/anaesthesiology201904138.
4. Малявин А. Г., Адашева Т. В., Бабак С. Л., Губернаторова Е. Е., Уварова О. В. Медицинская реабилитация больных, перенесших COVID-19 инфекцию. Методические рекомендации. *Терапия*. 2020;6(S5):1–48.
5. Lewis B. W., Patial S., Saini Y. Immunopathology of airway surface liquid dehydration disease. *Journal of Immunology Research*. 2019;2180409. DOI: 10.1155/2019/2180409.
6. Wang X., Gong J., Zhu J., Jin Z., Gao W. Alpha 1-antitrypsin for treating ventilator-associated lung injury in acute respiratory distress syndrome rats. *Experimental Lung Research*. 2019;45(7):209–219. DOI: 10.1080/01902148.2019.1642968.
7. Haziot N., Ibrahim M., Zhu K., Thevenin C.P., Hardy S., Gonzalez-Bermejo J. Impact of leaks and ventilation parameters on the efficacy

of humidifiers during home ventilation for tracheostomized patients: a bench study. *BMC Pulmonary Medicine*. 2019;19(1):1–8. DOI: 10.1186/s12890-019-0812-z.

8. Pisani L., Vega M.L. Use of nasal high flow in stable COPD: rationale and physiology. *COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*. 2017;14(3):346–350. DOI: 10.1080/15412555.2017.1315715.

9. Dammann C., Mahnken R. Simulation of a resin transfer molding process using a phase field approach within the theory of porous media. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019;120:147–160.

10. Doctor T. N., Foster J. P., Stewart A., Tan K., Todd D. A., McGrory L. Heated and humidified inspired gas through heated humidifiers in comparison to non-heated and non-humidified gas in hospitalised neonates receiving respiratory support. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2017;(2):CD012549. DOI: 10.1002/14651858.CD012549.

11. Shioji N., Kanazawa T., Iwasaki T., Shimizu K., Suemori T., Kawase H., et.al. Incidence of Pulmonary Complications with the Prophylactic Use of High-flow Nasal Cannula after Pediatric Cardiac Surgery: Prophylactic HFNC Study Protocol. *Acta Medica Okayama*. 2018;72(2):193–196. DOI: 10.18926/AMO/55862.

12. Ярошецкий А. И., Власенко А. В., Грицан А. И., Киров М. Ю., Колесниченко А. П., Лебединский К. М., Николаенко Э. М., Проценко Д. Н. Применение неинвазивной вентиляции легких (второй пересмотр). Клинические рекомендации Общероссийской общественной организации «Федерация анестезиологов и реаниматологов». Анерестезиология и реаниматология. 2019;(6):5–19. DOI: 10.17116/anaesthesiology20190615.

13. Величковский Б. Т. Молекулярные механизмы нарушения газообменной функции легких на Крайнем Севере. Пульмонология. 2020;(4):61–64. DOI: 10.18093/0869-0189-2005-0-4-61-64.

14. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D. Reflection Coefficient in Pressure Pulse of Human Blood Flow. In: *2020 13th International Conference on Communications (COMM) (Bucharest, June 18–20, 2020)*. Bucharest: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 65–68.

15. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D., Dorosinsky L. G. Blood Mixers for Transfusion Therapy: Photoplethysmogram application for blood velocity determination. In: *2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (Bari, June 1, 2020 – July 1, 2020)*. Bari: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 1–6.

16. Negodyaev K. E., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dorosinsky L. G. Overview of Blood Mixers for Transfusion Therapy: Characteristics, Features, and Development Potential. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) (Yekaterindurg, May 14–15, 2020)*. Yekaterindurg: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 109–112.

17. Власенко А. В., Корякин А. Г., Евдокимов Е. А., Еремин Д. А. Защита верхних дыхательных путей пациента в условиях респираторной поддержки: современное состояние вопроса. *Медицинский алфавит*. 2019;1(16):30–36. DOI: 10.33667/2078-5631-2019-1-16(391)-30-36.
18. Ишмухаметова Р. И. Устройство индикации параметров приборов, осуществляющих подачу газовой смеси в легкие человека. *Форум молодых ученых*. 2019;(12):321–323.
19. Gun-Baek S. O. EA-based design of a nonlinear PID controller using an error scaling technique. *Studies in Informatics and Control*. 2019;28(3):279–288. DOI: 10.24846/v28i3y201904.
20. Dadfar S., Wakil K., Khaksar M., Rezvani A., Miveh M. R., Gandomkar M. Enhanced control strategies for a hybrid battery/photovoltaic system using FGS-PID in grid-connected mode. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(29):14642–14660.
21. Chuahy F. D., Olk J., DelVescovo D., Kokjohn S. L. An engine size-scaling method for kinetically controlled combustion strategies. *International Journal of Engine Research*. 2020;21(6):927–947. DOI: 10.1177/1468087418786130.
22. Ротач, В. Я., Вишнякова, Ю. Н. Расчет систем регулирования с двумя вспомогательными регулируемыми величинами. *Теплоэнергетика*. 2006;(2):40–47.
23. Chia K. S. Ziegler-nichols based proportional-integral-derivative controller for a line tracking robot. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2018;9(1):221–226. DOI: 10.11591/ijeecs.v9.i1.pp221-226.
24. Vorobyov V. Y., Sablina G. V. Calculation and Optimization of Parameters of the Discrete PID-controller by the Ziegler-Nichols Method. *Automatics & Software Enginuity*. 2019;1(27):7.
25. Lee S. The modified Ziegler-Nichols method for obtaining the optimum PID gain coefficients under quadcopter flight system. *Journal of the Korea Convergence Society*. 2020;11(11):195–201.
26. Безхмельнов В. Д., Солнцев В. И., Сухов Ж. С. Использование методов настройки и автоподстройки систем автоматического управления температурой на основе программируемого логического контроллера фирмы B&R. *Инженерный вестник*. 2017;(5):16–25. Режим доступа: <http://ainjournal.ru/doc/858765.html>
27. Ротач В. Я., Зверьков В. П., Кузицин В. Ф. Автоматизация проектирования и настройки систем регулирования в составе распределенных АСУ ТП. *Теплоэнергетика*. 1998;(10):20–27.
28. Гераськин И. В., Гераськин В. А., Гераськина Н. В. Определение накопления конденсата по регистрации уровня шума в дыхательном контуре аппаратов искусственной вентиляции легких. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2020;71(3):123–126. DOI: 10.17816/brmma50547.

References

1. Simakov S. S., Kholodov A. S. Computational study of oxygen concentration in human blood under the low-frequency disturbances.

Mathematical Models and Computer Simulations. 2009;1(2):283–295.
DOI: 10.1134/S2070048209020112.

2. Yakushenko N. L., Kopeika U. E., Nagobade D., Mihelson M. O. Changes of salivary alpha amylase as an indicator of adrenergic activity in response to laryngoscopy and endotracheal intubation. *Anesteziologiya i reanimatologiya = Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology.* 2011;(3):29–33. (In Russ.)
3. Dunts P. V., Li O. E., Shumatov V. B. Analysis of cellular mediators of local inflammation of subglottic space using endotracheal anesthesia. *Anesteziologiya i reanimatologiya = Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology.* 2019;4:38–42. (In Russ.) DOI: 10.17116/anaesthesiology201904138.
4. Malyavin A G., Adasheva T. V., Babak S. L., Gubernatorova E. E., Uvarova O. V. Medical rehabilitation of COVID-19-survived patients. Methodological recommendations. *Terapiya = Therapy.* 2020;6(5 Suppl.):1–48. (In Russ.)
5. Lewis B. W., Patial S., Saini Y. Immunopathology of airway surface liquid dehydration disease. *Journal of Immunology Research.* 2019:2180409. DOI: 10.1155/2019/2180409.
6. Wang X., Gong J., Zhu J., Jin Z., Gao W. Alpha 1-antitrypsin for treating ventilator-associated lung injury in acute respiratory distress syndrome rats. *Experimental Lung Research.* 2019;45(7):209–219. DOI: 10.1080/01902148.2019.1642968.
7. Haziot N., Ibrahim M., Zhu K., Thevenin C.P., Hardy S., Gonzalez-Bermejo J. Impact of leaks and ventilation parameters on the efficacy of humidifiers during home ventilation for tracheostomized patients: a bench study. *BMC Pulmonary Medicine.* 2019;19(1):1–8. DOI: 10.1186/s12890-019-0812-z.
8. Pisani L., Vega M.L. Use of nasal high flow in stable COPD: rationale and physiology. *COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease.* 2017;14(3):346–350. DOI: 10.1080/15412555.2017.1315715.
9. Dammann C., Mahnken R. Simulation of a resin transfer molding process using a phase field approach within the theory of porous media. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2019;120:147–160.
10. Doctor T. N., Foster J. P., Stewart A., Tan K., Todd D. A., McGrory L. Heated and humidified inspired gas through heated humidifiers in comparison to non-heated and non-humidified gas in hospitalised neonates receiving respiratory support. *The Cochrane Database of Systematic Reviews.* 2017;(2):CD012549. DOI: 10.1002/14651858.CD012549.
11. Shioji N., Kanazawa T., Iwasaki T., Shimizu K., Suemori T., Kawase H., et.al. Incidence of Pulmonary Complications with the Prophylactic Use of High-flow Nasal Cannula after Pediatric Cardiac Surgery: Prophylactic HFNC Study Protocol. *Acta Medica Okayama.* 2018;72(2):193–196. DOI: 10.18926/AMO/55862.
12. Yaroshetsky A. I., Vlasenko A. V., Gritsan A. I., Kirov M. Yu., Kolesnichenko A. P., Lebedinsky K. M., Nikolaenko E. M., Protsenko D. N. Non-invasive respiratory support (the second edition). Clinical

guidelines of the Federation of Anesthesiologists and Reanimatologists of Russia. *Anesteziologiya i reanimatologiya = Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology*. 2019;(6):5–19. DOI: 10.17116/anaesthesiology20190615.

13. Velichkovsky B. T. Molecular mechanisms of gas exchange disorders in the lung at the Extreme North. *Pulmonologiya = Russian Pulmonology Journal*. 2005;(4):61–64. (In Russ.) DOI: 10.18093/0869-0189-2005-0-4-61-64.

14. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D. Reflection Coefficient in Pressure Pulse of Human Blood Flow. In: *2020 13th International Conference on Communications (COMM) (Bucharest, June 18–20, 2020)*. Bucharest: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 65–68.

15. Evdochim L., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dobrescu D., Dorosinsky L. G. Blood Mixers for Transfusion Therapy: Photoplethysmogram application for blood velocity determination. In: *2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) (Bari, June 1, 2020 – July 1, 2020)*. Bari: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 1–6.

16. Negodyaev K. E., Zhdanov A. E., Borisov V. I., Dorosinsky L. G. Overview of Blood Mixers for Transfusion Therapy: Characteristics, Features, and Development Potential. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) (Yekaterindurg, May 14–15, 2020)*. Yekaterindurg: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2020. P. 109–112.

17. Vlasenko A. V., Koryakin A. G., Evdokimov E. A., Eryomin D. A. Protection of upper respiratory tract of patient in conditions of respiratory support: current state of issue. *Medicinskij alfavit = Medical alphabet*. 2019;1(16):30–36. (In Russ.) DOI: 10.33667/2078-5631-2019-1-16(391)-30-36.

18. Ishmukhametova R. I. Device for indicating parameters of instruments carrying out the gas mixture to light persons. *Forum molodykh uchenykh* 2019;(12):321–323. (In Russ.)

19. Gun-Baek S. O. EA-based design of a nonlinear PID controller using an error scaling technique. *Studies in Informatics and Control*. 2019;28(3):279–288. DOI: 10.24846/v28i3y201904.

20. Dadfar S., Wakil K., Khaksar M., Rezvani A., Miveh M. R., Gandomkar M. Enhanced control strategies for a hybrid battery/photovoltaic system using FGS-PID in grid-connected mode. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(29):14642–14660.

21. Chuahy F. D., Olk J., DelVescovo D., Kokjohn S. L. An engine size-scaling method for kinetically controlled combustion strategies. *International Journal of Engine Research*. 2020;21(6):927–947. DOI: 10.1177/1468087418786130.

22. Rotach V. Ya., Vishnyakova Yu. N. Calculation of regulation systems with two auxiliary controlled variables. *Thermal Engineering*. 2006;53(2):120–127. DOI: 10.1134/S004060150602008X.

23. Chia K. S. Ziegler-nichols based proportional-integral-derivative controller for a line tracking robot. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2018;9(1):221–226. DOI: 10.11591/ijeecs.v9.i1.pp221-226.
24. Vorobyov V. Y., Sablina G. V. Calculation and Optimization of Parameters of the Discrete PID-controller by the Ziegler-Nichols Method. *Automatics & Software Enginerry*. 2019;1(27):7.
25. Lee S. The modified Ziegler-Nichols method for obtaining the optimum PID gain coefficients under quadcopter flight system. *Journal of the Korea Convergence Society*. 2020;11(11):195–201.
26. Bezhkhmelnov V. D., Solntsev V. I., Sukhov Zh. S. The use of tuning and auto-tuning methods for automatic temperature control systems based on a programmable logic controller from B&R. *Inzhenernyi vestnik = Engineering Bulletin*. 2017;(5):16–25. (In Russ.) Available at: <http://ainjournal.ru/doc/858765.html>
27. Rotach V. Ya., Zverkov V. P., Kuzishchin V. F. Automation of the design and adjustment of distributed process control systems. *Thermal Engineering*. 1998;45(10):814–821.
28. Geraskin I. V., Geraskin V. A., Geraskina N. V. Determination of the level of condensate by recording the noise level in the respiratory circuit of mechanical ventilation devices. *Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2020;71(3):123–126. (In Russ.) DOI: 10.17816/brmma50547.

Информация об авторе

Липчак Дарья Александровна, инженер-программист конструкторского бюро медицинских изделий АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (Екатеринбург, Россия), магистр по специальности «Электроника и телекоммуникации» (выдан Ляонинским политехническим университетом (Цзиньчжоу, КНР)).

Душкина Анна Андреевна, магистрант департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия), инженер конструкторского бюро медицинских изделий АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (Екатеринбург, Россия).

Чупов Алексей Александрович, аспирант департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия), главный конструктор конструкторского бюро медицинских изделий АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» (Екатеринбург, Россия).

Information about the authors

Daria A. Lipchak, Software Engineer, Medical Devices Research and Development Bureau, Joint Stock Company “Production Association

“Urals Optical & Mechanical Plant” named after Mr. E. S. Yalamov” (Yekaterinburg, Russia); Master in Electronics and Telecommunications, Liaoning University of Science and Technology (China).

Anna A. Dushkina, Master’s Degree Student, Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Russia; Engineer, Medical Devices Research and Development Bureau, Joint Stock Company “Production Association “Urals Optical & Mechanical Plant” named after Mr. E. S. Yalamov” (Yekaterinburg, Russia).

Alexey A. Chupov, PhD student, Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Russia; Chief Designer, Medical Devices Research and Development Bureau, Joint Stock Company “Production Association “Urals Optical & Mechanical Plant” named after Mr. E. S. Yalamov” (Yekaterinburg, Russia).

Поступила / Received: 10.12.2020

Принята в печать / Accepted: 28.12.2020

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.4.003

УДК 524.882, 551.511.31

Мощность гравитационного излучения блазара OJ 287

А. Е. Вольвач¹, Л. Н. Вольвач¹, М. Г. Ларионов²

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики Крымской астрофизической обсерватории РАН, Россия, Крым, 98688, г. Ялта, пгт. Кацивели, ул. Шулейкина 1, РТ-22

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Аннотация

С применением новой модели, основанной на рассмотрении тесных двойных систем (ТДС) из сверхмассивных черных дыр, получены данные для блазара OJ 287, необходимые для нахождения параметров гравитационного излучения OJ 287. Использовались результаты многочастотных мониторингов, выполненных только в радиодиапазоне. Применение гармонических анализов наблюдательных данных позволило построить модель ТДС, состоящих из двух близких по массе сверхмассивных черных дыр (СМЧД), что дало возможность получить найти мощность гравитационного излучения, идущего от OJ 287, вариации орбиты двойной СМЧД и рассмотреть возможность экспериментального определения изменений этих параметров в системе. Рассмотрены варианты излучения электромагнитных и гравитационных волн, идущих от OJ 287 в различных состояниях активности объекта.

Ключевые слова

активные ядра галактик, черные дыры, тесные массивные системы, гравитационные волны

Для цитирования

Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Мощность гравитационного излучения блазара OJ 287. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):397–411. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.003.

The gravitational radiation power of the blazar OJ 287

A. E. Volvach¹, L. N. Volvach¹, M. G. Larionov²

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department of Crimean Astrophysical Observatory RAS, RT-22 Crimea, 1 Shuleykina St., Katsively, Yalta, 98688, Russia

² Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 84/32 Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russia

Abstract

Using a new model based on the consideration of close binary systems (CDS) of supermassive black holes (SMBHs), we obtained data for the

OJ 287 blazar, which is necessary for finding the parameters of the OJ 287 gravitational radiation. We used the results of multi-frequency monitoring performed only in the radio band. The application of harmonic analyses of observational data allowed us to construct a model of CDS consisting of two SMBHs of comparable masses, which made it possible to find the power of gravitational radiation coming from OJ 287, variations in the orbit of the double SMDS, and to consider the possibility of experimentally determining changes in these parameters in the system. Variants of radiation of electromagnetic and gravitational waves coming from OJ 287 in various states of object activity are considered.

Keywords

active galactic nuclei, black holes, closed massive systems, gravitational waves

For citation

Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G. The gravitational radiation power of the blazar OJ 287. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):397–411. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.003.

Введение

Блазар OJ 287 принадлежит к числу немногочисленных ярчайших представителей активных ядер галактик (АЯГ). Считается, что активность АЯГ связана с двойственностью их структуры. Они состоят из двойных сверх массивных черных дыр (СМЧД), находящихся на стадии эволюции, близкой к слиянию. Наличие двойственности СМЧД в центрах активных галактик (АЯГ) было впервые отмечено в конце прошлого века в применении именно к АЯГ OJ 287 [1].

Существует ряд причин, по которым этот объект наблюдается в оптическом диапазоне уже более ста лет. Во-первых, это сравнительно близкая система, благодаря чему OJ 287 яркий в оптике. Кроме того, в направлении на источник отсутствует значительное поглощения света из-за пылевых масс, нередко расположенных в центральных областях материнских галактик.

Являясь мощными излучателями в электромагнитном диапазоне длин волн, СМЧД излучают и гравитационные волны (ГВ). Различные гравитационные детекторы могут регистрировать ГВ в различных частотных диапазонах. Но именно детекторы ГВ “International Pulsar Timing Array” (ИПТА) работают в супернизком частотном диапазоне (10^{-9} – 10^{-8} Гц) [2], где излучаемая двойными СМЧД мощность может быть значительной. Блазар OJ 287 считается наиболее известным представителем АЯГ во Вселенной, способным излучать мощные наногерцовые ГВ [3]. Даже без вспышек мощность ГВ от объекта может составлять величину $dE/dT \approx 10^{45}$ эрг/с [4].

Для определения уровня излучения ГВ от двойных СМЧД необходимо знать их характеристики. ОJ 287 считается единственным СМЧД, у которого они хорошо известны. Эти характеристики включают в себя массы компонентов, полуоси орбит, орбитальные и прецессионные периоды, периоды вращения центрального тела, величину движения перицентра и эксцентриситет. Из данных многочастотных мониторингов мы можем получить времена и последовательности возникновения вспышек в источнике, которые не позволяют непосредственно получить все названные параметры двойных СМЧД. В этом случае задача заключается в применении модельного метода определения параметров с использованием определенных допущений или предположений.

В ряду СМЧД блазар ОJ 287 считается самой массивной из двойных систем [5]. Его характеристики включают в себя массы центральной СМЧД и компаньона: $M \approx 1.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, $m \approx 1.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$, большую полуось орбиты $a \approx 1.4 \cdot 10^{17}$ см, орбитальный период, смещение перицентра орбиты 39° за один орбитальный период, эксцентриситет орбиты $e \approx 0.7$. Масса спутника определялась из предположения, что вспышки в оптическом диапазоне имеют некую средневзвешенную амплитуду 5.6 мЯн, хотя на самом деле они варьируются от 2.5 до 35 мЯн, то есть более чем на порядок величины. Из наблюдательных данных мы имеем только набор времен вспышечных явлений, чего явно недостаточно для однозначного определения параметров. Сложность заключается и в том, что модель построена на большом числе предположений и допущений. Поэтому любой новый подход для построения моделей СМЧД представляет интерес в решении этой проблемы.

Мы начали разрабатывать модель ТДС из СМЧД с привлечением только данных радиодиапазона [6–9].

В нашем представлении двойные СМЧД становятся яркими АЯГ только тогда, когда компаньон центральной СМЧД в перицентре орбиты начинает пересекать аккреционный диск (АД). В этом случае СМЧД становится тесной двойной системой (ТДС). Двигаясь со сверхзвуковой скоростью, компаньон создает мощные ударные волны, которые распространяются по диску со сверхзвуковой скоростью и достигают истоков «джетов». Это может являться первопричиной инициирования вспышек в АЯГ [6]. Состояние ТДС является конечной фазой эволюции двойных СМЧД и обеспечивает их свойство как ярких АЯГ.

В представленной работе анализируются многочастотные данные блазара ОJ 287 с целью получения параметров двойной системы с использованием нового подхода при определении

параметров двойной системы из СМЧД ОJ 287. Найденные характеристики использованы для определения возможных изменений орбиты системы из-за гравитационного излучения. Регистрация гравитационных волн достаточно сложна ввиду слабости последних. На данный момент важным для регистрации гравитационных волн является создание гравитационных детекторов, работающих в требуемом диапазоне частот и имеющих необходимую чувствительность. В представленной работе получены оценки мощности ГВ, излучаемых объектом ОJ 287.

Наблюдения и обработка

Наблюдения на частоте 22.2 ГГц производились с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории. Использовалась радиометрическая система с диаграммной модуляцией. Так удавалось избежать присутствия в данных мешающего аномального спектра флуктуаций коэффициентов усиления усилителей, существенно искажающего результаты. Дополнительным преимуществом используемого способа приема было снижение уровня флуктуаций неоднородностей атмосферы, которые существенны на сантиметровых и особенно на миллиметровых длинах волн.

Антennaя температура от источника определялась как разность сигналов с выхода радиометра в двух положениях антennы, когда радиотелескоп устанавливался на источник поочередно, то одним, то другим приемными рупорами (on-on). Наблюдения каждого источника состояли из 5-20 таких измерений. Затем рассчитывалось среднее значение и вычислялась среднеквадратичная ошибка среднего. Параллельно с наблюдениями исследуемых объектов проводились наблюдения калибровочных источников DR 21, 3C 274, 3C 286, NGC 7027.

Антенные температуры от источников пересчитывались в плотности потоков с использованием зависимости:

$$S = \frac{2kT_a}{A_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где S – поток радиоисточника, k – постоянная Больцмана, T_a – антennaя температура от источника, $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь радиотелескопа.

Вариации эффективной площади антennы $A_{\text{эфф}}$ в зависимости от угла места h и азимута A_s определялись по данным наблюдений калибраторов. При данной методике наблюдений учитывались также ошибки, возникающие вследствие изменений уровня шумов аппаратуры, вариаций коэффициента поглощения в атмосфере, нестабильности коэффициента усиления радиометра и ошибки наведения радиотелескопа.

На частотах 8 и 14.5 ГГц длительный мониторинг выполнялся с помощью 26-м радиотелескопе РТ-26 обсерватории Мичиганского университета в период до 2012 г., базы данных которого были ранее опубликованы и использованы в работах [8–10]. С 2012 г. наблюдения на 8 ГГц проводились с помощью радиотелескопа РТ-22 в Симеизе. Данные на частоте 15 ГГц получены на 40-м радиотелескопе Owens Valley Radio Observatory [11] в период 2012–2020 гг.

Результаты

Данные длительного мониторинга блазара OJ 287 в радиодиапазоне приведены на рис. 1. По ним проведен гармонический анализ с помощью метода Шустера [10]. В табл. 1 в первой строке приведены результаты, усредненные по радиодиапазонам 8 ГГц, 14.5 + 15 ГГц, 22.2 ГГц. По этим данным выделяется период в 13.6 года. Его можно поставить в соответствие с прецессионными движениями центральной СМЧД и связанных с нею областей аккреционного диска. Прецессионный полупериод в 6.7 лет также выявляется гармоническим анализом. Более короткие периоды выделяются также на всех радиочастотах и равны 2.1 и 1.05 года соответственно. Их можно соотнести периоду обращения компаньона по орбите и его полупериоду. Последний связан с двойным пересечением АД компаньоном за один орбитальный период.

Таблица 1. Результаты гармонического анализа длительных рядов многочастотного мониторинга блазара OJ 287

Table 1. The results of harmonic analysis of long-term multifrequency monitoring of the blazar OJ 287

| | | | | |
|--|----------|------------|----------|------------|
| T (периоды в системе отсчета наблюдателя) | 13.6±1.3 | 6.7±0.7 | 2.1±0.2 | 1.06±0.1 |
| T _{(z = 0.86),γ} ² (периоды в системе источника) | 260±22 | 128.0±12.0 | 40.2±4.0 | 20.3.0±2.0 |

Примечание: В первой строке приведены данные гармонического анализа длительных рядов многочастотного мониторинга блазара OJ 287 усредненные за весь период наблюдений по всем частотам радиодиапазона. Во второй – результаты гармонического анализа данных с учетом z и γ .

Так как мы принимаем излучение от объекта из узкого конуса с углом между направлениями выброса («джета») и лучом зрения на наблюдателя θ , считая что $\gamma^2 \approx 1/9$ [12], то пересчет периодов в систему координат источника должен осуществляться по формуле [13]:

$$T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{набл}} \cdot \gamma^2}{1+z}. \quad (2)$$

Во второй строке табл. 1 даны периоды в системе координат, связанной с источником ($z = 0.306$) при значении гамма-фактора $\gamma = 5$. Вообще эта величина является параметром, не получаемым непосредственно из мониторинговых наблюдений. Существуют оценки, выполненные другими авторами. Так, в работе [14] приводится нижнее значение $\gamma = 4$. Принятая нами величина не противоречит этим оценкам.

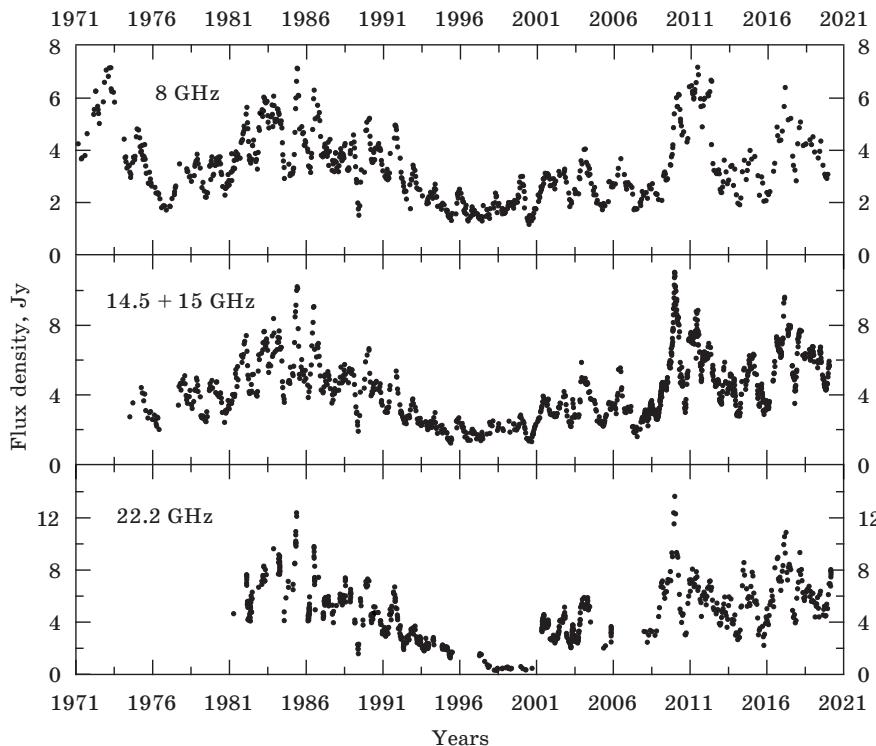


Рис. 1. Данные многочастотного мониторинга ОJ 287

Fig. 1. The data of the multi-frequency monitoring of OJ 287

В предложенной методике нахождения параметров ТДС ОJ 287 используется минимум предположений и допущений. Параметры ОJ 287 получены в результате применения формул небесной механики, основанных на законах Кеплера и наблюдательных данных [15]:

$$m = \frac{16\pi^2 \cdot r^2}{3G \cdot T_{\text{орб}} \cdot T_{\text{пп}}}, \quad (3)$$

$$M = 6\pi^2 \cdot r^2 \frac{0.75 \cdot T_{\text{пп}}}{3G \cdot T_{\text{орб}}^2 \cdot T_{\text{пп}}}, \quad (4)$$

где m – масса компаньона, M – масса центральной черной дыры, r – радиус орбиты компаньона, G – гравитационная постоянная.

В ТДС недопустимо произвольно менять соотношение масс компаньонов при найденных из наблюдений значениях орбитальных и прецессионных периодов, так как функция масс двойных СМЧД зависит от их отношения [6]:

$$\frac{M+m}{m} = \frac{0.75 \cdot T_{\text{пр}}}{T_{\text{орб}}}. \quad (5)$$

Таким образом, с использованием предложенной методики была построена модель источника OJ 287 в системе отсчета источника. В табл. 2 даны три варианта данных для размеров орбиты и масс компаньонов, рассчитанных в рамках модели для периодов, представленных во 2 строке табл. 1. Массы компаньонов с учетом $z \approx 0.306$ и $\gamma \approx 5$ для блазара OJ 287 рассчитаны по формулам (3, 4) для трех значений размеров радиусов орбиты r в системе источника.

Полученные массы компаньонов в первой строке табл. 2 выглядят явно завышенными. При такой массе в 31 миллиардов масс Солнца существенно превышается Эддингтоновский предел для светимости объекта. Сообщалось о массе в 17 миллиардов центральной СМЧД в блазаре OJ 287 [16, 17]. Считается, что это самая массивная двойная СМЧД из всех ярчайших АЯГ. Значения масс компаньонов, полученные во второй строке табл. 3, выглядят более реалистично. Масса центральной СМЧД в 13 миллиардов масс Солнца не противоречит указанной выше оценке. Масса компаньона всего втрое ниже и это является прямым следствием полученного отношения $T_{\text{пр}}/T_{\text{орб}}$ (формула 5).

Таблица 2. Значения масс компаньонов блазара OJ 287
для трех размеров орбиты компаньона

Table 2. The values of the companions masses of OJ 287
for the three sizes of the companion orbit

| Радиус орбиты компаньона | Масса компаньона | Масса центральной СМЧД | Время жизни, года |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| $6.0 \cdot 10^{17}$ см | $0.9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ | $3.0 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ | $7 \cdot 10^4$ |
| $4.5 \cdot 10^{17}$ см | $4.2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ | $1.3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ | $2.8 \cdot 10^5$ |
| $3.0 \cdot 10^{17}$ см | $1.2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ | $3.9 \cdot 10^9 M_{\odot}$ | $2.1 \cdot 10^6$ |

Дискуссия

Значения масс и размеров орбиты для блазара OJ 287, указанные в строке 2 табл. 2, свидетельствуют о том, что эта ТДС является очень массивной двойной системой среди известных

СМЧД. Соотношение масс компонентов $\mu_{\text{OJ 287}} \approx M/m \approx 3.1$. Для массивных звезд в Галактике ($M > 10 M_{\odot}$) отношение масс компаньонов стремиться к единице [18]. Полученное $\mu_{\text{OJ 287}}$ определяется отношением прецессионного и орбитального периодов (формула 5). Поэтому можно предположить, что сверх массивные компаньоны врачаются вокруг общего центра тяжести по практически круговым орбитам с радиусами $r_{\text{comp}} \approx 4.5 \cdot 10^{17}$ см и $r_{\text{центр}} \approx (r_{\text{comp}}) \cdot (m/M)^{1/2} \approx 2.5 \cdot 10^{17}$ см. Расстояние между компаньонами во время их движения вокруг общего центра тяжести равно $a \approx r_{\text{comp}} + r_{\text{центр}} = 7.0 \cdot 10^{17}$ см. При этом периоды вращения вокруг оси (из-за сильного гравитационного взаимодействия) и вокруг общего центра тяжести у более массивной СМЧД равны также орбитальному периоду компаньона.

В такой ситуации АД может быть общим для обоих компаньонов, и дальнейшая оценка размеров АД подтверждает это предположение. Оценку радиуса АД ОJ 287 можно сделать с использованием формулы прецессии центрального тела в двойной системе из СМЧД [19]:

$$T_{\text{пр}} \approx 10^6 \cdot \left(\frac{M+m}{10^9 M_{\odot}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{a}{10^{19}} \right)^3 \cdot \left(\frac{a_d}{10^{18}} \right)^{-3/2} \cdot \left(\frac{(1+q)^{1/2}}{q \cdot \text{Cos} \iota} \right) \text{ лет,} \quad (6)$$

где $q = 1/\mu$, $a = r_{\text{комп}} + r_{\text{центр}}$ – расстояние между компаньонами, a_d – радиус АД, ι – угол между плоскостями орбиты и АД. Формулу 6 преобразуется к виду, удобному для вычисления радиуса АД при известных значениях M , m , $T_{\text{пр}}$, q , a и ι :

$$a_d \approx 10^{22} \cdot \left(\frac{M+m}{10^9 M_{\odot}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{a}{10^{19}} \right)^2 \cdot \left(\frac{(1+q)^{1/3}}{T_{\text{пр}} \cdot q \cdot \text{Cos} \iota} \right)^{2/3} \text{ см.} \quad (7)$$

В результате получим радиус $a_d_{\text{OJ 287}} \approx 8 \cdot 10^{18}$ см ≈ 2.6 пк. Это значение является оценкой снизу размеров АД, так как $\text{Cos} \iota^{2/3} \leq 1$. В любом случае размеры АД на порядок больше величины орбиты компаньона. Таким образом, мы оказались правы считая, что АД является общим для двух СМЧД в ОJ 287.

Если принять полутолщину АД равной стандартному α -диску [20], то получим полутолщину диска $d_{\text{OJ 287}} \approx 0.07 \cdot a_d \approx 5.6 \cdot 10^{17}$ см, что несколько превышает даже размеры орбиты компаньона ($4.5 \cdot 10^{17}$ см), но меньше расстояния между компаньонами ($a \approx 7.0 \cdot 10^{17}$ см). Следствием такой толщины диска является продолжительность активной фаза вспышечных явлений в ОJ 287. По радиоданным длительности вспышек более полугода (рис. 1), что подтверждает полученные данные о толщине диска. Таким образом, все явления, связанные со вспышками в ОJ 287, про-

исходят в процессе сверхзвукового движения сверх массивных компаньонов внутри общего для обеих АД при любых к нему наклонах орбит. Это существенный результат, который получен из наблюдательных данных.

На основе полученных данных о радиусе орбиты (средняя строка табл. 2) и орбитальном периоде (строка 2 табл. 1) можно определить скорости движения компаньонов по орбите: $v_{OJ287}^{\text{комп}} \approx 2\pi r/T_{\text{орб}} \approx 2.0 \cdot 10^4$ км/с. Полученное значение совпадает с максимально зарегистрированной скоростью движения материи в молодых остатках сверхновых I типа. При этом скорость движения центральной СМЧД всего лишь в 1.8 раза меньше скорости движения компаньона $v_{OJ287}^{\text{центр}} \approx 1.1 \cdot 10^4$ км/с.

При таких скоростях компаньоны испытывают сильное динамическое трение о среду, теряя при этом орбитальные моменты и сближаясь друг с другом. Это существенно уменьшает расчетное время жизни системы до слияния. Потери энергии за счет динамического трения были рассмотрены нами для АЯГ ЗС 454.3, где было показано, что их мощность может составить $dE/dt_{\text{ЗС454.3}} \approx 6 \cdot 10^{47}$ эрг/с [7]. При этом была получена оценка плотности среды в пределах орбиты компаньона $n \approx 3 \cdot 10^9$ см⁻³. В первом приближении такие значения можно принять и для ОJ 287.

Имея полученные данные, можно перейти к расчету скорости потери энергии системы ОJ 287 за счет излучения гравитационных волн [21]:

$$\frac{dE}{dt_{OJ287}} = \frac{32 \cdot G^4 \cdot M^2 \cdot m^2 (M+m) \cdot \left(1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96} \right)}{5c^5 \cdot r^5 (1-e^2)^{7/2}} \approx 6.2 \cdot 10^{47} \text{ эрг/с.} \quad (8)$$

Полученное значение совпадает с приведенными ранее оценками мощности динамических потерь для близкого по параметрам АЯГ ЗС 454.3. Этот пример еще раз доказывает важность учета динамического трения в ТДС системах из СМЧД, которое приводит к дополнительному уменьшению времени жизни системы до слияния. Расчетное значение времени жизни системы до слияния за счет только излучения ГВ [22]:

$$t_{\text{merge}} = 5.8 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{r}{0.01 \text{ pc}} \right)^4 \cdot \left(\frac{10^8 M_o}{M} \right)^3 \cdot \frac{M^2 \cdot (1-e^2)^{7/2}}{m(M+m)}. \quad (9)$$

В случае принятых значений (табл. 2, строка 2) время жизни двойной системы ОJ 287 до слияния, рассчитанное по формуле (9) составляет всего $t_{\text{merge OJ 287}} \approx 2.8 \cdot 10^5$ лет. Для примера, время жизни ОJ 287 с параметрами, указанными в [5]

$t_{\text{merge OJ 287}} \approx 5.5 \cdot 10^3$ лет. Если принять значение эксцентриситета орбиты для ОJ 287 ($e = 0.7$), то время жизни системы уменьшается на порядок величины.

При взаимодействии компаньона с АД на сверхзвуковых скоростях мощнейшие ударные волны распространяются в плотной газово-пылевой среде АД. Доля энергии ударных волн, достигающая «джета» и перерабатываемая во вспышку, может составить 1–2 %, учитывая соотношение размеров орбиты и СМЧД. Направленное движение ударной волны преобразуется в хаотическое движение частиц, определяемое температурой плазмы $mv^2/2 = 3kT/2$. Для электронно-протонной плазмы $T \approx 2 \cdot 10^{10}$ К, что в четверо превышает уровень рождения электронно-позитронных (e - p) пар ($T \approx 5 \cdot 10^9$ К). В истоках «джета» магнитные и электрические поля разгоняют частицы до релятивистских скоростей, формируя «джеты», состоящие из электронно-протонной плазмы и e - p пар. Объемная плотность e - p пар определяется энергией ударных волн и плотностью газовой составляющей. При этом обеспечивается наблюдаемый высокий уровень активности блазара в широком диапазоне длин волн.

Из-за высоких скоростей движения компаньонов кинетическую энергию нужно рассчитывать по релятивистской формуле:

$$E_{\text{кин}} = m \cdot c^2 \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} - 1 \right). \quad (10)$$

Используя значения масс компаньонов ОJ 287 (средняя строка табл. 2) и скорости движения $v_{\text{OJ 287}} \approx 1.1 \cdot 10^4$ км/с, $v_{\text{OJ 287}} \approx 2.0 \cdot 10^4$ км/с, получим запас кинетической энергии компаньонов $E_{\text{кин}} = E_{\text{кин}}^M + E_{\text{кин}}^m \approx (4.3 \cdot 10^{61} + 4.1 \cdot 10^{61}) \approx 8.4 \cdot 10^{61}$ эрг. Эта энергия расходуется на гравитационное излучение и на преодоление динамического трения о плотную среду АД и аккрецирующую материю. Значительная часть энергии динамического трения преобразуется в широкополосное излучение от радио- до гамма диапазонов длин волн.

Для определения изменения орбиты компаньона за счет излучения ГВ и оценки возможности экспериментального определения этих изменений, определим скорость изменения орбиты [21]:

$$\frac{da}{dt} \approx 64G^3 M \cdot m \cdot (M+m) \cdot \frac{1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96}}{5c^5 \cdot r^3} \approx 1.2 \cdot 10^4 \text{ см/с}, \quad (11)$$

где G – гравитационная постоянная, M m – массы компаньонов (строка 2 табл. 2), $r = 4.5 \cdot 10^{17}$ см, $e = 0$. За один орби-

тальный период (строка 2 табл. 1) изменение орбиты равно $\Delta r \approx 2.0 \cdot 10^{13}$ см. Изменение орбитального периода составит $\Delta T_{\text{пер}} \approx 0.6$ суток. За 50 лет наблюдений объекта ($\Delta t \approx 23$ периода) изменение орбитального периода составит $\Delta T_{\text{набл}} \approx 13$ суток ≈ 0.03 года, что в 7 раз меньше ошибки определения периода (табл. 1) и точности определения времени вспышечного явления, длительность которого может составить много месяцев. Следовательно, определение изменений орбитального периода OJ 287 пока находится вне пределов наших экспериментальных возможностей.

Смещение перицентра орбиты компаньона можно найти с использованием стандартного выражения:

$$\Delta\phi = \frac{6\pi \cdot G \cdot M}{a \cdot (1 - e^2) c^2}, \quad (12)$$

где G – гравитационная постоянная, M – масса центрального тела, r – радиус орбиты компаньона, c – скорость света. Смещение перицентра за орбитальный период составит величину $\approx 5^\circ$. На расстоянии $r = 4.5 \cdot 10^{17}$ см это составит примерно $5 \cdot 10^{16}$ см, что близко к размерам компаньонов OJ 287, которые с каждым витком будут проходить по новым областям АД, что может способствовать сохранению устойчивости АД.

Интересно рассмотреть, как себя ведет акреция вещества на черную дыру при таких высоких скоростях движения СМЧД относительно акрецирующей на нее материи? Для этого проанализируем формулу акреции, где показано, как скорость влияет на темп акреции [23]:

$$\frac{dE}{dt_{\text{accr}}} \approx 2 \cdot 10^{33} \left(\frac{10^{-2} M}{M_o} \right)^{3/2} \cdot (10^{-1} v)^{-9/4} \cdot n^{1/2} \text{ эрг/с,} \quad (13)$$

где n – плотность акрецирующей материи, v – скорость движения черной дыры относительно «акрецирующего» на нее вещества. Формула показывает, что при прочих равных условиях энерговыделение при акреции катастрофически падает при увеличении скорости движения черной дыры относительно акрецирующей материи. В нашем случае при значениях $M \approx 1.3 \cdot 10^{10} M_o$, $n \approx 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ и $v \approx 2.0 \cdot 10^4 \text{ км/с}$, светимость за счет акреции на черную дыру равна $L \approx 4.5 \cdot 10^{42}$ эрг/с, что на 5 порядков меньше энерговыделения в системе и акрецию вообще можно не учитывать. Это лишний раз указывает в пользу того, что в ТДС из СМЧД первичное энерговыделение происходит не за счет акреции вещества на черную дыру. В нашей концепции это энерговыделение возникает за счет потери орбитальных моментов компаньонов, когда они

таранят АД. Именно только ТДС из СМЧД могут быть яркими АЯГ.

Если бы слияние в ОJ 287 произошло в настоящее время, то это был бы неизъяснимый подарок для гравитационных детекторов LIGO, VIRGO, LISA и др. Указанные детекторы эффективно работают на временных шкалах секунды и меньше. Двойные системы из СМЧД излучают ГВ на частотах 10^{-8} – 10^{-9} Гц. В этом случае для регистрации таких «растянутых» событий лучше всего подходят детекторы установки IPTA [24], работающие как раз в этом диапазоне частот.

Выводы

На основе методики расчета параметров орбит двойных СМЧД, использующей только данные многочастотного мониторинга в радиодиапазоне определены параметры ТДС из СМЧД ОJ 287, откуда следует, что эта одна из массивнейших систем среди ярчайших АЯГ.

Получены оценки размеров и толщины АД, показывающие, что компаньоны находятся внутри АД большую часть времени движения по орбитам. Такая ситуация требует учета влияния динамического трения на параметры орбит компаньонов для учета времени жизни до слияния системы.

Выполнены оценки уровня гравитационных волн, идущих от ОJ 287. Показано, что эта система из СМЧД является одним из самых мощных излучателей ГВ.

Расчетное время жизни ОJ 287 до слияния компонент показывает, что это короткоживущий объект во Вселенной.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-29-11027 (Л.Н.В.). В исследовании использованы данные программы мониторинга 40-метрового радиотелескопа OVRO, которая частично поддержана грантами NASA NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G и NSF, а также грантами AST-0808050 и AST-1109911.

Acknowledgments

The research is carried out with the financial support of the RFBR as a part of a scientific project 19-29-11027 (L.N.V.) in the part of the data analysis and the data reduction. The study uses data from the OVRO 40-meter radio telescope monitoring program, which is partially supported by NASA grants NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G and NSF, as well as grants AST-0808050 and AST-1109911.

Список литературы / References

1. Sillanpaa A., Haarala S., Valtonen M.J., Sundelius B., Byrd G.G. OJ 287 – Binary pair of supermassive black holes. *The Astrophysical Journal*. 1988;325(2):628–634. DOI: 10.1086/166033.
2. Burke-Spolaor S., Madison D.R., Taylor S.R., Charisi M., Dolch T., Hazboun J.S., Holgado A.M., Kelley L.Z., Lazio T.J. W., Simon J.J., McMann N., Mingarelli C.M.F., Rasskazov A., Siemens X., Smith T.L. The astrophysics of nanohertz gravitational waves. *Astronomy and Astrophysics Review*. 2019;27(1):5. DOI: 10.1007/s00159-019-0115-7.
3. Dev L., Gopakumar A., Valtonen M., et al. The Unique Blazar OJ 287 and Its Massive Binary Black Hole Central Engine. *Universe*. 2019;5(5):108. DOI: 10.3390/universe5050108.
4. Sun Yu-Taoab, Liu Jie-Yingab, Liu Jin-zhongab, Ai Yan-Liab, Zhou Mingab, Qiao Er-lin. A Research on the Gravitational Wave Radiation of OJ 287. *Chinese Astronomy & Astrophysics*. 2011;35(2):123–132. DOI: 10.1016/j.chinastron.2011.04.008.
5. Valtonen M.J., Lehto H.J. Outbursts in OJ287: A new test for the General Theory of Relativity. *The Astrophysical Journal*. 1997;481(1):L5–L7. DOI: 10.1086/310642.
6. Volvach A.E., Volvach L.N., Larionov M.G., Aller H.D., Aller M.F. The variability of a 3c 454.3 blazar over a 40-year period. *Astronomy Reports*. 2007;51(6):450–459. DOI: 10.1134/S1063772907060030.
7. Vol'vach A.E., Vol'vach L.N., Larionov M.G., Aller M.F., Aller H.D., Villata M., Raiteri K. M. Correlations between the development of a flare in the blazar 3c 454.3 in the radio and optical. *Astronomy Reports*. 2008;52(11):867–874. DOI: 10.1134/S1063772908110012.
8. Vol'vach A.E., Vol'vach L.N., Kut'kin A.M., Larionov M.G., Aller M.F., Aller H.D. Sub-parsec structure of binary supermassive black holes in active galactic nuclei. *Astronomy Reports*. 2010;54(1):28–37. DOI: 10.1134/S106377291001004X.
9. Vol'vach A.E., Vol'vach L.N., Pushkarev A.B., Kut'kin A.M., Larionov M.G., Villata M., et al. Multi-frequency studies of the non-stationary radiation of the blazar 3c 454.3. *Astronomy Reports*. 2011;55(7):608–615. DOI: 10.1134/S1063772911070092.
10. Vol'vach A.E., Vol'vach L.N., Kutkin A.M., Larionov M.G., Lahteenmaki A., Tornikoski M., et al. A prolonged flare in the blazar 3c 454.3. *Astronomy Reports*. 2013;57(1):46–51. DOI: 10.1134/S1063772912120098.
11. Richards J.L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V., et al. Blazars in the Fermi Era: The OVRO 40 m telescope monitoring program. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2011;194(2):29. DOI: 10.1088/0067-0049/194/2/29.
12. Vol'vach A.E., Larionov M.G., Kardashev N.S., Ldhteeemmdki A., Tornikoski M., Hovatta T., et al. A multi-frequency study of brightness variations of the blazar 0716+714. *Astronomy Reports*. 2009;53(9):777–784. DOI: 10.1134/S1063772909090017.

13. Rieger F. M. Supermassive binary black holes among cosmic gamma-ray sources. *Astrophysics and Space Science*. 2007;309(1-4):271–275. DOI: 10.1007/s10509-007-9467-y.
14. Teraesranta H., Valtaoja E. Brightness temperatures and viewing angles for extragalactic radio sources: a test of unification schemes for active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*. 1994;287:51.
15. Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф. Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн. Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020;3(1):5–23.
- Volvach A. E., Larionov M. G., Volvach L. N., Aller H. D., Aller M. F. Double supermassive black holes as possible sources of powerful gravitational wave radiation *Infocommunications and Radio Technologies*. 2020;3(1):5–23. (In Russ.)
16. Lehto H. J., Valtonen M. J. OJ 287 outburst structure and a binary black hole model. *The Astrophysical Journal*. 1996;460(1):207–213. DOI: 10.1086/176962.
17. Valtonen M. J. New Orbit Solutions for the Precessing Binary Black Hole Model of OJ 287. *The Astrophysical Journal*. 2007;659(2):1074–1081. DOI: 10.1086/512801.
18. Chini R., Hoffmeister V. H., Nasseri A., Stahl O., Zinnecker H. A Spectroscopic survey on the multiplicity of high-mass stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012;424(3):1925–1929. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21317.x.
19. Dunn R. J. H., Fabian A. C., Sanders J. S. Precession of the supermassive black hole in NGC 1275 (3C 84)? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006;366(3):758–766. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.09928.x.
20. Suleimanov V. F., Lipunova G. V., Shakura N. I. The thickness of accretion α -disks: Theory and observations. *Astronomy Reports*. 2007;51(7):549–562. DOI: 10.1134/S1063772907070049.
21. Peters P. C. Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses. *Physical Review B*. 1964;136(4B):1224. DOI: 10.1103/PhysRev.136.B1224.
22. Rodriguez C., Taylor G. B., Zavala R. T., Peck A. B., Pollack L. K., Romani R. W. A Compact Supermassive Binary Black Hole System. *The Astrophysical Journal*. 2006;646(1):49–60. DOI: 10.1086/504825.
23. Shvartsman V. F. Magnetic control of accretion onto a black hole flow deceleration at R_{sh} . *Soviet Astronomy*. 1971;15:342.
24. Manchester R. N. The Parkes Pulsar Timing Array. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*. 2006;6(S2):139–147. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1009-9271/6/S2/27/pdf>

Информация об авторах

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (пгт. Научный, Крым, Россия).

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (пгт. Научный, Крым, Россия).

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (Москва, Россия).

Information about the authors

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS” (Nauchni, Crimea, Russia).

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS” (Nauchni, Crimea, Russia).

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS (Moscow, Russia).

Поступила / Received: 15.12.2020

Принята в печать / Accepted: 30.12.2020

Publication Requirements for Articles Submitted to “Ural Radio Engineering Journal”

The journal accepts for publication authors' original articles in Russian and English which correspond to the subject of the Ural Radio Engineering Journal.

The submitted papers should not be published in other scientific journals in parallel.

All papers are submitted over automated editorial media on the website of the journal (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) or via email (urejournal@gmail.com). A paper is considered being submitted if a reply message with confirmation is received.

A paper is submitted in formats readable by MS Word. The final paper length should be between 8 to 30 pages (including references).

The text file of the paper should start with the information about the authors: complete name, affiliation (place of work, study, etc.), postal address for journal delivery, e-mail address, and phone numbers.

The text file of the paper should contain a required number of UDC classification codes, abstract, key words and the text of the article in Russian or English. The style of the paper should be scientific and meet the requirements of anonymization.

Paper Title

The paper title should be informative and concise. Only commonly accepted abbreviations should be used.

Abstract

Abstract functions as an autonomous source of information. It should be informative, intelligent, brief and structured. If the paper is published in Russian the English abstract should be more extensive (and differs from the Russian one).

Abstract may start with the phrases: *This paper focuses on...*, *This paper aims at explaining...*, *Our paper is concerned with...* and etc.

Abstract in English represents the main content of the paper and its conclusions. The abstract structure as in the paper is welcomed:

Introduction, Target and Research Questions, Methodology, Results and Conclusion. The results of the research are described accurately and informatively. The conclusion may include recommendations, assessments and proposals from the article.

The text of the abstract should be laconic and concrete, deprived of peripheral issues, extra parenthetical words and general enunciations.

Keywords

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

Mathematical Formulas

All mathematical formulas in the paper should be unified. MathType, import from MatLab or analogous editable mathematical package are recommended.

Tables

All tables should have titles and a legend explaining any included abbreviations.

Figures

All figures should be prepared in the raster formats JPEG, TIFF with the resolution not less than 600 dpi. Lowercase letters (a, b и т.д.) are used for the identification of different parts of the figure. Symbols used for marking and heading the figures should be identical with their inscription in the paper.

Files with figures are duplicated in a separate folder. The number of the figure in the paper is the name of the file.

Figures, graphics and etc. in MS Excel should also be sent in Excel files.

Acknowledgements

Acknowledgements should be as short as possible. All grants required references should be listed. The full titles of financing organizations should be listed.

References

The list of the references should be given at the end of the paper. References are numbered in brackets by order of appearance in the document (e.g. [1; 2]).

References should include only articles quoted in the paper and already published or accepted for publication. Articles published in the Internet should be quoted with Digital Object Identifier (DOI).

References in the paper in Russian are also provided in English. Titles of the resources in Russian are provided transliterated and translated.

Author Credentials

Information about the authors is at the end of the article: full name, academic degree, position, place of work, e-mail, postal address. All is in two languages.

Plagiarism

Plagiarism in any form is a serious violation of the main principles of science and therefore is unacceptable.

Inadmissible:

1. Copying of parts of papers of other authors word for word without putting them between quotation marks in accordance to the rules of scientific citation.
 2. Use of particularly unique term taken from science literature without its author's or source's indication.
 3. Paraphrasing, abridgment or changing of ideas of other authors without their name indication.
 4. Pseudo citation: the material doesn't apply to the source it is taken from.
 5. Falsified data — data which is falsified or changed in laboratory or during an experiment (it is not practically a plagiarism though it is obvious academic fraud).
 6. Unconfirmed co-authorship or co-operation: the contribution of every author or co-author should be absolutely defined.
 7. Self-plagiarism/republication: presentation of one and the same or similar paper for two or more submissions concurrently.
- Editorial board reserves the right to return a paper to the author if the paper doesn't meet the requirements. No explanation is given. The information about the reviewers can't be disclosed to the authors or the third person party.

Требования к статьям, публикуемым в журнале Ural Radio Engineering Journal

Журнал принимает к публикации оригинальные авторские статьи на русском и английском языке, соответствующие тематике. Присланные на рассмотрение и рецензирование статьи не должны одновременно печататься в другом научном журнале.

Все статьи принимаются через автоматизированную редакционную среду на сайте журнала (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) или по электронной почте (urj@urfu.ru). Статья считается принятой в случае получения ответного сообщения/письма с подтверждением.

Статья принимается в форматах, читаемых MS Word. Объем статьи должен составлять от 0.5 до 1.5 авт. л.

Текстовый файл статьи следует начинать с информации об авторах: имена, аффилиация (место работы, учебы и др.), почтовый адрес для пересылки журнала, адрес электронной почты, номера контактных телефонов для связи.

В текстовом файле должны быть приведены: необходимое количество кодов классификации УДК, аннотация, ключевые слова и непосредственно текст статьи — **на русском или английском языках**. Изложение текста в статье должно отвечать научной стилистике и требованиям анонимизации.

Заглавие статьи

Заглавие научной статьи должно быть информативным и кратким. Можно использовать только общепринятые сокращения.

Аннотация

Аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации, она должна быть информативной, содержательной, компактной и структурированной. В случае публикации статьи на русском языке английский вариант аннотации должен быть более развернутым (он может отличаться от русского). Аннотация может начинаться со слов: „This paper focuses on...“, „This paper aims at explaining...“, „Our paper is concerned with...“ и т. п.

Аннотация на английском языке должна отражать основное содержание статьи и ее выводы. Приветствуется построение аннотации, повторяющее структуру статьи, включая введение, цели и задачи, методологию исследования, результаты, заключение. Результаты работы описываются предельно точно и ин-

формативно. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, приведенными в статье.

Текст аннотации должен быть лаконичен и конкретен, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих формулировок.

Ключевые слова

От 3 до 8 слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

Математические формулы

Все математические формулы в тексте должны быть набраны единообразно. Рекомендуется использовать MathType, импорт из MatLab или аналогичных математических пакетов с возможностью редактирования.

Таблицы

Все таблицы должны иметь заглавие и легенду, объясняющую любые упомянутые в них сокращения.

Рисунки

Все иллюстрации должны быть подготовлены в растровом формате JPEG, TIFF, разрешение не менее 600 dpi. Для идентификации частей иллюстрации следует использовать строчные буквы (*a*, *b* и т. д.). Начертание символов, используемых для обозначений на рисунках и в подписях к ним, должно совпадать с их написанием в тексте статьи.

Файлы с рисунками дублируются в отдельной папке. В названиях файлов должны быть указаны номера иллюстраций в тексте статьи.

Иллюстрации, графики и пр., выполненные в MS Excel, необходимо дополнительно выслать в виде файла Excel.

Благодарности

Благодарности должны быть как можно более краткими. Следует указать все гранты, в правилах которых требуется упоминание. Названия финансирующих организаций нужно писать целиком.

Список литературы

В тексте и в сносках ссылки на источники должны приводиться в [квадратных скобках], нумерация сквозная. Описание всех ссылок дается в списке литературы в конце статьи.

Список литературы должен включать только те работы, которые цитируются в тексте и которые были опубликованы или

приняты к публикации. Статьи, опубликованные в интернете и не прошедшие в печать, должны цитироваться с использованием цифрового идентификатора объекта (Digital Object Identifier (DOI)). При наличии DOI также может быть добавлен и к опубликованным материалам из списка литературы.

Для статьи на русском языке список литературы приводится также и на английском, при этом названия русскоязычных источников представляются как в транслитерации, так и в переводе.

Информация об авторах

В конце статьи приводится информация об авторах: ФИО, научная степень, должность, место работы, e-mail, почтовый адрес — также на двух языках.

Плагиат

Плагиат в любой форме представляет собой серьезное нарушение одного из самых основных принципов науки и не может быть приемлем.

Недопустимы:

1. Копирование слово в слово частей чужой работы без заключения скопированного отрывка в кавычки и указания источника в соответствии с правилами научного цитирования.
2. Использование особо уникального термина или понятия, найденного при чтении литературы, без указания автора или источника.
3. Перефразирование или сокращенная, измененная формулировка чужой идеи без указания того, чей труд был взят за основу.
4. Ложное цитирование: материал не должен быть отнесен к источнику, из которого он не был получен.
5. Ложные данные — данные, которые были сфабрикованы или изменены в лаборатории или в процессе эксперимента (хотя и не являются буквально плагиатом, тем не менее представляют собой явное академическое мошенничество).
6. Неподтвержденное соавторство или сотрудничество: вклад каждого автора или соавтора должен быть совершенно определенным.
7. Самоплагиат/вторичная публикация: представление одной и той же или похожей до степени сродства статьи для двух или более публикаций одновременно.

Редакция оставляет за собой право на возвращение авторам любой рукописи, которая, по их мнению, не подходит для публикации, без объяснения причин. Ни при каких обстоятельствах личность рецензентов и референтов по отдельным статьям не может быть раскрыта авторам или третьей стороне.

Publication Ethics

General

The editorial board of the journal “Ural Radio Engineering Jornal” honors the ethical criteria established for international scholarly publications, like integrity, confidentiality, transparency, conflict of interests and other aspects. We are guided by recommendations of the Committee on Publication Ethics. Being a member of Association of Science Editors and Publishers (ASEP), we adhere to the basic ethical principles manifested in the ASEP Declaration.

- The editorial board grants that all materials submitted for publication will be peer reviewed and accepted based on the principles of editorial independence and unbiased judgment.
- The editorial board is responsible for the quality of published scientific papers and supports the initiatives aimed at prevention of misconduct or unethical actions on the part of the authors or reviewers.
- Ethical rules are accepted as a must for all parties of the scholar publications: authors, reviewers, editorial board members, as well as persons and entities interested in the information disseminated by the Journal.
- Materials submitted to the editorial board are not returned to the authors. The authors will receive no remuneration (royalties) for the published materials. All scientific papers are published on free of charge basis.
- The editorial board adheres to the COPE ethical criteria, such as:
 - impartiality;
 - observance of scientific ethics when reviewing the papers, encouragement of scholarly discussions between the authors and reviewers;
 - assistance to protection of intellectual property and copyright;
 - papers will be rejected in case of plagiarism when another’s publications, words, or ideas are used without attribution to the original source, which is to be identified by the plagiarism detection software Antiplagiat;

- confidentiality (non-disclosure of the authors' and the reviewers' personal information and other information obtained within the professional interaction);
- making editorial correction in papers by agreement with authors.

Responsibilities and ethics of editors

The editorial board should:

- strive to meet the needs of readers and authors;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- preclude commercial needs from compromising intellectual standards;
- always be willing to publish corrections, clarifications, retractions and apologies, if required.

Author's responsibilities and ethics

The author shall cooperate with the editorial board throughout the publication process by introducing appropriate corrections, if required. The author is fully responsible for any plagiarisms in the text, illustrations or other materials.

The manuscripts submitted to the Journal's editorial staff should comply with the research paper manuscript formatting rules stated on the Journal web site.

The author is not entitled to submit the same paper for several scientific publications. The authors are obliged to observe the following ethical principles:

- compliance of the materials with the ethics and legal standards including copyright protection laws (in particular, the materials protected by the copyright including tables, digits or long quotations can be reproduced only by the owner's permission);
- research originality and scientific novelty;
- researchers should use best endeavors to describe the work performance methodology clear and definitely in such way that their results can be approved by other researchers, if required;
- impartial discussion of the research importance;
- acknowledgement of other persons' contributions, mandatory references to the deliberations used for the benefit of submitted materials;

- presentation of all major contributors to the research as coauthors;
- informing about significant errors or inaccuracies, if any, found in the publication and interacting with the editorial staff with the purpose of the quickest error correction or removal of the publication;
- no adoptions without proper references to primary sources (plagiarism).

The authors are fully responsible for reliability of the information contained in the submitted materials, for compliance of the materials with the statutory regulations, the moral rules and the ethics standards.

Responsibilities and ethics of authors

According to the Journal policy the editorial board establishes the review procedures for the materials to be published. In the process of reviewing the manuscripts the information about the authors and the reviewers will be held in confidence. Disclosures in breach of the confidence are allowed only in case of suspected deception or falsification on the part of the authors or the reviewers. Reviewers are not entitled to use the reviewed manuscripts for personal purposes or provide these manuscripts to third parties without prior permission of senior editors. They are obliged to return or delete the manuscript copy after presenting the review. The manuscripts rejected by the editorial board are not preserved. The reviewer remarks are not published or made public otherwise without permission of the reviewer, the manuscript author or the editor. Reviewers shall provide fair and unbiased judgment of the manuscript, giving clearly and well-grounded comments to appraise the paper's scientific content only. Personal criticism of the author is unacceptable. The reviewers are obliged to be guided by the following ethical principles:

- to review only those manuscripts which the reviewer has sufficient knowledge to judge;
- to prepare a review in time based on the constructive approach;
- to maintain confidentiality;
- to be impartial preparing a review;
- to inform the editor in case the materials have been published earlier in this or another publication;
- to inform the editor and, if required, to pass the manuscript to another reviewer in case of potential conflict of interests (existing of financial, organizational or other relations between the reviewer and the author);

- the review contents should not be influenced by the manuscript origin, the authors' nationality, sex, religion or political commitments;
- not to use the information obtained within the reviewing process for the personal purposes and in the interests of other persons.

Privacy

E-mail addresses intimated by the authors will be used exclusively for communication with the authors and referees and shall not be disclosed to other persons or entities.

Disclosure and conflict of interest policy

Referees deemed to have conflicts of interest in view of personal, financial or organization benefits, as well as competition with any submitting authors (companies, organizations) will not be appointed to review the manuscripts in question.

Публикационная этика

Общие положения

- Редакция журнала *Ural Radio Engineering Jornal* руководствуется в своей работе международными этическими правилами научных публикаций, в основе которых лежит порядочность, конфиденциальность, надзор за публикациями, разрешение возможных конфликтов интересов и др. В своей деятельности редакция следует рекомендациям Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics), опирается на принципы публикационной этики, принятые Декларацией АНРИ.
- Редакция гарантирует рассмотрение всех представленных к публикации материалов, соблюдение редакторской независимости и добросовестности, принятие объективных решений.
- Редакция несет ответственность за качество опубликованных научных статей и поддерживает инициативы, направленные на снижение числа некорректных действий со стороны авторов и рецензентов и нарушений норм этики.
- Этическим правилам журнала должны следовать все участники процесса публикации результатов научных исследований: авторы, рецензенты, члены редакционной коллегии, сотрудники редакции, а также лица и организации, заинтересованные в информации, представляющей журналом.
- Материалы, направляемые в редакцию журнала, авторам не возвращаются. Вознаграждение (гонорар) за опубликованные материалы не выплачивается. Все научные статьи публикуются в журнале на безвозмездной основе.
- Редакция журнала руководствуется такими этическими принципами COPE, как:
 - беспристрастность;
 - соблюдение научной этики при рецензировании статей, поощрение научной дискуссии между авторами и рецензентами;
 - содействие защите интеллектуальной собственности и авторских прав;

- отклонение рукописи статьи при выявлении плагиата — опубликованных ранее материалов других авторов без ссылки на первоисточники; проверка осуществляется с помощью системы «Антиплагиат»;
- конфиденциальность (неразглашение персональных данных авторов и рецензентов и прочей информации, полученной в ходе профессионального взаимодействия);
- внесение в статью редакционных правок после согласования с авторами.

Ответственность и этические принципы сотрудников редакции

Редакция журнала:

- обеспечивает выполнение запросов читателей и авторов;
- предпринимает необходимые меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов;
- гарантирует свободу выражения мнений всем членам научного сообщества;
- не допускает превалирования коммерческих соображений над интеллектуальными критериями;
- по мере необходимости обеспечивает публикацию поправок, разъяснений, опровержений и извинений.

Ответственность и этические принципы авторов

На протяжении всего процесса публикации автор обязан сотрудничать с редакцией журнала, исправляя статью в случае необходимости.

Автор полностью берет на себя ответственность за возможный плагиат текста, рисунков и других заимствованных материалов.

Рукописи, предоставляемые на рассмотрение в редакцию журнала, должны соответствовать правилам оформления рукописи научной статьи, представленным на сайте журнала.

Автор не имеет права представлять одну статью на публикацию в несколько научных изданий.

Авторам необходимо придерживаться следующих этических принципов:

- соответствие материалов этическим и юридическим нормам, в т. ч. законодательству о защите авторских прав (в частности, материалы, защищенные авторским правом, в т. ч. таблицы, цифры или крупные цитаты, могут воспроизводиться только с разрешения их владельцев);
- оригинальность и научная новизна исследований;

- достоверность полученных результатов;
- четкость в описании методологии выполнения работ, чтобы их результаты могли быть подтверждены при необходимости другими исследователями;
- объективное обсуждение значимости исследований;
- признание вклада других лиц, обязательное наличие библиографических ссылок на использованные работы;
- представление в качестве соавторов всех участников, внесших существенный вклад в исследование;
- информирование об обнаружении ошибок или неточностей в публикации и взаимодействие с редакцией с целью скончального исправления ошибок или изъятия публикации;
- отсутствие в статье заимствований без ссылок на первоисточники (плагиата).

Авторы несут всю ответственность за достоверность информации, содержащейся в представляемых материалах, за соответствие материалов нормам законодательства, морали и этики.

Ответственность и этические принципы рецензентов

В соответствии с политикой журнала редакция устанавливает процедуру проведения рецензирования представленных к опубликованию материалов.

При рецензировании рукописей обеспечивается конфиденциальность информации об авторах и о рецензентах. Нарушение конфиденциальности допускается только при подозрении фальсификации со стороны авторов либо рецензентов.

Рецензенты не имеют права использовать полученные рукописи в личных целях или предоставлять их другим лицам без разрешения ответственного члена редколлегии. Замечания рецензентов не публикуются и не обнародуются иным образом без разрешения рецензента, авторов рукописи и редактора.

Рецензенты должны давать честную и объективную оценку рукописи, четко и аргументированно формулировать свои замечания, оценивая исключительно научное содержание статьи. Неприемлема критика личности автора.

Рецензент обязан руководствоваться следующими этическими принципами:

- осуществлять рецензирование только тех рукописей, для оценки которых он обладает достаточными знаниями;
- готовить рецензию своевременно на основе конструктивного подхода;
- соблюдать конфиденциальность;

- при составлении рецензии быть объективным;
- предупредить редактора о материалах, опубликованных ранее в данном или другом издании, при их наличии;
- предупредить редактора и, если необходимо, передать статью другому рецензенту в случае потенциального конфликта интересов (финансовых, организационных или других отношений между рецензентом и автором);
- не использовать информацию, полученную при рецензировании, в личных целях или интересах иных лиц.

На содержание рецензии не должно оказывать влияние происхождение рукописи, национальность, пол, религиозные или политические убеждения авторов.

Приватность

Представленные авторами имена и адреса электронной почты используются исключительно в деловых целях (для контакта с авторами или с рецензентами при подготовке статьи к публикации) и не могут быть предоставлены другим лицам и организациям.

Политика раскрытия и конфликты интересов

При наличии конфликтов интересов вследствие личной, финансовой или организационной заинтересованности, а также конкурентных отношений с любыми авторами (компаниями, организациями), представляющими рукопись, рецензенты не участвуют в ее рассмотрении.

Правила оформления статьи

Article Submission Guidelines

УДК 000.000

Название статьи

И.О. Фамилия автора¹

¹ Место работы, город, страна

e-mail

Аннотация

Аннотация должна содержать не более 300 слов и представлять основную идею статьи.

Ключевые слова

От трех до восьми слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

Paper Title

Author Name¹

Author Affiliation, City, Country

e-mail address

Abstract

The abstract should contain no more than 300 words and represent the main idea of the article.

Keywords

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

Введение (Introduction)

Во введении необходимо представить основную идею работы, описать исследования, которые были проведены. И дать понять читателю, о чем пойдет речь в основной части статьи.

Introduction contains the main idea of the article and the description of the completed research. Introduction outlines the concept of the main part of the paper.

Заголовок 1 (Heading 1)

Рисунки должны иметь подписи на русском и английском языке.



Рис. 1. Название рисунка
Fig. 1. Example of a figure caption

Figure captions should be below the figures; table heads should appear above the tables. Insert figures and tables after they are cited in the text. Use the abbreviation “Fig. 1”, even at the beginning of a sentence.

Заголовок 2 (Heading 2)

Название таблицы указывается на русском и английском языках. В конце таблицы необходимо указать источник, в противном случае вы являетесь автором таблицы.

Table heads are in Russian and English. The source of the table is indicated after the table, otherwise you are the author of the table.

Таблица 1. Заголовок таблицы

Table 1. Table head

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Source/источник:

Заголовок 3 (Heading 3)

Формулы должны быть набраны шрифтами Times New Roman и/или Symbol. Нельзя использовать встроенный редактор формул редактора Word версий 2010 и выше, так как он использует нестандартный математический шрифт. Используйте простой набор математических выражений в строку или редакторы MathType или MS Equation. Для создания много-

уровневых формул используйте редакторы формул MathType или MS Equation.

Нумеруйте формулы последовательно. Нумерация выполняется с выравниванием по правому краю.

Названия переменных: латинские буквы наклонные, русские буквы прямые: $U_{\text{ном}}$. Названия функций и операторы: прямые латинские буквы: $pi = di/dt$. Греческие буквы всегда прямые.

Помните, что формулы включаются в текст с использованием знаков препинания, например, следующая за этим текстом формула должна завершиться точкой, так как это будет конец предложения:

$$a + b = \gamma. \quad (1)$$

Удостоверьтесь, что все переменные, используемые в формуле, были определены до или сразу после формулы. Ссылаясь на формулу, пишите «... в (1)...», но не «... в уравнении (1)...», за исключением начала предложения: «Уравнение (1)...».

Несколько распространенных ошибок

- Не используйте букву «о» вместо «0» (нуля), и наоборот: « μ_0 », но не « μ_o ».
- Все греческие буквы в формулах должны быть прямые, хотя по умолчанию редакторы формул считают иначе.
- Запятые, точки и т. д. ставятся вплотную к словам, после этих знаков обязательно ставится пробел: «Запятые, точки...», но не «Запятые ,точки..»
- Тире ставится одновременным нажатием клавиш ALT + SHIFT + «–» (на дополнительной цифровой клавиатуре). Не используйте дефис, или короткое тире, или минус вместо тире.

The equations are an exception to the prescribed specifications of this template. You will need to determine whether or not your equation should be typed using either the Times New Roman or the Symbol font (please no other font). To create multileveled equations, it may be necessary to treat the equation as a graphic and insert it into the text after your paper is styled.

Number equations consecutively. Equation numbers, within parentheses, are to position flush right, as in (1), using a right tab stop.

To make your equations more compact, you may use the solidus (/), the exp function, or appropriate exponents. Italicize Roman

symbols for quantities and variables, but not Greek symbols. Use a long dash rather than a hyphen for a minus sign. Punctuate equations with commas or periods when they are part of a sentence, as in

$$\alpha + \beta = \phi. \quad (1)$$

Note that the equation is centered using a center tab stop. Be sure that the symbols in your equation have been defined before or immediately following the equation. Use “(1),” not “Eq. (1)” or “equation (1),” except at the beginning of a sentence: “Equation (1) is ...”

Some Common Mistakes

- The word “data” is plural, not singular.
- The subscript for the permeability of vacuum m_0 , and other common scientific constants, is zero with subscript formatting, not a lowercase letter “o”.
- In American English, commas, semi-/colons, periods, question and exclamation marks are located within quotation marks only when a complete thought or name is cited, such as a title or full quotation. When quotation marks are used, instead of a bold or italic typeface, to highlight a word or phrase, punctuation should appear outside of the quotation marks. A parenthetical phrase or statement at the end of a sentence is punctuated outside of the closing parenthesis (like this). (A parenthetical sentence is punctuated within the parentheses.)
- A graph within a graph is an “inset,” not an “insert.” The word alternatively is preferred to the word “alternately” (unless you really mean something that alternates).
- Do not use the word “essentially” to mean “approximately” or “effectively”.
- In your paper title, if the words “that uses” can accurately replace the word using, capitalize the “u”; if not, keep using lower-cased.
- Be aware of the different meanings of the homophones “affect” and “effect,” “complement” and “compliment,” “discreet” and “discrete,” “principal” and “principle”.
- Do not confuse “imply” and “infer”.
- The prefix “non” is not a word; it should be joined to the word it modifies, usually without a hyphen.
- There is no period after the “et” in the Latin abbreviation “et al.”.

- The abbreviation “i. e.” means “that is,” and the abbreviation “e. g.” means “for example”.

Заключение (Conclusion)

В заключении должны быть сформулированы основные выводы по работе.

Conclusion contains the main outputs of the research/paper.

Благодарности (Acknowledgment)

Здесь можно расположить благодарности, в том числе указать гранты и другие виды спонсорства, которые способствовали проведению исследований по теме публикации.

Here you can place the *gratitude*, including grants and other types of sponsorship that contributed to the research on the topic of publication.

The preferred spelling of the word “acknowledgment” in America is without an “e” after the “g.” Avoid the stilted expression “one of us (R. B. G.) thanks ...”. Instead, try “R. B. G. thanks...”. Put sponsor acknowledgments in the unnumbered footnote on the first page.

Список литературы/References

Библиографический список нумеруется. При цитировании номер ссылки включается в текст в квадратных скобках. Помните, что знаки препинания следуют после скобки: [1]. Ссылка делается без пояснений вида «... в статье [3]...», за исключением случая, когда она стоит в начале предложения: «Статья [4] содержит...»

The Reference list is numbered. When quoting, the reference number is included in the text in square brackets. Note that punctuation marks come before the parentheses [1]. The reference is made without explanation (“... in the article/paper [3]...”), except when it is at the beginning of a sentence: “The article/paper [4] ...”.

Информация об авторе

Фамилия Имя Отчество, научная степень, должность, место работы, e-mail, город, страна.

Information about the author

Full name, academic degree, position, place of work, e-mail, City, Country.

URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL

2020, Vol. 4, No. 4

Founded by Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19, Mira st., 620002, Ekaterinburg, Russia

Journal Registration Certificate
PI № FS77-69790 as of 18.05.2017

Adress of Journal
Office 129a, Mira st.,
620002, Ekaterinburg, Russia
Phone: +7 343 375-97-02
E-mail: urj@urfu.ru
Website: <https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Format 70x100 1/16. Circulation 500 cop.

Publisher — Ural Federal University
Publishing Center
4, Turgenev st., 620083 Ekaterinburg, Russia
Phone: +7 343 358-93-06, +7 343 350-58-20, +7 343 350-90-13
Fax: +7 343 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

Price is free

УРАЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2020, Т. 4, № 4

Учредитель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ответственный за выпуск Н.В. Папуловская
Редактор Е.Е. Крамаревская
Переводчик А.Г. Ковалева
Верстка Т.А. Лоскутовой
Дизайн обложки А.А. Кобелев

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-69790 от 18.05.2017

Включен в Объединенный каталог «Пресса России».
Индекс 33049

Адрес редакции:

Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32, оф. 129а
Тел.: +7 (343) 375-97-02
E-mail: urj@urfu.ru
<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Формат 70x100 1/16. Тираж 500 экз. Уч.-изд. л. 4,75.
Дата выхода в свет 20.01.2021. Заказ 326.

Отпечатано в типографии
Издательско-полиграфического центра УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

Цена свободная



URAL JOURNAL
RADIO ENGINEERING