

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан
в 1997 году*

**Серия Г
Технические
науки**

4/2019

Редакционная коллегия журнала
«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Белоусов**

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**

Ответственный секретарь – **И.А. Третьяков**

Члены редколлегии: д-р техн. наук, доц. **Н.И. Болонov**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Коренев**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин** (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация); канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; канд. техн. наук **Т.В. Ермоленко**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; канд. техн. наук **Т.В. Шарий**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; д-р техн. наук, проф. **Ф.В. Недопекин**; д-р техн. наук, проф. **С.М. Сафьянц**; д-р физ.-мат. наук, д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин** (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация); д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, проф. **Е.В. Горохов**; председатель Госкомэкополитики при Главе ДНР **Р.В. Кишкань**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; д-р техн. наук, ст. науч. сотр. **А.П. Симоненко**; д-р архитектуры, доц. **Н.В. Шолух**.

The Editorial Board of the journal
“Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical science”

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Belousov**

The Deputy of the Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**

Assistant Editor – **I.A. Tretiakov**

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., docent **N.I. Bolonov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., docent **V.D. Korenev**; Cand. of tech., senior researcher **A.A. Kurushin** (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russian Federation); Cand. of tech., docent **I.A. Molokovskiy**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslyon**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Cand. of tech. **T.V. Ermolenko**; Dr. of tech., prof. **M.N. Cheptsov**; Cand. of tech. **T.V. Sharii**; Cand. of tech., docent **S.V. Gridin**; Dr. of tech., prof. **F.V. Nedopekin**; Dr. of tech., prof. **S.M. Safyants**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin** (Belgorod State National Research University, Russian Federation); Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskiy**; Dr. of tech., prof. **E.V. Gorokhov**; Chairman of the State Committee on Ecological Policy at the Head of the DPR **R.V. Kishkan**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; Dr. of tech., senior researcher **A.P. Simonenko**; Dr. of arch., docent **N.V. Sholukh**.

Адрес редакции: ГОУ ВПО «ДонНУ», ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): <http://elibrary.ru/titles.asp?sortorder=0&titlename=2663-4228>

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол №10 от 24.12.2019 г.*

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Номер посвящён 110-летию со дня рождения выдающегося учёного, члена-корреспондента АН УССР, профессора, доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники Ивана Лукича Повха

Серия Г: Технические науки

№ 4

Донецк 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Пометун Е.Д. Алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометров постоянного тока и постоянной температуры 3

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Сметанников А.Д., Бережной М.Г., Теплинский С.В. Лазерный гравёр на базе Arduino 11
Курушин А.А. Расчет многопортовой антенны 16

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Бабичева М.В., Бааджи А.В. Методы определения местоположения общественного транспорта в городе Донецке для транспортного мобильного приложения 25
Корнев А.Л., Мухарский Д.В. Информационная система для измерительных комплексов и интернета вещей 30
Данилов В.В., Тимченко В.И., Третьяков И.А., Гмыря В.А. Оптические информационные технологии. Особенности прохождения плоской электромагнитной волны через передающие среды 36
Бабичева М.В., Юрченко А.С. Алгоритм обработки изображений отпечатков пальцев для автоматизированных систем биометрической аутентификации 44

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Сторожев С.В., Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг Нечетко-множественная методика оценивания некоторых характеристик функционирования центробежно-струйных форсунок в технических системах термостабилизации 50

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Зибольд А.Ф. Особенности возникновения Тейлоровских и волнистых вихрей при МГД-вращении 67
Симоненко А.П., Асланов П.В., Золотарёва И.А., Гучмазова Т.К. О связи снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения с проявлением жидкокристаллических свойств в растворах МПАВ 73

Повх Иван Лукич – Учитель, Ученый, Человек 81

Правила для авторов 83

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Number dedicated to the 110th birthday of the outstanding scientist, corresponding member of the Academy of Sciences of the USSR, professor, doctor of technical sciences, honored worker of science and technology Ivan Lukich Povkh

Series G: Technical science

No 4

Donetsk 2019

CONTENTS

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Pometun E.D.* Algorithm for processing the output signal of the direct current thermal anemometers and the constant temperature 3

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Smetannikov A.D., Berezhnoy M.G., Teplinsky S.V.* Laser engraver based on Arduino 11
Kurushin A.A. Modeling of multiport antennas 16

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Babicheva M.V., Baadzhi A.V.* Methods to determine of the public transport location for transport mobile application in Donetsk city 25
Kornev A.L., Mukharsky D.V. An information system for measurement complexes and internet of things (IoT) 30
Danilov V.V., Timchenko V.I., Tretiakov I.A., Gmyrya V.A. Optical information technologies. Features of the passage of a plane electromagnetic wave through transmission media 36
Babicheva M.V., Yurchenko A.S. Algorithm for processing images of fingerprints for automated systems of biometric authentication 44

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Storozhev S.V., Nguyen-Kuok Shi, Tran Ba Le Hoang* Fuzzy set strategy for estimation of some characteristics functioning centrifugal-jet injectors in the technical system of thermal stabilization 50

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

- Zibold A.F.* Peculiarity of Taylor's and wavy vortices beginning, generated by MHD-rotation 67
Simonenko A.P., Aslanov P.V., Zolotaryova I.A., Guchmazova T.K. On the relationship of the reduction of hydrodynamic resistance of turbulent friction with the manifestation of liquid crystal properties in MFS solutions 73

- Povkh Ivan Lukich – Teacher, Scientist, Person 81

- Instructions for authors 83

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е , М Е Т Р О Л О Г И Я И И Н Ф О Р М А Ц И О Н Н О - И З М Е Р И Т Е Л Ь Н Ы Е П Р И Б О Р Ы И С И С Т Е М Ы

УДК 533.6.011.5

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ТЕРМОАНЕМОМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2019 *Е.Д. Пометун*

В статье описан алгоритм преобразования выходных электрических сигналов термоанемометров постоянной температуры и постоянного тока, в значения температуры и скорости при измерении в неизотермическом газовом потоке. Предполагается, что сложная функция, описывающая теплообмен нагретого чувствительного элемента, может быть представлена в виде произведения двух более простых функций, причем первая функция зависит от числа Рейнольдса, а вторая – от относительного перегрева чувствительного элемента термоанемометра. Представленная методика обеспечивает хорошее совпадение фактических и расчетных значений скорости и температуры потока воздуха в диапазонах $1 \div 10$ м/с и $20 \div 45$ °С.

Ключевые слова: аппроксимирующие функции, термоанемометр постоянной температуры, термоанемометр постоянного тока, термокомпенсация, неизотермический газовый поток.

Введение. Термоанемометрический метод относится к тепловым методам, получившим широкое применение при измерении параметров газовых потоков [1]. Термоанемометры (ТА) подразделяются на два основных типа: термоанемометры постоянного тока и постоянной температуры (сопротивления). В ТА постоянного тока величина тока, питающего чувствительный элемент (ЧЭ), поддерживается постоянной, независимо от изменения температуры и скорости потока. В ТА постоянной температуры сопротивление и, следовательно, температура ЧЭ, поддерживаются постоянными с помощью схемы обратной связи (ОС), позволяющей улучшить динамические характеристики системы [2].

Несмотря на достоинства термоанемометрического метода, такие как сравнительная простота и дешевизна средства измерений, а так же малая область осреднения датчика, существенными недостатками ТА являются сильная температурная зависимость, а так же нелинейность выходного электрического сигнала от скорости газового потока. Универсального способа устранения температурной зависимости (термокомпенсации) не существует, в каждом конкретном случае выбирается оптимальный метод, основанный на различных технических решениях [3-5].

Целью работы является разработка алгоритма преобразования выходных электрических сигналов ТА постоянного тока и постоянной температуры в мгновенные значения скорости и температуры при измерениях в неизотермических газовых потоках.

Предложенная в данной статье методика основана на гипотезе о возможности представления сложной функции, описывающей теплообмен нагретого датчика ТА, зависящей от двух параметров скорости и температуры, в виде произведения двух

более простых функций (скорости потока воздуха и его температуры). Преимуществом данной методики термокомпенсации является возможность использования микроконтроллера при обработке электрических сигналов в реальном масштабе времени или соответствующего программного обеспечения, в случае разделения во времени процессов измерения и обработки сигналов.

Описанный способ обработки выходного сигнала термоанемометров был реализован на основе ПО LabVIEW и успешно себя зарекомендовал на практике при измерении параметров неизотермических газовых потоков.

Основная часть. При измерении скорости неизотермических потоков с помощью ТА, необходимо использовать датчик, состоящий из двух чувствительных элементов (ЧЭ), причем, в идеальном случае, динамические характеристики этих элементов должны быть близкими. В ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» был изготовлен измерительный комплекс, функционально близкий к разработанному фирмой Dantec Dynamics (Dantec Dynamics: [сайт]. URL: <https://www.dantecdynamics.com/constant-temperature-anemometry>) и включающий в себя два датчика: термоанемометр и термометр. ЧЭ состоял из двух параллельно расположенных вольфрамовых нитей диаметром 8 мкм: нить, расположенная впереди по потоку, использовалась в качестве датчика термометра, за ней, со смещением около 2 мм, располагалась нить - датчик термоанемометра.

Сложную функцию, описывающую теплообмен нагретого ЧЭ, можно представить в виде:

$$W_{TA} = f(V, T, \rho, \lambda, \mu, C), \quad (1)$$

где: W_{TA} – электрическая мощность, необходимая для разогрева ЧЭ до заданной температуры, V – скорость потока, T – температура потока, ρ – плотность, λ – теплопроводность, μ – вязкость, C – теплоёмкость газа.

Выходное напряжение термометра E_T запишем в виде:

$$E_T = f(T). \quad (2)$$

Определим явный вид функции (2) Для расчета температуры потока использовалось соотношение:

$$E_T = I \cdot R_T = I \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (3)$$

где I – постоянный ток, заданный в нить термометра, R_T – сопротивление нити при температуре потока T_g , R_0 – сопротивление нити при некоторой калибровочной температуре, в данном случае равной $T_0 = 0^\circ\text{C}$, α – температурный коэффициент сопротивления вольфрама [$1/^\circ\text{C}$], $\Delta T = T_g - T_0$ – разность между температурой потока и калибровочной температурой.

Преобразуя (3) запишем соотношение для вычисления температуры газового потока в виде:

$$T_g = \frac{(R_T - R_0)}{\alpha \cdot R_0} + T_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{E_T - E_0}{E_0} \right) + T_0. \quad (4)$$

Из-за особенностей теплообмена ЧЭ в ТА постоянного тока и постоянной температуры уравнения термокомпенсации будут отличаться. Рассмотрим способы определения термокомпенсирующей функции для двух типов термоанемометров.

1. Термоанемометр постоянной температуры.

Теплоотдача длинного цилиндра (нити), при поперечном обтекании потоком воздуха, описывается уравнением, предложенным в работе [1]:

$$Nu = 0.42 \cdot Pr^{0.2} + 0.5 \cdot Pr^{0.33} Re^{0.5}, \quad (5)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ - число Нуссельта: α - коэффициент теплоотдачи, d - характерный

размер, λ - коэффициент теплопроводности; $Pr = \frac{\nu}{a}$ - число Прандтля: ν -

кинематическая вязкость, a - коэффициент температуропроводности; $Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$ -

число Рейнольдса: V - скорость потока.

Для большинства двухатомных газов число Прандтля слабо зависит от температуры и для воздуха в диапазоне 18...45°C может быть принято равным $Pr = 0.699...0.703$, что позволяет при обработке экспериментальных данных полагать $Nu = f(Re)$ [6].

Представим число Нуссельта в виде [7]:

$$Nu = \frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)}, \quad (6)$$

где: E_{TA} - электрическое напряжение ТА при текущей скорости потока, d - диаметр нити, R_w - сопротивление нагретой нити, λ_g - теплопроводность газа, S - площадь поверхности нити, T_w - температура нити, T_g - температура газа.

Зависимость теплообмена от числа Рейнольдса может быть представлена соотношением вида [1]:

$$Nu = \left(A + B \cdot Re^n \right) \cdot \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17}, \quad (7)$$

или с учетом (6):

$$\frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \left(\frac{T_g}{T_m} \right)^{0.17} = A + B \cdot Re^n, \quad (8)$$

где $T_m = \frac{T_w + T_g}{2}$ - поверхностная температура нити; A, B - константы.

Правая часть уравнения (8) $A + B \cdot Re^n$ есть функция числа Рейнольдса, левую часть уравнения (8) представим в виде:

$$\frac{d}{\lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \cdot \left(\frac{T_g}{T_m} \right)^{0.17} = C_0 \cdot f(T), \quad (9)$$

где $C_0 = \frac{d}{\lambda_g \cdot S}$ - экспериментальная константа.

В соотношении (8) основной вклад в погрешность измерения скорости, вызванную изменением температуры потока, вносит температура перегрева $(T_w - T_g)$, при этом изменение теплофизических свойств газа и ЧЭ оказывает значительно меньшее влияние - минимальной зависимости от температуры соответствует запись этих преобразований относительно скорости потока, а не числа Рейнольдса [8]. Итак, с учетом (9), представим соотношение (1) в виде:

$$W_{TA} = \frac{E_{TA}^2}{R_w} = C_1 \cdot f(V) \cdot f(T) = C_1 \cdot f(V) \cdot \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17} \cdot (T_w - T_g), \quad (10)$$

где $C_1 = \frac{\lambda_g \cdot S}{d} \cdot C_0$.

После определения явного вида функции (9) решается задача определения линеаризирующей функции: $V = f\left(\frac{W_{TA}}{f(T)}\right)$. Полученные соотношения используются в программах обработки электрических сигналов термоанемометрического комплекса.

2. Термоанемометр постоянного тока.

Особенностью работы ЧЭ ТА постоянного тока является зависимость температуры нити T_w от скорости и температуры потока $T_w = f(T_g, V)$. Представим соотношение (1), по аналогии с (10) для термоанемометра постоянного тока в виде:

$$W_{TA} = I^2 \cdot R_w = C_2 \cdot f(V) \cdot f(T) = C_2 \cdot f(V) \cdot \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17} \cdot (f(T_g, V) - T_g), \quad (11)$$

где C_2 - константа, определяемая при градуировке.

Функция $f(V)$ задает нелинейность напряжения ТА относительно скорости, а функция $f(V, T_g) - T_g$ - описывает изменение температуры нити, вызванное изменением температуры и скорости потока. С учетом $I = const: E_T \sim R$, уравнение (1) можно записать как изменение температуры нагретого ЧЭ:

$$\Delta T = \frac{(E_V - E_0)}{\alpha \cdot E_0}, \quad (12)$$

Или

$$T_w = f(T_g, V) = \frac{(E_V - E_0)}{\alpha \cdot E_0} + T_g, \quad (13)$$

где E_V - выходное напряжение ТА, E_0 - некоторое постоянное напряжение ТА, соответствующее минимальной температуре нити.

При скорости $V \rightarrow \max$, температура нити ТА постоянного тока будет стремиться к температуре потока: $T_W \rightarrow T_g$, соответственно электрическое напряжение E_V - к некоторому постоянному для каждой температуры T_g значению E_0 . Для определения E_0 , в процессе градуировки измерялось выходное напряжение термоанемометра при скорости 10м/с ($Re \approx 6$). Было определено, что E_0 линейно зависит от T_g , причем, для произвольной температуры T_g ее величина определяется путем решения уравнения вида $E_0 = k \cdot T_g + b$, где k, b – постоянные коэффициенты.

Подставив (13) в (11) имеем

$$W_{TA} = f(V) \cdot C_2 \cdot \left(1 + \frac{E_V - E_0}{2\alpha E_0 \cdot T_g}\right)^{0.17} \cdot \left(\frac{E_V - E_0}{\alpha \cdot E_0}\right), \quad (14)$$

$$\text{где } T_m = \frac{E_V - E_0}{2\alpha E_0} + T_g; \quad \frac{T_m}{T_g} = 1 + \frac{E_V - E_0}{2\alpha E_0 \cdot T_g}.$$

Тогда:

$$W_{TA} = (A + B \cdot Re^n) \cdot C_2 \cdot E_1, \quad (15)$$

$$\text{где: } E_1 = \left(1 + \frac{E_V - E_0}{2\alpha \cdot E_0 \cdot T_g}\right)^{0.17} \cdot \left(\frac{E_V - E_0}{\alpha \cdot E_0}\right).$$

Окончательно из соотношения (15), следует, что условию термокомпенсации удовлетворяет функция вида:

$$f(V) = f(E_V, T_g) = \frac{W_{TA}}{(A + B \cdot Re^n) \cdot C_2 \cdot E_1} = \frac{E_V}{C_3 \cdot E_1}, \quad (16)$$

где C_3 - константа, определяемая при градуировке.

Температура T_g вычисляется по соотношению (4).

3. Экспериментальная проверка.

С целью проверки описанного метода преобразования сигналов при измерении скорости в неизотермических газовых потоках были выполнены экспериментальные исследования на установке АДС-200/250 [9]. Автоматическая система управления АДС-200/250 позволяет устанавливать стабилизированные значения следующих параметров: температуры – от комнатной до 60°C и скорости потока воздуха – от 1 до 40м/с. Значение скорости контролируется с помощью трубки Пито-Прандтля и манометра МЕТРАН-100ДД. Регистрация выходного сигнала ТА выполняется специализированной измерительной системой, состоящей из коммутатора фирмы NI SCB-68, аналогово-цифрового преобразователя и среды графического программирования LabVIEW.

Для использования термоанемометра в неизотермическом газовом потоке, необходимо получить семейство градуировочных характеристик при различных

скоростях и температурах потока. Измерения выполнялись в диапазонах изменения температуры – от 23°C до 45°C и скорости - от 1 до 10 м/с, полученные зависимости для ТА постоянной температуры и постоянного тока представлены, соответственно, на (рис.1) и (рис.2).

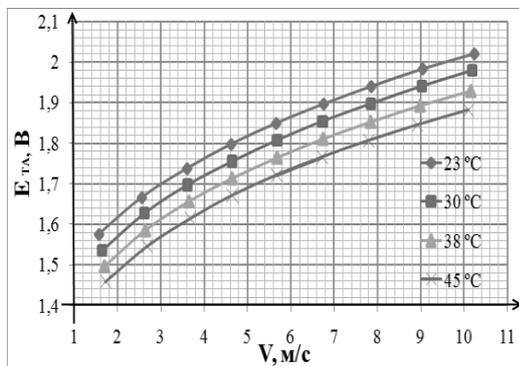


Рис. 1. Градуировочные зависимости термоанемометра постоянной температуры

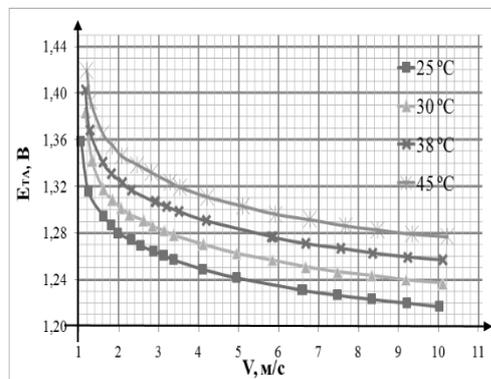


Рис. 2. Градуировочные зависимости термоанемометра постоянного тока

Вычисление скорости неизотермического газового потока при измерении ТА постоянной температуры и постоянного тока выполнялось в два этапа. В ТА постоянного тока вначале вычислялась функция (16), затем, линеаризация функции $f(V)$ для сведенных по температуре градуировочных кривых. В ТА постоянной температуры: вначале вычислялась функция (9) и после этого определялся вид линеализирующей функции $f(V)$ в уравнении (10).

Были проверены два способа аппроксимации функции $f(V)$: с помощью уравнения (7) и полиномиальной регрессией. Вычисление коэффициентов в уравнении (7) с учетом (8) свелось к вычислению коэффициентов n и A , B , при этом погрешность составила около 4%. Аппроксимация полиномиальной регрессией уравнения (8) имеющей большее количество коэффициентов обеспечивает более высокую точность [10] (рис. 3).

Использование полиномиальной регрессии, хорошо аппроксимирующую градуировочную функцию ТА постоянной температуры, в случае ТА постоянного тока приводит к значительным погрешностям. Например, при скорости выше 5 м/с погрешность аппроксимации полиномом 4-ой степени составляла около 25%. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что функция $f(V)$, вычисленная по уравнению (16), может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью вида:

$$V = f(E_V) = \sum_{n=1}^2 A_n \cdot e^{(B_n \cdot f(E_V, T_g))}, \quad (17)$$

где A_n , B_n - градуировочные коэффициенты.

В качестве линеаризирующей функции использовалась сумма экспонент (17). Окончательно, зависимость погрешности от скорости и температуры, при использовании изложенной выше методики, представлена на рисунках 3 и 4.

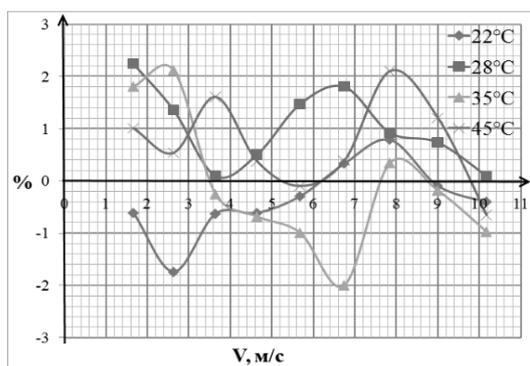


Рис. 3. График погрешностей при аппроксимации полиномом N=4 для ТА постоянной температуры

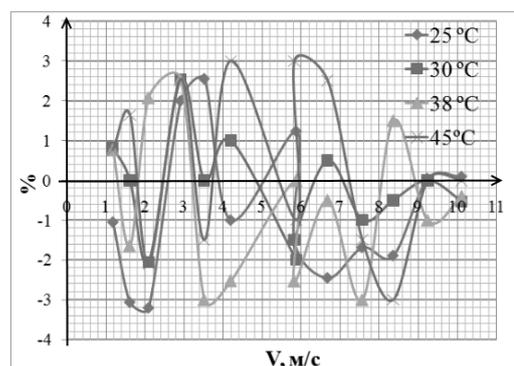


Рис. 4. График погрешностей аппроксимации выходного сигнала ТА постоянного тока

При малых скоростях воздушного потока, предположение о возможности разделения сложной функции на произведение двух, более простых, может не выполняться. Это связано с тем, что вокруг нагретой нити формируется восходящий поток и при уменьшении скорости потока, обтекающего нить, произведение функций в соотношениях (10) для ТА постоянной температуры и (14) для ТА постоянного тока будет стремиться не к нулю, а к некоторой величине, обусловленной тепловой конвекцией, т.е. соотношения (10) и (16) будут нарушаться.

Практика показывает, что описанная методика термокомпенсации может использоваться для ЧЭ, изготовленных не только на основе микропровода, но и с другими типами датчиков [10].

Выводы. Предложены и экспериментально апробированы алгоритмы термокомпенсации выходных сигналов термоанемометров постоянного тока и постоянной температуры. Рассмотренные алгоритмы могут быть использованы для составления программ обработки выходных сигналов ТА при измерении скорости и температуры неизотермического газового потока в реальном масштабе времени с применением различных технических средств, например, в среде графического программирования LabVIEW.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярин Л. П. Термоанемометрия газовых потоков / Л. П. Ярин, А. Л. Генкин, В. И. Кулес. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 198 с.
2. Пометун Е. Д. Сравнение чувствительности термоанемометров двух типов: импульсного и постоянной температуры / Е. Д. Пометун, Д. Н. Кузнецов // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2013. – № 1(4)-2(5). – С. 107-109.
3. Hultmark M. Temperature corrections for constant temperature and constant current hot-wire anemometers / M. Hultmark, A. J. Smits // Measurement Science and Technology. – 2010. – Т. 21, №. 10. – P. 105404-105406.
4. Temperature Effects in Hot-Wire Measurements on Higher-Order Moments in Wall Turbulence / A. Talamelli et al. // Progress in Turbulence VI. Proceedings of iTi Conference on Turbulence 2014. – [Cham] : Springer International Publishing, 2016. – С. 185-189.
5. Hot-wire measurements with automatic compensation of ambient temperature changes / N. I. Miheev et al. // Thermal Science. – 2015. – Т. 19, № 2. – С. 509-520.
6. Кузнецов Д. Н. Исследование некоторых функций аналитического описания экспериментальных градуировочных характеристик термисторов / Д. Н. Кузнецов, В. Н. Лебедев, Ю. Д. Украинский // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы : материалы восьмого международного научно-практического семинара, 17 – 20 апреля 2007 года в городе Донецке. – Донецк ; Таганрог, 2007. – Т. 3. – С. 104-108.

7. Украинский Ю. Д. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры / Ю. Д. Украинский // тез. Докл. Мелекино. 2002. С. 3-7.
8. Автономный измеритель скорости и температуры потока. АИСТ-5. Руководство по эксплуатации Э13102.00.00 РЭ. – Текст : электронный. – URL: http://www.spribor.com.ua/re/aist5_re.pdf (дата обращения: 06.12.2017).
9. Кузнецов Д. Н. Настройка оптимального регулятора температуры воздушного потока аэродинамического стенда АДС – 200/250 / Д. Н. Кузнецов, А. А. Дьяченко, Д. А. Чупис // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – № 21 (183). – С. 171 – 177.
10. Пометун Е. Д. Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе : сборник научных трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2015. – № 1(8)–2(9)2015. – С. 88-91.

Поступила в редакцию 01.11.2019 г.

ALGORITHM FOR PROCESSING THE OUTPUT SIGNAL OF THE DIRECT CURRENT THERMAL ANEMOMETERS AND THE CONSTANT TEMPERATURE

E.D. Pometun

The article is proposed a technique for converting the output electrical signals of constant temperature anemometer and constant current anemometer into temperature and velocity in a non-isothermal gas flow. It is assumed that a complex function describing the heat transfer of a heated element can be represented as a product of two simpler functions. The first function is depends on the Reynolds number, and the second depends on the relative overheating of the sensing element of the thermal anemometer. The presented technique ensures good agreement between the actual and calculated values of the speed and temperature of the air flow in the ranges $1 \div 10\text{m/s}$ and $20 \div 45^\circ\text{C}$.

Keywords: approximating functions, constant temperature anemometer, constant current anemometer, temperature compensation, non-isothermal gas flow.

Пометун Екатерина Дмитриевна

старший преподаватель кафедры физики неравновесных процессов метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.

E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna

Lecturer of the Department of Physics of nonequilibrium, Metrology and Ecology Processes named after I.L. Povkha Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

УДК 004.356.2

ЛАЗЕРНЫЙ ГРАВЁР НА БАЗЕ ARDUINO

© 2019 А.Д. Сметанников, М.Г. Бережной, С.В. Теплинский

Разработан прототип дешевого и мобильного ЧПУ станка для гравировки рисунков на изделиях из кожи, дерева и др., резки изделий из фанеры и модельного пластика. Устройство реализовано на базе микроконтроллера Arduino.

Ключевые слова: Arduino, станок с ЧПУ, лазерная гравировка, резка лазером, проектирование.

Постановка задачи. На сегодняшний день, рынок станков с ЧПУ разнообразен. Но у всех представленных моделей есть недостатки:

1) дороговизна оборудования. Средняя рыночная цена может достигать до 3000 долларов США [1], сумма слишком большая для пользователей из ДНР;

2) ограниченная гибкость настройки. Обычно, станок ЧПУ запрограммирован на 1 функцию. К примеру гравёр может только прожигать рисунок, а фрезер только резать;

3) трудность доставки и огромный размер. Одним из поставщиков станков ЧПУ, на сегодняшний день, является Китай. Из-за геополитической ситуации, доставка затрудняется пересечением границ многих государств. К тому же размеры одного станка могут достигать до нескольких метров в длину или ширину, что делает невозможным его быструю транспортировку по городу.

Для решение вышеописанных проблем и разработан мобильный станок с ЧПУ с функцией гравировки.

Описание устройства. Лазерный гравёр представляет собой станок с ЧПУ. За нанесение рисунка на материал (гравировку) отвечает лазер, мощностью 2 Вт. Каркас станка был смоделирован в программе Autodesk Inventor [2] (рис.1).

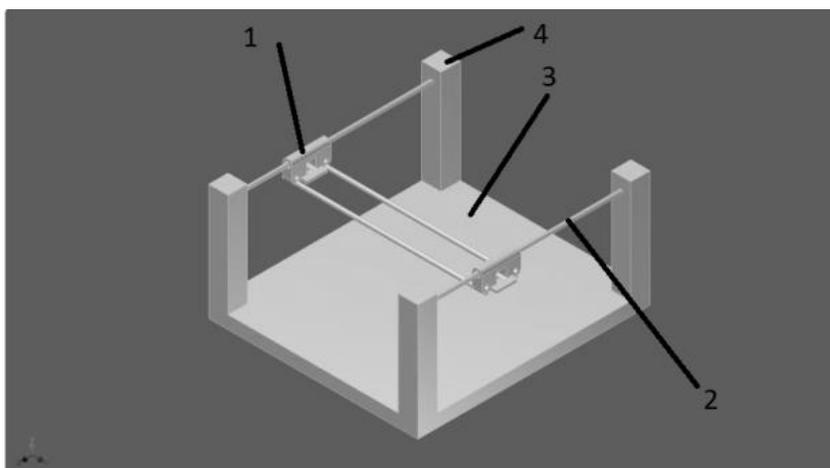


Рис. 1. Модель каркаса станка ЧПУ: 1) направляющая каретка оси X; 2) Направляющая оси Y, 3) Стол для материала, 4) держатели направляющих.

Преимущества разработанного каркаса заключаются в следующем:

- 1) лёгкость сборки;
- 2) малые размеры, в сравнении со стационарными станками с ЧПУ;
- 3) возможность безопасной работы с лазером.

Недостатки же заключаются в слабой фокусировке лазера, что обуславливается отсутствием возможности движения по оси Z и появлением неточности резки из-за вибрации.

Построить такой корпус не получилось из-за отсутствия нужных направляющих. Имеющиеся в доступе направляющие рейки для осей не столь устойчивые, как требуются, из-за этого под весом каретки лазера начинает появляться люфт хода лазера, что не допустимо. Поэтому было принято решение использовать альтернативную модель корпуса, представленную на рис. 2.

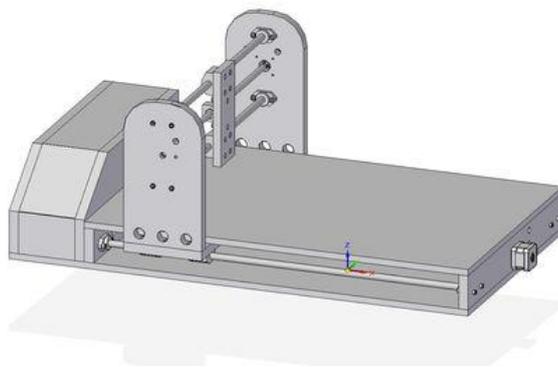


Рис. 2. Альтернативная модель корпуса

Данный корпус не столь безопасен, как первый, но более лёгок в проектировании. За движение лазера по осям XY отвечают два шаговых мотора, управляемые Arduino. Каждый шаговый двигатель связан со своей направляющей кареткой, лазер перемещается сначала по оси X, затем по оси Y. Поэтому можно видеть рисунок как цикл прохода по матрице. Формируем алгоритм для цикла прохода. Работой шаговых двигателей управляют драйвера. Для данного проекта были выбраны драйвера DRV8825 (рис.3).

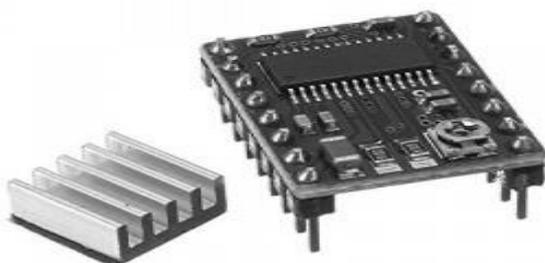


Рис. 3. Драйвера шаговых двигателей

В лазере для прожига используется диод M140 на 5 вт, встроенный в металлический корпус, который прикреплён к каретке, двигающейся по направляющим оси Y (рис 4).



Рис. 4. Лазер прожига в сборе с кареткой

Из-за сильного нагрева диода, была разработана система охлаждения. Она состоит из активной и пассивной составляющих. Пассивная часть представляет два радиатора, закреплённых на корпусе диода с помощью двух болтов. Активная часть включает два кулера, встроенных в корпус устройства. Первый кулер нагнетает воздух внутрь корпуса, второй же выдувает нагретый воздух. Связь шаговых двигателей и кареток происходит при помощи зубчатых ремней. Управление станком с ЧПУ выполняет плата Arduino Nano с микроконтроллером ATmega328, который оснащен 32 КБ флэш-памяти (память программ), 2 КБ из которых отведено под загрузчик. Он позволяет прошивать Arduino с компьютера через USB. Также имеется 2 КБ SRAM-памяти (память данных), которые используются для хранения временных данных, например, переменных программы. Имеется 1 КБ EEPROM-памяти для долговременного хранения данных. На платформе расположены 14 контактов (pins), которые могут быть использованы для цифрового ввода и вывода [3]. За питание устройства отвечает модуль питания с входным переменным напряжением 220В и выходным постоянным 12В, для питания драйверов шаговых моторов, платы Arduino и лазера.

Алгоритм работы устройства. Первый этап - подготовка. С помощью программы-преобразователя рисунок из формата jpeg, png или bmp переводится в формат NC. Затем готовая заготовка загружается на карту памяти. Карта вставляется в слот картридера. После включения станка и выбора нужного файла в меню, начинается прожиг.

Каретки устанавливаются в начальное положение. Затем начинают движения поперек с установленным шагом (по умолчанию 1/32 шага двигателя). После того, как каретка сдвинется на 1 шаг, программа сверяет рисунок. От яркости пикселя, на котором находится каретка, зависит включится ли лазер и на какую задержку будут остановлены двигатели. Чем дольше лазер работает – тем темнее получается точка.

Установка Arduino и проверка электроники. Для сборки прототипа был выбран корпус сканера 1998 года. Сам сканер пришел в негодность, поэтому все его компоненты (кроме главной направляющей и шагового двигателя) были удалены. Во фронтальной панели были прорезаны отверстия под клавиатуру. Вдоль панели пропилены пазы для Y-направляющей. X-направляющей стала собственная направляющая сканера. В законченном виде гравёр представлен на рисунке 5.

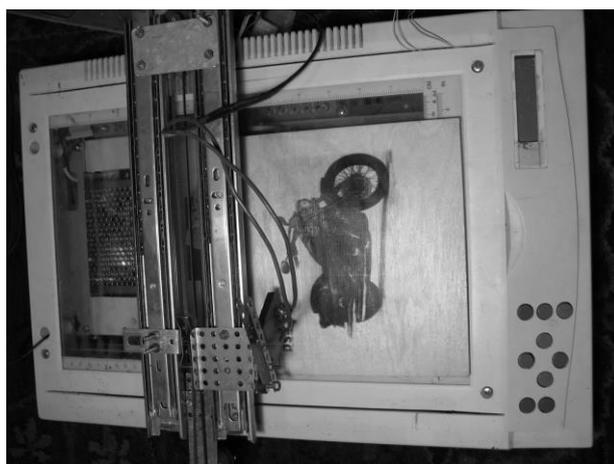


Рис. 5. Гравёр в собранном виде

Согласно инструкции по технике безопасности работать с такого рода лазерными устройствами можно только в защитных очках. Результат первичных испытаний представлен на рисунке 6. Можно сказать, что лазерный гравировщик удовлетворяет предъявленным требованиям. Но для того, чтобы сделать его красивее и безопаснее, был доработан корпус.



Рис. 6. Первая гравировка

Добавлены боковые грани корпуса, сделанные из фанеры с белым покрытием. Боковые панели крепятся болтами. Над Arduino, драйверами и другими узлами, установленными на нижней части бокса крепится дополнительная деревянная платформа. Она служит базой для материала, который режется лазером. Кроме того, предусмотрены отверстия для охлаждения, кабелей питания и USB порта. Края передней и верхней частей корпуса сделаны из той же фанеры.

Выводы. В ходе работы был сконструирован прототип лазерного гравера, который успешно прошел тестовые испытания. Для улучшения качества гравировки и расширения функционала предлагаются следующие усовершенствования:

- 1) Для лучшей фокусировки лазера добавить дополнительную ось Z, чтобы приблизить лазер к заготовке.
- 2) Чтобы уменьшить люфт кареток, ось Y можно перенести с верхней части станка вниз и обеспечить движение стола. Т.е. лазер движется по осям X и Z. А заготовка движется по оси Y.
- 3) Заменить лазер на более мощный, чтобы использовать гравёр, например, для металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. AliExpress : [интернет-магазин] : сайт. – URL: <https://ru.aliexpress.com> (дата обращения: 23.08.2019). – Загл. с экрана. – Текст : электронный.
2. Autodesk Inventor // Википедия. Свободная энциклопедия : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor (дата обращения: 30.08.2019).
3. Петин. В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В. А. Петин. – Санкт-Петербург : БХВ–Петербург, 2014. – 400 с.
4. Электронный ресурс Яндекс Диск : сайт. – URL: https://yadi.sk/d/om0O5_uN33FjNH (дата обращения: 30.08.2019).

Поступила в редакцию 21.10.2019 г.

LASER ENGRAVER BASED ON ARDUINO

A.D. Smetannikov, M.G. Berezhnoy, S.V. Teplinsky

Development of laser carver based on Arduino: Development of CNC machine for engraving drawings on products made of leather, wood, etc. For cutting products from plywood and model plastic. The device is implemented based on the microcontroller Arduino.

Keywords: Arduino, CNC machine, laser engraving, laser cutting, designing.

Сметанников Алексей Дмитриевич

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: alexsmet899192@gmail.com

Smetannikov Alexey Dmitrievich

Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Бережной Михаил Геннадьевич

студент кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: magber@i.ua

Berezhnoy Mihail Gennadievich

Student at Department of Computer Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Теплинский Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной инженерии ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, г. Донецк.

Teplinskiy Sergey Vasilevich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk.

УДК 621.396.44

РАСЧЕТ МНОГОПОРТОВОЙ АНТЕННЫ

© 2019 А.А. Курушин

На примере антенны типа «Бабочка» рассмотрены вопросы моделирования многопортовых излучающих СВЧ структур. Рассматривается питание вибраторной антенны с использованием схемы разводки мощности и фазы на дискретных ЧИПах. Моделирование многопортовой структуры, в которую включены неизлучающие элементы, выполняется на электродинамическом уровне и учитывает взаимное влияние отдельных элементов. Эксперимент подтвердил достоверность расчетов, выполненных с помощью коммерческого пакета САПР FEKO.

Ключевые слова: СВЧ структура, антенна «Бабочка», безэховая камера, диаграмма направленности, согласование антенны, коэффициент шума.

Введение. Электродинамическое моделирование СВЧ структур, в которые включены как пассивные, так и активные компоненты, позволяет предсказать и учесть электродинамическую связь между отдельными фрагментами структуры.

В программе FEKO реализованы разнообразные порты: волноводные, дискретные, микрополосковые, порты на ребрах и др., в которые можно включать конденсаторы, транзисторы, микросхемы и др. дискретные элементы (рис. 1). Эти порты предназначены для ввода энергии в структуру и позволяют рассчитать S-параметры, связывающие падающие и отраженные волны в портах. Порты могут объединять неизлучающие компоненты и излучающие фрагменты структуры (антенны).

Антенна «Бабочка» состоит из двух скрещенных вибраторов, которые запитываются в квадратуре [1]. При возбуждении этой антенны, созданной на микрополосковой плате, каждый из 4-х портов подключается к микросхемам так, что каждый её полувибратор запитывается отдельным портом. Рассмотрим проектирование такой структуры с помощью программы электродинамического моделирования FEKO.

Проектирование многопортовой антенны со сложными системами питания. Анализ схемы показанной на рис. 1 удобно проводить, используя результаты [1]. Представим матрицу рассеяния S1 в следующем блочном виде:

$$S1 = \begin{bmatrix} S_{aa} & S_{ab} \\ S_{ba} & S_{bb} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С учетом формулы (1) можно записать следующее соотношение между амплитудами падающих и отраженных волн:

$$\begin{aligned} S_{aa} \vec{U}_{Pa} + S_{ab} \vec{U}_{Pb} &= \vec{U}_{Oa} \\ S_{ba} \vec{U}_{Pa} + S_{bb} \vec{U}_{Pb} &= \vec{U}_{Ob} \end{aligned}, \quad (2)$$

где \vec{U}_{Pa} , \vec{U}_{Pb} , \vec{U}_{Oa} , \vec{U}_{Ob} - вектора падающих и отраженных волн от плоскостей a и b .

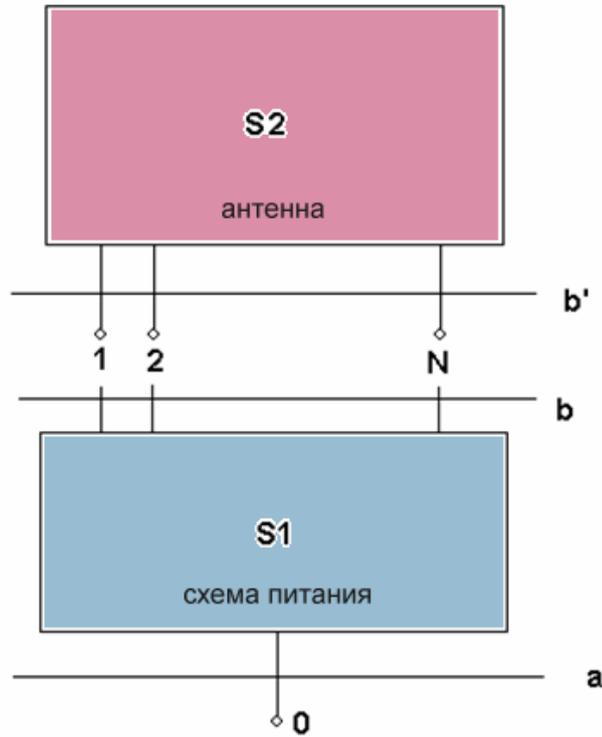


Рис. 1. Объединение многопортовой антенны со схемой питания

Вектора падающих и отраженных волн от плоскости b' связаны следующим образом:

$$S_2 \vec{U}_{Пb'} = \vec{U}_{Ob'}. \quad (3)$$

Учитывая, что отраженные в плоскости b $\vec{U}_{П,Ob}$ и падающие в плоскости b' волны $\vec{U}_{П,Ob'}$ равны, запишем:

$$\vec{U}_{Ob} = \vec{U}_{Пb'}, \quad \vec{U}_{Ob'} = \vec{U}_{Пb}. \quad (4)$$

Используя это, исключим из формул (2) - (4) все переменные, кроме падающих $\vec{U}_{Па}$ и отраженных волн в сечении a $\vec{U}_{Оa}$. В результате получаем выражение для матрицы $S_{aa\Sigma}$ - матрицы коэффициентов отражения от плоскости a :

$$S_{aa\Sigma} = S_{aa} + S_{ab} S_2 (E - S_{bb} S_2)^{-1} S_{ba}, \quad (5)$$

где E - единичная матрица. В предельном случае, когда в плоскости a имеется только один вход, то матрица $S_{aa\Sigma}$ представляет собой одно число – коэффициент отражения от входа антенны.

Применим эти соотношения, полученные в работе [1], для четырехпортовой антенны. С учетом соотношений между падающими волнами (3) получаем простое, но важное соотношение:

$$S_{11_com} = S_{11} + S_{12}e^{i\frac{\pi}{2}} + S_{13}e^{i\pi} + S_{14}e^{i\frac{3\pi}{2}} = S_{11} - S_{13}, \quad (6)$$

из которого получаем скорректированное значение входного импеданса антенны:

$$Z_{ex_korr} = Z_0 \frac{1 + S_{11_com}}{1 - S_{11_com}}. \quad (7)$$

Электродинамическое моделирование структуры, в которую включены неизлучающие элементы, может быть выполнено так, что гибридное решение выполняется либо методом теории цепей, либо на электродинамическом уровне (рис. 2). Метод Олинера, широко распространенный в заре развития САПР СВЧ, в настоящее время решительно уступает свое место метода электродинамического моделирования.



Рис. 2. Два метода объединения неизлучающих цепей (чипы, транзисторы, дискретные направленные ответвители) и излучающей электродинамической структуры

Подход, реализованный в FEKO (вторая линия на рис. 2) предполагает включение дискретных элементов в электродинамическую структуру. В этом случае взаимная связь отдельных частей электродинамической структуры учитывается автоматически, и появляется возможность рассчитать характеристики ближнего и дальнего поля структуры, в которую включены дискретные элементы (направленные ответвители, транзисторы, емкости, индуктивности, диоды).

Так, модель транзистора в виде S-параметров включается во внутренние порты, созданные в разрывах антенной системы (рис. 3). Аналогично можно включить направленный ответвитель, имеющий несколько портов.

Неизлучающий элемент, размеры которого полагаем намного меньше длины волны может быть определен в терминах S-, Y- или Z-параметров, импортирован как внешний файл Touchstone, или вручную задан в CADFEKO.

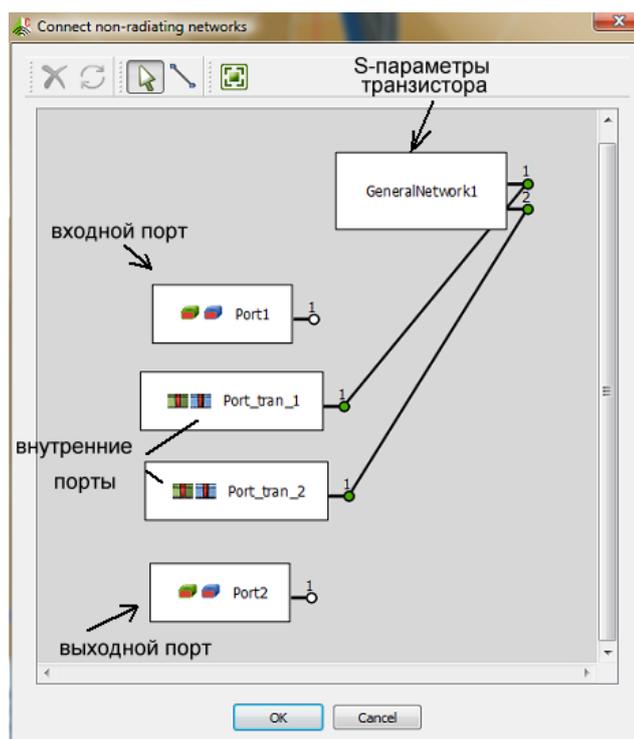


Рис. 3. Диалог объединения неизлучающей цепи (транзистора) с электродинамической структурой в программе FEKO

Подобная задача возникает, когда необходимо запитать излучающую структуру с помощью нескольких портов, как это делается в структуре антенны «Бабочка» (рис. 4). Вибраторы антенны «Бабочка» с круговой поляризацией возбуждаются со сдвигом фаз 90° . Это можно осуществить, если использовать 3 дискретных малогабаритных ЧИПа, выполняющих каждый роль направленного ответвителя. Тогда можно реализовать антенну с круговой поляризацией. На рис. 4 приведена схема деления мощности и разводки фаз, выполненной с помощью ЧИПов.

Моделирование антенной системы с подключенными дискретными элементами. Антенна «Бабочка» имеет два скрещенных вибратора, которые можно запитать как двумя источниками, сдвинутыми на 180° , так и четырьмя портами, возбуждаемыми источниками, сдвинутыми на 90° . Излучающие свойства вибраторной антенны останутся в этом случае теми же самыми, распределение тока вдоль линии также останутся теми же, также как и КНД антенны. Для полуволнового вибратора КНД=1.63 дБі.

Антенна «Бабочка» представляет собой модернизированную вибраторную антенну, у которой имеются расширяющиеся по ширине вибраторы. Это придает этой антенне новые свойства, в частности более широкий диапазон рабочих частот [2-3]. Можно также показать, что фазовый центр этой антенны не зависит от частоты и находится в геометрическом центре антенны «Бабочка» (рис.4)

В указанные четыре порта, через которые питается антенна «Бабочка» подключаются микросхемы (рис. 5). Для того, чтобы получить антенну Бабочка с круговой поляризацией, используем микросхемы, S- параметры которой приведены в матрице (8). Это идеальный делитель мощности, сдвигающий фазы на портах 2 и 3 на 180° , состоящий из 3-х направленных ответвителей (НО).

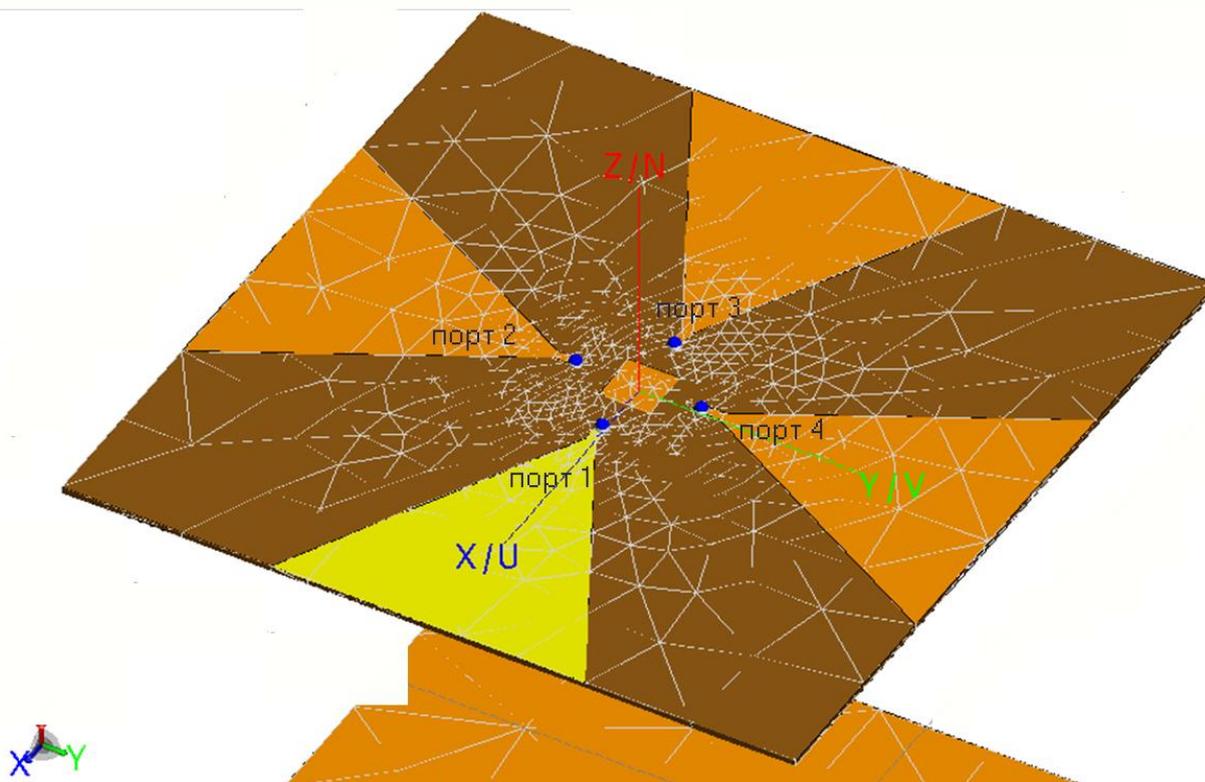


Рис. 4. Антенна «Бабочка» в интерфейса программы FEKO с указанными портами, к которым подключаются дискретные ЧИПы

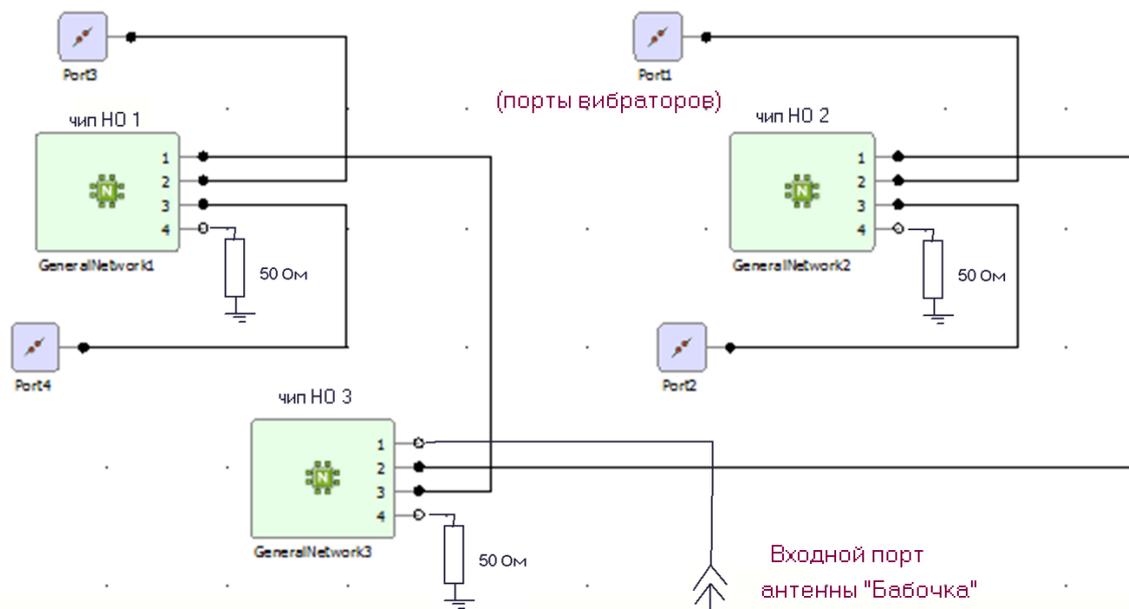


Рис. 5. Схема объединения портов антенны «Бабочка» и НО (чипов)

Входной порт (присоединяемый ко входной коаксиальной линии) подключается к порту 3 чипа, а порты 1 и 2 подключаются к вибраторам антенны «Бабочка». Четвертые порты чипа через отрезок микрополосковой линии подключаются к балансным нагрузкам 50 Ом.

Направленный ответвитель ("RF Trans" [4]) имеет на рабочей частоте следующую матрицу рассеяния:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0.707 & 0.707\angle 180^\circ & 0 \\ 0.707 & 0 & 0 & 0.707\angle 180^\circ \\ 0.707\angle 180^\circ & 0 & 0 & 0.707 \\ 0 & 0.707\angle 180^\circ & 0.707 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Четырехпортовая схема с этой матрицей рассеяния включается в структуру как неизлучающий четырехпортовой объект с помощью схемы, показанной на рис. 5.

Неидеальность, т.е. отличие S -матрицы реального НО от S -матрицы (8), можно внести в матрицу, используя DATA SHEET, учитывая, таким образом, частотные зависимости и рассогласование чипа в 50-омном тракте. Для этого в файл записываются частотнозависимые значения S -матриц в формате Touchstone: модуль – фаза, что позволяет также учесть частотно-зависимые характеристики НО, созданных на миниатюрных дискретных чипах и с учетом паразитных параметров корпусов.

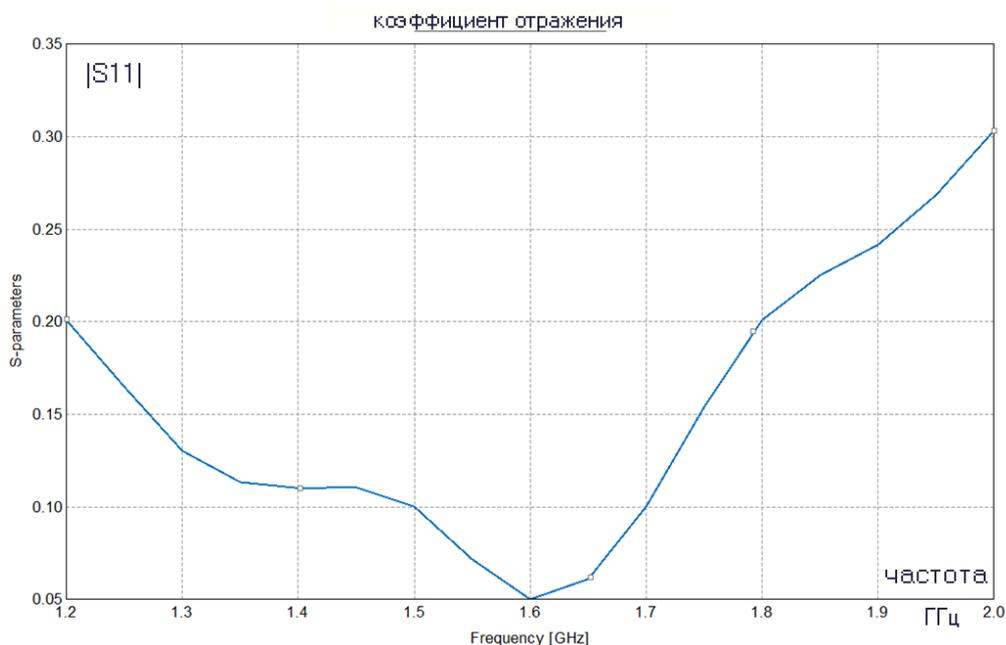


Рис. 6. Коэффициент отражения со стороны входного разъема антенны «Бабочка», отдельные вибраторы которой запитываются с помощью чипа

Элементы S_{12} и S_{13} в формуле (8) имеют сдвиг по фазе 180° , что показывает, что порты антенны должны запитываться противофазно. Отметим также, что два чипа должны сдвигать фазу на 90° , а один чип – на 180° . Рассчитанная с помощью программы FEKO частотная характеристика антенны «Бабочка» с включением трех направленных ответвителей, показана на рис. 5. Частотная характеристика коэффициента отражения антенны «Бабочка», рассчитанная с помощью FEKO, показана на рис. 6, а экспериментальные зависимости – на рис. 7.

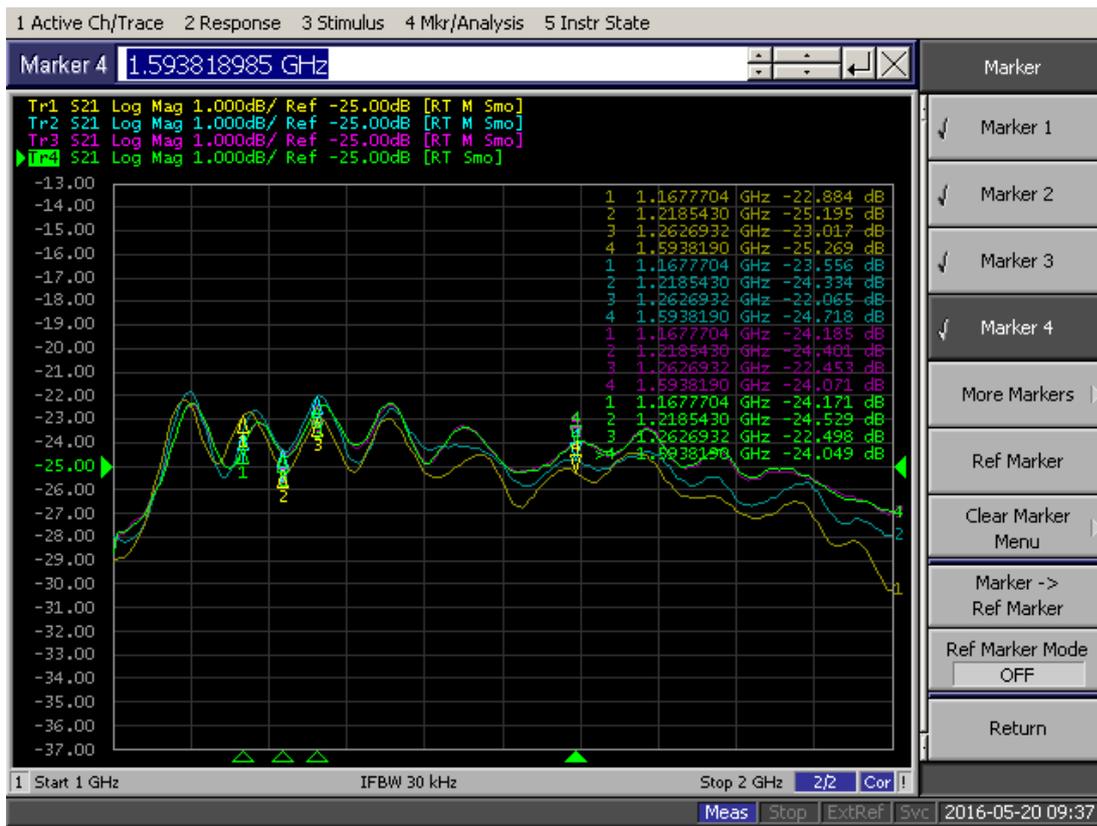


Рис. 7. Экспериментальные измерения с помощью прибора Agilent коэффициента отражения антенны Бабочка со схемой распределения мощности

Спроектированную антенну «Бабочка» с круговой поляризацией, макет которой показан на рис. 8, можно использовать для выполнения функции излучающей антенны в малогабаритной безэховой камере [5] (рис. 9), предназначенной для тестирования антенн систем GLONASS и GPS.



Рис. 8. Антенна «Бабочка» с круговой поляризацией

Работа антенны «Бабочка» в малогабаритной безэховой камере. Благодаря широкополосности (рис. 6) антенны, установленной в безэховой камере и стабильности фазового центра в широкой полосе частот, такая малогабаритная безэховая камера может работать в широком диапазоне частот от 1 ГГц до 6 ГГц.

В этом случае методика измерения шумовых характеристик реализуется так, что мощность, излучаемая шумовой трубкой, вводимая в камеру с помощью антенны «Бабочка», стоящей в верхней части малогабаритной безэховой камеры (рис. 9), принимается испытуемой активной антенной, и далее складывается с тепловыми шумами входного транзисторного СВЧ усилителя, с учетом диаграммы направленности антенной системы активной антенны.

При оценке шумовых свойств антенного тракта должны учитываться все источники флуктуаций. Они влияют на такую обобщенную характеристику, как эффективная температура антенны, показывающую дополнительный шумовой вклад в антенный тракт. Очевидно, что эффективная температура антенны зависит от её диаграммы направленности (рис. 10) и тепловых потерь.

Измеритель коэффициента шума рассчитывает коэффициент шума, который является наиболее универсальной и широко распространенной характеристикой для сравнения шумовых свойств систем и устройств.

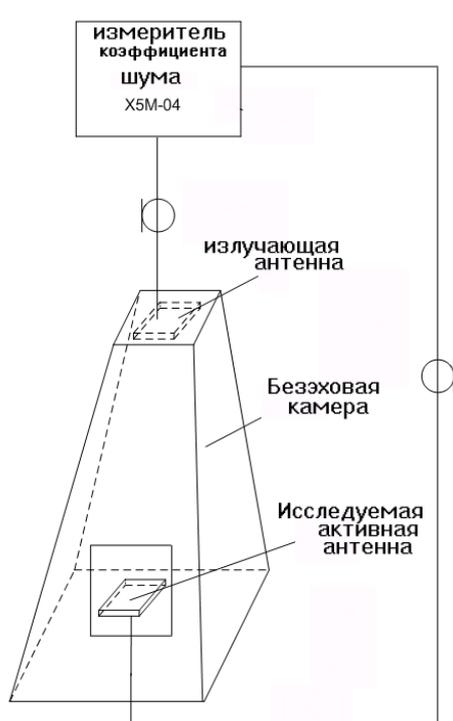


Рис. 9. Схема измерения коэффициента шума "на проход" активной антенны

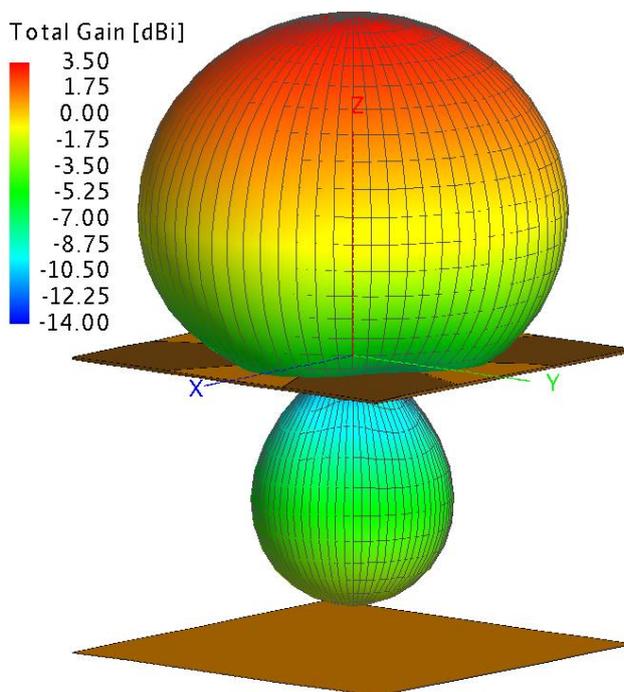


Рис. 10. Трехмерная диаграмма направленности антенны «Бабочка»

В измерителе коэффициента шума на входе испытуемого четырехполосника воздействует калиброванный шум (шумовая трубка) и измеряется коэффициент шума [5]:

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.г.вых}}, \quad (9)$$

где:

$P_{ш.вых}$ – мощность на выходе при воздействии всех причин влияния шума,

$P_{ш.г.вых}$ – мощность шума на выходе, определяемая только мощностью генератора шума на входе (при идеализации исследуемой активной антенны).

Таким образом, такая схема измерения коэффициента шума "на проход" может использоваться для тестирования и исследования активных спутниковых антенн.

Выводы. Были рассмотрены различные способы возбуждения структуры четырехпортовой антенны «Бабочка», состоящей из четырех вибраторов с отдельным питанием. Показано, как излучающая часть антенны объединяется с неизлучающей схемой (чипом, усилителем) и рассчитываются характеристики многопортовой активной антенны.

Рассмотренный подход позволяет выполнить электродинамический анализ многопортовых систем с учетом электродинамической связи отдельных частей структуры и с учетом частотных зависимостей чипов и дискретных элементов, включенных в структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курушин А. А. Моделирование излучающих многопортовых СВЧ-структур / А. А. Курушин // Современная электроника. – 2014. – № 7. – С. 70-73.
2. Банков С. Е. Расчет квадрифилярной антенны / С. Е. Банков, А. Г. Давыдов, А. А. Курушин // Современная электроника. – 2007. – № 7. – С. 54-57.
3. Банков С. Е. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ устройств с использованием FEKO / С. Е. Банков, А. Н. Грибанов, А. А. Курушин. – Москва, СОЛОН_Пресс, 2018. – 423 с.
4. Ultra-Small Ceramic Power Splitter/Combiner. – Текст : электронный. – URL: <http://www.minicircuits.com> (дата обращения: 10.05.2019).
5. Патент на полезную модель № 143511 Российская Федерация. Малогабаритная безэховая камера : № 2014113851 : заявл. 09.04.2014 : опубл. 23.06.2014 / Вьюгин П. А., Герасимов А. С., Давыдов А. Г., Курушин А. А., Матвеев С. В., Сычов А. А. – 2 с.

Поступила в редакцию 04.11.2019 г.

MODELING OF MULTIPOINT ANTENNAS

A.A. Kurushin

Simulation of a four-port antenna type "Butterfly" shown as example of modeling multipoint radiating microwave structures. Integrated multipoint antenna is supplied with help non-radiating circuits, power dividing and phase. The experiment confirmed the validity of calculations performed using the commercial CAD FEKO.

Keywords: Microwave structure, Butterfly antenna, anechoic chamber, polar pattern, antenna matching, noise figure.

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», консультант ЗАО НПП «Родник» - официального дистрибьютера САПР СВЧ в РФ, Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», consultant of JSC NPP "Rodnik" - the official distributor of microwave CAD in the Russian Federation, Russian Federation Moscow.

И Н Ф О Р М А Т И К А , В Ы Ч И С Л И Т Е Л Ь Н А Я
Т Е Х Н И К А И У П Р А В Л Е Н И Е

УДК 004.422.86

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО
ТРАНСПОРТА В ГОРОДЕ ДОНЕЦКЕ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО МОБИЛЬНОГО
ПРИЛОЖЕНИЯ

© 2019 *М.В. Бабичева, А.В. Бааджи*

Рассмотрены возможные методы определения местоположения общественного транспорта в городе для разработки мобильного приложения. Выбрано оптимальное, с точки зрения себестоимости и простоты реализации, решение для муниципального транспорта города Донецка.

Ключевые слова: Отслеживание движения транспорта, HLR-запросы, GPS - трекер, Донецкая Народная Республика, проектирование.

Введение. В последнее время наблюдается тенденция к разработке мобильных приложений, позволяющих отслеживать движение коммунального транспорта – муниципальных автобусов, троллейбусов и трамваев, а также частных перевозчиков. Современная система трекинга транспорта состоит из модуля определения координат, канала к серверу и самого сервера для сбора, хранения и обработки информации. Разработка систем геолокации для определения местоположения общественного транспорта, требует специальных методологических, алгоритмических и программных средств. В рамках этих средств необходимо оптимальным образом учитывать характер методов определения местоположения, а также специфику реализуемых целевых функций и используемого технического обеспечения, а также диктуемые ими ограничительные условия. По существу, речь идет о необходимости внедрения новых гибких технологий, представляющих собой альтернативу «обычному расписанию» городского транспорта.

Постановка задачи. Целью работы является анализ специфических особенностей существующих методов определения местоположения общественного транспорта и выбор оптимального решения для города Донецка. Результаты предполагается использовать в разработке мобильного приложения для трекинга транспорта.

Существующие алгоритмы геолокации. Чтобы определить местоположение пользователя (телефона), можно использовать несколько способов:

- по GPS/ГЛОНАСС. Способ наиболее точный. Из недостатков: относительно долгий старт, потребляет много энергии.
- по вышкам оператора. Средний по точности. Энергии потребляет немного. Из минусов: не на всех телефонах доступны данные.
- по IP. Наименее точный. Собственно, это самый большой минус.
- по СВ-сообщениям оператора

Рассмотрим каждый из них.

По СВ-сообщениям оператора. Примерное местоположение мобильного телефона можно установить посредством направления к нему HLR-запроса через СМС-центр. Такой запрос позволит получить сведения о расположении коммутатора (не телефона), в зоне действия которого осуществляется использование телефона, а также сведения о его статусе (аппарат включен или выключен на момент проверки). База данных, Домашний регистр местоположения (home location registry или HLR) содержит информацию обо всех абонентах, приписанных к нему. Найдя абонента в одной из HLR, сотовая сеть перенаправляет вызов на связанный с ним Центр коммутации (Mobile switching centre или MSC), тот в свою очередь запрашивает информацию у Гостевого регистра местоположения (VLR), который содержит данные о последней базовой станции, к которой подключался мобильный телефон. После чего контроллер базовых станций (Base station controller или BSC) связывается с базовыми станциями в рамках переданного LAC, и звонок направляется на нужную соту (Cell-ID или CID) [3].

Недостаток данного способа: HLR-запрос даст нам весьма приблизительное местонахождение телефона и его владельца — всего лишь название города или региона. И даже получив такие данные, нельзя быть 100% уверенным, что устройство находится именно в выявленной зоне. Всеми виной особенности построения оператором своих телефонных сетей. В частности, ограниченное количество коммутаторов оператора Phoenix в Донецке не позволит уверенно обозначить зону нахождения телефона и СМС-центр может найти его в Донецке даже, если он будет находиться в другом городе. В большинстве европейских стран, где коммутаторы установлены во всех областных центрах и крупных городах этот метод позволяет получить более точную информацию что, в свою очередь, позволяет организовывать контроль за перемещением любого мобильного телефона между коммутаторами.

По IP – адресу. Местоположение смартфона, как и компьютера, можно определить посредством установления и анализа его IP-адреса. Проверка IP-адреса позволяет найти город, в котором находится проверяемый гаджет.

Недостаток данного способа: в настоящий момент ни один из вышеуказанных сервисов не располагает абсолютно достоверной и максимально полной базой данных о местоположении IP-адресов. Значит и в этом случае существует вероятность не получить точную информацию.

По вышкам оператора. Самый надёжный способ поиска местоположения мобильных телефонов сосредоточен в руках телекоммуникационных компаний, данными которых пользуются правоохранительные органы. Речь идёт об установлении точного местоположения мобильного телефона посредством расчета триангуляции. Теперь зона, в которой находится абонент уже ограничивается не дальностью действия базовой станции, а симплексом между несколькими базовыми станциями (зачастую это треугольник, вершины которого заданы координатами базовых станций). При этом точность обнаружения мобильного телефона в городе достигает до 50 метров. Расчет триангуляции и установление местоположения по базовым станциям можно произвести вручную, используя базу данных о размещении вышек сотовых операторов связи.

По GPS/ГЛОНАСС. На сегодня, спутниковая навигация – наиболее точный способ определить местоположение. Достигается осведомленность посредством GPS – трекера, установленного в телефоне или отдельного GPS - трекера. Альтернативные способы определить местоположение по координатам базовых станций или WiFi точек доступа уступают в точности, которая сразу падает до нескольких сотен метров. На сегодня такой подход разумен только в двух случаях: устройство не имеет модуля спутниковой навигации или имеет низкий уровень заряда аккумулятора.

GPS – трекер. Многие компании предоставляют услуги «трекинга», продажи GPS – трекеров и для автомобилей в том числе. Цены на такие «полноценные» устройства начинаются от 3000 российских рублей (рис 1,2).

Маршрутная сеть Донецкой Народной Республики насчитывает 64 пригородных, 62 междугородных и 39 международных автобусных маршрутов общего пользования, пролегающих как по территории Донецкой Народной Республики, так и за её пределами. Маршрутная сеть автомобильного пассажирского транспорта общего пользования городов Донецкой Народной Республики насчитывает 267 маршрутов. Маршрутная сеть городского электрического транспорта городов Донецкой Народной Республики насчитывает 36 маршрутов (троллейбусных маршрутов – 21, трамвайных – 15) [1].



Рис. 1. GPS - трекер CARGO Light, цена 3000 руб.

В распоряжении коммунального предприятия администрации города Донецка «Донэлектротранс» находится маршрутная муниципальная сеть города Донецка, которая состоит из 11 троллейбусных маршрутов, 9 трамвайных маршрутов и 9 автобусных маршрутов. Подвижной состав парка насчитывает 368 единиц муниципального транспорта [2].

Произведем расчеты стоимости затрат предполагаемую на покупку GPS - трекеров, исходя из официальных данных на сайте МинТранс ДНР. Рассчитаем стоимость покупки для коммунального предприятия «Донэлектротранс»:

$$368(\text{ед}) * 3000(\text{руб}) = 1\,104\,000(\text{руб}).$$

Эта сумма касается только предприятия «Донэлектроавтотранс», которое в свою очередь обслуживает всего лишь 29 маршрутов. Напомним, что общее кол-во маршрутов в городе Донецке равняется 267. Исходя из этих огромных затрат целесообразно отказаться от отдельного GPS – трекера, в пользу GPS – трекера, встроенного непосредственно в смартфон водителя.



Рис. 2. GPS - трекер ГдеМои OBD2 «A2», цена 6500 руб.

Выводы. Проведенные исследования продемонстрировали обоснованность и перспективность существующих методов обнаружения местоположения мобильного телефона. Для разрабатываемого мобильного приложения наиболее предпочтительным является метод GPS, с трекером, встроенным непосредственно в смартфон. Однако требуются дополнительные эксперименты по измерению уровня сигнала, необходимого для определения местоположения телефона в большом городе, каким является Донецк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильный транспорт // Министерство транспорта Донецкой Народной Республики : официальный сайт. – 2020. – URL: <http://donmintrans.ru/deyatelnost/avtomobilnyj-transport> (дата обращения: 25.09.2019).
2. Муниципальный транспорт // Министерство транспорта Донецкой Народной Республики : официальный сайт. – 2020. – URL: <http://donmintrans.ru/deyatelnost/avtomobilnyj-transport> (дата обращения: 25.09.2019).
3. По следам мобильного телефона. Геолокация с помощью сотовой сети // Мега Фон : блог компании. – Текст : электронный. – URL: <https://habr.com/ru/company/megafon/blog/167905/> (дата обращения: 25.09.2019).
4. Namiot D. On Open Source Mobile Sensing / D. Namiot, M. Sneps-Sneppe // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems : 14th International Conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014, St. Petersburg, Russia, August 27-29, 2014. Proceedings : conference proceedings. – [St. Petersburg] : Springer International Publishing, 2014. – С. 82-94.

Поступила в редакцию 21.10.2019 г.

**METHODS TO DETERMIN OF THE PUBLIC TRANSPORT LOCATION FOR TRANSPORT
MOBILE APPLICATION IN DONETSK CITY**

M.V. Babicheva, A.V. Baadzhi

Possible methods for determining the location of public transport in the city for the development of a mobile application are considered. The optimal solution for municipal transport in the city of Donetsk was selected from the point of view of cost and implementation.

Keywords: Vehicle tracking, HLR queries, GPS tracker, Donetsk People's Republic, design

Бабичева Маргарита Вадимовна

ст. преподаватель кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: m.v.babicheva60@gmail.com

Babicheva Margarita Vadimovna

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Бааджи Антон Викторович

студент кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: baadzhianton@gmail.com

Baadzhi Anton Viktorovich

Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 681.518, 004.896

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

© 2019 *А.Л. Корнев, Д.В. Мухарский*

Предложена информационная система для управления городской инфраструктурой, домом и тепличным хозяйством. Система апробирована на различных уровнях: от компонентов умного города и дома до автоматизированной теплицы. Показана экономическая эффективность использования решений автоматизации для протяженных и распределенных объектов управления.

Ключевые слова: информационная система, умные устройства, интернет вещей, облачная платформа, контейнеры, умный город.

Введение. Компьютерные сети, мобильная и проводная связь обеспечили пользователям неограниченный доступ к данным и технологиям их обработки. Новая промышленная революция, Индустрия 4.0, позволяет создавать умные дома, заводы и города, объединяя физические и виртуальные миры с измерительными устройствами и электромеханическими приводами [1-3]. Как ответ на технологические вызовы в большинстве развитых стран мира и крупных городских агломерациях на законодательном уровне приняты программы цифровизации [4]. Дополнительным фактором, стимулирующим деловую активность, является снижение стоимости оборудования и сложности программного обеспечения. Облачные сервисы значительно упрощают процесс создания новых программных услуг и продуктов. Одним из важнейших компонентов систем автоматизации и измерительных комплексов являются умные устройства (smart things or devices), объединенные в интернет вещей (IoT, Internet of Things) и включающие датчики, электромеханические приводы или исполнительные механизмы, а также драйвера устройств, микроконтроллеры (МС), микропроцессоры и сетевые модули связи.

Основная часть. Современному состоянию умных технологий в городских агломерациях посвящены монографии, статьи и обзоры [5 - 9]. Интеллектуальным ядром технологий цифровизации является информационная система (ИС). Для реализации концепции управления городской инфраструктурой и умного дома была разработана информационная система, позволяющая собирать, обрабатывать и анализировать данные с различных устройств, формировать рекомендации для принятия решений и отдавать команды объектам управления.

Архитектура ИС, представленная на рис. 1, состоит из различных взаимодействующих слоев и модулей программного обеспечения.

На низшем уровне система может интегрировать различные устройства: датчики, исполнительные механизмы, микроконтроллеры и сетевые модули связи путем использования драйверов и брокера сообщений. Функционал управления устройствами включает в себя контроль за устройством и доступом к нему, состоянием соединения, передачей данных и качеством сервиса (QoS). Контроль устройства включает данные о конфигурации для каждого устройства и соединения. Контроль доступа – это управление правами доступа для отправки или получения сообщений. Функции проверки соединения и данных служат для поддержки полезной нагрузки в каналах передачи данных, перенаправления потоков на другие уровни или модули по мере необходимости и обнаружения неверных или пропущенных значений.

Параметры качества сервиса (QoS) позволяют выбрать оптимальные уровни обслуживания канала связи в соответствии с требованиями клиентских приложений. Если датчик использует крайне ненадежное мобильное соединение в движущемся транспортном средстве, то устанавливается более высокое значение параметра QoS для гарантии прохождения данных. Для датчиков, работающие в зоне надежного приема, могут быть выбраны более низкие значения параметра QoS.



Рис. 1. Архитектура облачной платформы IoT

Слой сети обеспечивает связь устройств через коммуникационные шлюзы с компонентами промежуточного слоя (Middleware) в облаке с использованием как различных технологий проводной и беспроводной связи: TCP/IP, WiFi, ZigBee, Bluetooth, 2G/3G/4G/5G, LoRa, так и различных протоколов обмена данными: MQTT, AMPQ, CoAP.

В промежуточном слое компоненты представлены в виде микросервисов или контейнеров. Такая конфигурация легко разворачивается на облачной платформе. Процессы запускаются изолированно с фиксированными параметрами памяти и скорости по сети, а также с возможностью приостанавливать и возобновлять выполнение микросервиса (контейнера). Важнейшим из модулей является сервисная шина сообщений (ESB), которая управляет процессом передачи сообщений, очередью, адресами и др. Взаимодействие компонентов строится на основе сервисно-ориентированной архитектуры (Service Oriented Architecture, SOA) и интернет протоколов для передачи данных (Http, WebSocket, REST). Облачная платформа включает различные способы хранения и обработки данных. Возможно использовать как традиционные реляционные базы данных (RDMS), основанные на языке структурированных запросов SQL, так и не SQL (NoSQL) базы данных и озера данных

(Data Lake). Последние позволяют оптимально хранить как потоковую в реальном режиме времени, так и статическую информацию. Интеллектуальным ядром промежуточного слоя является модуль анализа данных, основанный на методах машинного обучения и искусственного интеллекта.

Безопасность является одной из ключевых характеристик информационной системы. Функции безопасности - это управление доступом и идентификацией, безопасность облачного, серверного и клиентского программного обеспечения и оборудования. Управление доступом охватывает все аспекты идентификации пользователей и доступом к услугам IoT. Пользовательский доступ контролирует авторизованных пользователей и уровни доступа к сервисным компонентам. Учетные записи и пароли хранятся в зашифрованном виде. Управление ключами и сертификатами осуществляется в автоматическом режиме. Управление идентификацией и защита хранимых данных и их передачи осуществляется с помощью криптографических протоколов. Серверное программное обеспечение управляет безопасностью жизненного цикла личных и защищенных данных, охватывая конфиденциальность, целостность и доступность данных в статическом состоянии, в потоковой передаче и в использовании сервисом. Безопасность устройств позволяет обнаруживать и предпринимать действия в отношении подмены или кражи устройств, своевременно выделять несанкционированные действия.

Слой сервиса предоставляет доступ к услугам IoT через взаимодействие с компонентами и контейнерами промежуточного слоя. Клиентские приложения обеспечивает целостность данных и метаданных, включая анализ и извлечение данных, находящихся на облачной платформе и хранение параметров сессии.

Информационная система позволяет управлять разнообразными сервисами умного города – см. рис. 2. Важнейшим среди которых является обеспечение безопасности с помощью мониторинга городской инфраструктуры сетью видеочамер и интеллектуальных датчиков. При этом, обмен данными может осуществляться по каналам мобильной или проводной связи.



Рис. 2. Сервисы умного города

Мониторинг окружающей среды служит для повышения экологической безопасности, предотвращения стихийных бедствий и улучшения охраны природных ресурсов.

Важнейшей элементом городского хозяйства является эффективное управление электро- и тепловой энергией, водными и газораспределительными ресурсами, а также своевременное обнаружение и ликвидация аварий на сетях.

Информационная система позволяет извлекать и анализировать данные из сторонних систем управления социальными услугами: здравоохранением, образованием, культурой и досугом.

Анализ транспортной инфраструктуры города может использовать систему видеонаблюдения, датчиков движения, метеодатчиков для управления дорожным движением и парковкой. Данные о дорожной обстановке в режиме реального времени могут передаваться для городских служб и водителей через мобильное приложение.

Информационная система успешно апробирована на различных уровнях: от компонентов умного города и дома до автоматизированной теплицы или оранжереи, см. рис. 3.

Так система мониторинга теплицы включала датчики влажности и температуры почвы и воздуха, освещенности, кислотности (Ph), химического состава, а также видеонаблюдение за внешним видом растений. Под управлением системы находились капельный полив, подкормка микроэлементами с помощью дозатора, поддержка микроклимата и подсветка помещения.

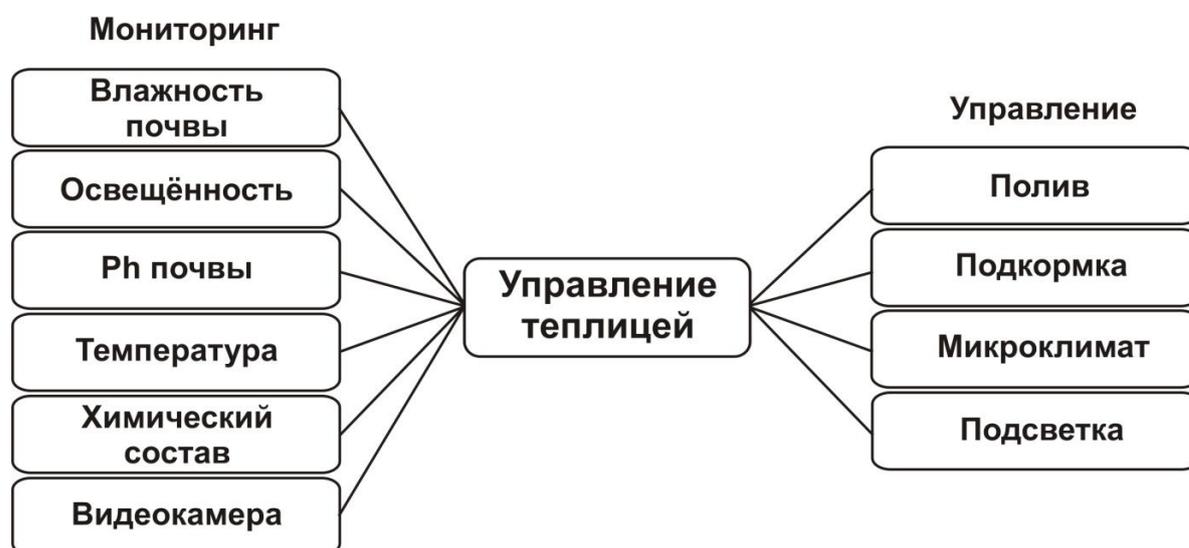


Рис. 3. Управление теплицей

Экономический эффект применения умных теплиц в сравнении с теплицами с преимущественно ручным обслуживанием изображен на рис. 4. В затраты на разворачивание и обслуживание умной теплицы включены расходы на материалы и оборудование, сервис и заработную плату в течении года при сборке и эксплуатации теплиц разной площади в фермерском хозяйстве. В затраты на разворачивание и обслуживание не автоматизированной теплицы учтены аналогичные расходы. Относительные затраты представляют собой отношение затрат на разворачивание и обслуживание умной теплицы к аналогичным затратам теплицы с ручной обработкой.

Для теплиц малых площадей менее 250 м² издержки на умную теплицу превышают затраты на теплицу с ручным обслуживанием аналогичной площади, т. е. относительные затраты превышают единицу. Однако с ростом площади теплицы ручной труд становится неэффективным, и даже высокие начальные траты на автоматизацию окупаются в течении года. Заметим, что в оценке на длительный срок – больше года, необходимо учесть неизбежные сервисные затраты на обслуживание средств автоматики и расходные материалы.

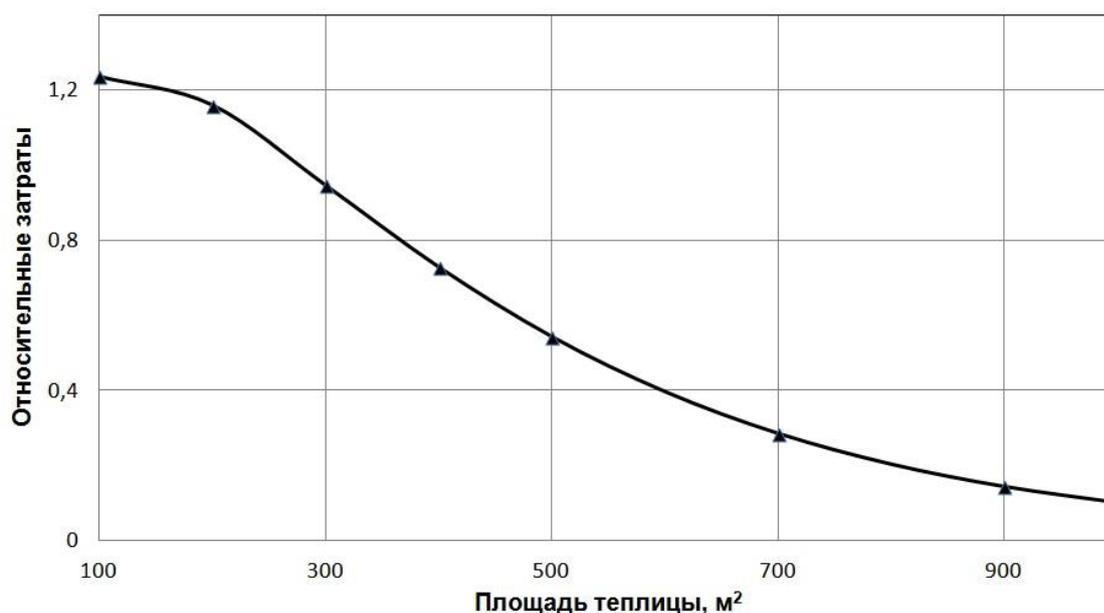


Рис. 4. Зависимость относительных затрат от площади теплицы

Информационные системы и средства автоматизации имеют широкую перспективу в управлении оранжереями и зимними садами в жилищных комплексах и индивидуальных усадебных хозяйствах. Расположение оранжереи или зимнего сада на крыше здания создает позитивный эмоциональный фон, обеспечивает эффективное использование свободной площади и при автоматическом управлении не требует постоянного ежедневного обслуживания.

Выводы. Предложена информационная система для управления городской инфраструктурой, домом и тепличным хозяйством. Система апробирована на различных уровнях: от компонентов умного города и дома до автоматизированных теплиц. Показана экономическая эффективность использования решений автоматизации для протяженных и распределенных объектов. Намечены перспективные направления дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологии создания интеллектуальных устройств, подключенных к Интернет / А. В. Приемышев, В. Н. Крутов, В. А. Трейль, О. А. Коршакова. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 100 с.
2. Кранц М. Интернет вещей. Новая промышленная революция / М. Кранц. – Москва : Эксмо, 2018. – 336 с.
3. Шваб К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – Москва : Эксмо, 2019. – 208 с.
4. E-Governance for Smart Cities. Advances 21st Century Human Settlements / Editor T. M Vinod Kumar. – Springer, 2015. – 390 p.
5. Al-Turjman F. Intelligence in IoT-enabled smart cities / Fadi Al-Turjman. – CRC Press, 2019. – 230 p.
6. Handbook of Smart Cities: Software Services and Cyber Infrastructure / Editors : M. Maheswaran, E. Badidi. – Springer, 2018. – 408 p.
7. Smart City Networks : Through the Internet of Things / Edited S. Th. Rassia, P. M. Pardalos. – Springer, 2017. – 227 p.
8. Романчук С. М. Направления развития городских АСУ ТП водоснабжения и водоотведения / С. М. Романчук // Научные труды ДонНТУ. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 131-138.
9. Naughian B. Design, launch, and scale IoT services / B. Naughian. – Apress, 2018. – 274 p.

Поступила в редакцию 25.10.2019 г.

AN INFORMATION SYSTEM FOR MEASUREMENT COMPLEXES
AND INTERNET OF THINGS (IoT)

A.L. Kornev, D.V. Mukharsky

An information system for the management of urban infrastructure, home and greenhouse facilities is proposed. The system has been tested at various levels: from components of smart city and smart home to an automated greenhouse. The business efficiency of automation solutions for extended and distributed objects is shown.

Keywords: informational system, smart things, internet of things, cloud platform, containers, smart city

Корнев Анатолий Леонидович

кандидат физико-математических наук, пригл. асоц. профессор кафедры информатики КГУ им. Ш.Уалиханова, Казахстан, Кокшетау.
E-Mail: entapp@ro.ru

Kornev Anatoly Leonidovich

Candidate of phys. and math. Sciences, Visiting assoc. professor at the Department of Informatics of Kokshetau State University, Kazakhstan, Kokshetau.

Мухарский Дмитрий Васильевич

старший преподаватель кафедры информатики КГУ им. Ш.Уалиханова, Казахстан, Кокшетау.
E-Mail: amid@rambler.ru

Mukharsky Dmitri Vasilevich

Sr. Lecturer at the Department of Informatics of Kokshetau State University, Kazakhstan, Kokshetau.

УДК 004.67

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПЕРЕДАЮЩИЕ СРЕДЫ

© 2019 В.В. Данилов, В.И. Тимченко, И.А. Третьяков, В.А. Гмыря

В настоящей работе рассматриваются особенности прохождения плоской электромагнитной волны через передающие среды в рамках оптических информационных технологий, где электромагнитное поле является носителем информации, а электромагнитные волны его переносчиком.

Ключевые слова: оптические информационные технологии, электромагнитное поле, плоская электромагнитная волна, граница раздела диэлектриков.

Введение. В работах [1, 2] исследуется пространство, ограниченное двумя параллельными плоскостями на предмет поиска математического описания коэффициента передачи и импульсной характеристики. Так, предполагалось отсутствие препятствий на пути распространения электромагнитных волн. в работах [3, 4] рассмотрены основы физического описания процессов преобразования и переноса информация многомерными сигналами. В [5] для математического описания характеристики границы раздела вводится волновая матрица передачи (по аналогии с матрицей передачи в радиоэлектронике), содержащая соответствующие коэффициенты передачи и отражения. Данная работа является продолжением исследований [5] и посвящена прохождению плоской электромагнитной волны через передающие среды.

Прохождение плоской электромагнитной волны. Рассмотрим процесс падения плоской электромагнитной волны под углом γ_1 на плоскопараллельную пластинку шириной d (рис. 1). Задача состоит в определении поля по обе стороны от пластинки. Воспользуемся аналогиями электроники, представим пластинку как «четырёхполюсник» и определим матрицы передачи, что дает возможность найти коэффициенты отражения Γ и пропускания T пластинки, а затем, отраженную $U_0 = \Gamma U_n$ и преломленную $U_{np} = T U_n$ волны.

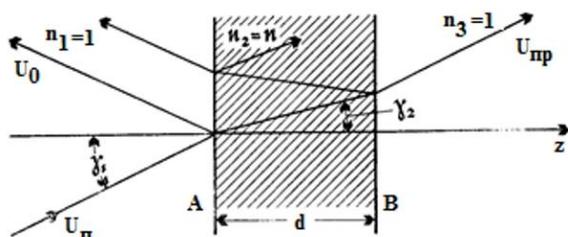


Рис. 1. Падающая, отраженная и преломленная волны в плоскопараллельной пластинке

распространение волны в пластинке на расстояние d . Обозначим A_1 и A_2 матрицы передачи первой и второй границ раздела, A_d - матрицу передачи слоя пространства шириной d , то матрица передачи пластинки будет равна произведению трех матриц:

Согласно представленной геометрии взаимодействия электромагнитной волны и пластины, происходит прохождение волной трех сред, перед пластиной, сама пластина, за пластиной. Пусть показатель преломления сред до и после пластины, приближенно равен 1, а в пластине, равен n . Для нахождения матрицы передачи, необходимо учесть условия на границах A и B пластинки с окружающей средой и

$A = A_1 A_d A_2$. Воспользовавшись представлением пространства ограниченного параллельными плоскостями в виде «четырёхполюсника», запишем $a_2 = a_1 e^{ink \cos \gamma_2 d}$; $b_1 = b_2 e^{ink \cos \gamma_2 d}$, тогда:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon^{ink \cos \gamma_2 d}, 0 \\ 0, \varepsilon^{ink \cos \gamma_2 d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}, \text{ и } A_d = \begin{pmatrix} \varepsilon^{ik'_z d}, 0 \\ 0, \varepsilon^{ik'_z d} \end{pmatrix},$$

где $k'_z = nk \cos \gamma_2$ проекция волнового вектора на ось z . Воспользуемся формулами из работы [5]:

$$A_{11} = 1/T_{12}. \tag{1}$$

$$A_{21} = \Gamma_{12}/T_{12}. \tag{2}$$

$$A_{12} = \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}} = A_{22}, \tag{3}$$

$$A_{22} = T_{21} + \frac{\Gamma_{12}^2}{T_{12}}. \tag{4}$$

Согласно (1-4), матрицы передачи можно представить в виде:

$$A_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{12}}, \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}} \\ \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}}, \frac{1}{T_{12}} \end{pmatrix}, A_2 = A^{-1}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{21}}, \frac{\Gamma_{21}}{T_{21}} \\ \frac{\Gamma_{21}}{T_{21}}, \frac{1}{T_{21}} \end{pmatrix},$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{12}}, \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}} \\ \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}}, \frac{1}{T_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon^{ik'_z d}, 0 \\ 0, \varepsilon^{ik'_z d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{21}}, \frac{\Gamma_{21}}{T_{21}} \\ \frac{\Gamma_{21}}{T_{21}}, \frac{1}{T_{21}} \end{pmatrix}.$$

Для нахождения коэффициента передачи, достаточно найти лишь один элемент A_{11} , который находится на пересечении первой строки и первого столбца. Обратная величина этого элемента и есть коэффициент передачи:

$$T = \frac{1}{A_{11}} = \frac{T_{12} T_{21}}{1 + \Gamma_{12} \Gamma_{21} \varepsilon^{2ik'_z d}} e^{ik'_z d} = \frac{1 - T_{12}^2}{1 - \Gamma_{12}^2 \varepsilon^{2ik'_z d}} e^{ik'_z d}. \tag{5}$$

По выражению $\Gamma = A_{21} T_{12}$, определяем коэффициент отражения, где A_{21} -

элемент матрицы A , находящийся на пересечении второй строки и первого столбца:

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{12} + \Gamma_{21} e^{2ik'_z d}}{1 + \Gamma_{12} \Gamma_{21} e^{2ik'_z d}} = \Gamma_{12} \frac{1 - e^{2ik'_z d}}{1 - \Gamma_{12}^2 e^{2ik'_z d}}. \quad (6)$$

Известно [6], что $|\Gamma|^2 + |\Gamma_{12}|^2 = 1$. При $z=0$, если на пластинку падает плоская

волна, ее можно представить в виде: $U_n = e^{i(k_x x + k_y y)}$. Пусть $k_y = 0$ (достигается ориентировкой оси координат), используя выражение (6), тогда отраженная волна

описывается в форме $U_0 = e^{ik_x x} \Gamma_{12} \frac{1 - e^{2ik'_z d}}{1 - \Gamma_{12}^2 e^{2ik'_z d}}$, или в виде ряда

$$U_0 = e^{ik_x x} \Gamma_{12} \left[1 - (1 - \Gamma_{12}^2) e^{2ik'_z d} + \dots \right].$$

Видно, что U_0 может быть представлено в виде бесконечно большого числа элементарных отраженных волн. Первая отраженная волна возникает в точках соприкосновения падающей волны с пластинкой, ее комплексная амплитуда

$U_{01} = e^{ik_x x} \Gamma_{12}$, а модуль равен $|\Gamma_{12}|$. Вторая отраженная волна

$U_{02} = -e^{ik_x x} \Gamma_{12} (1 - \Gamma_{12}^2) e^{2ik'_z d}$, которая смещена вдоль оси x на расстояние

$2d \operatorname{tg} \gamma_2$. При малых коэффициентах отражения ($|\Gamma_{12}| \ll 1$) ее интенсивность

$|U_{02}| \approx |\Gamma_{12}|$, такая же, как и первой волны. Интенсивности отраженных волн высших

порядков очень малы. Если на пластинку падает пучок света шириной, не превосходящей $2d \operatorname{tg} \gamma_2$, то при отражении от тонкой пластинки будут видны два пучка почти одинаковой интенсивности (рис. 2).

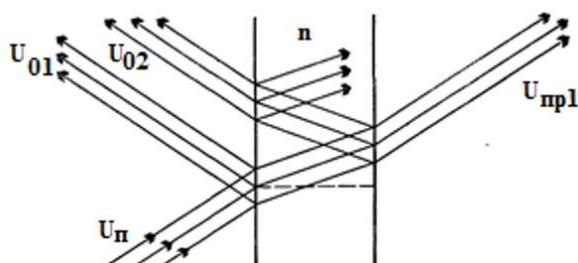


Рис. 2. Падение на плоскопараллельную пластинку ограниченного в пространстве волнового пучка

представим, как:

Преломленную волну находим, используя формулу (5)

$$U_{np} = e^{ik_x x} \frac{1 - \Gamma_{12}}{1 - \Gamma_{12}^2 e^{2ik'_z d}} e^{ik'_z d}.$$

Преломленную волну, можно представить в виде бесконечной суммы элементарных преломленных волн, причем первую преломленную волну

$$U_{np} = e^{ik_x x} (1 - \Gamma_{12}^2) e^{ik'_z d},$$

при малых Γ_{12} которую, можно представить в виде $U_{np} \approx e^{ik_x x} e^{ik_z' d}$. Остальные преломленные волны значительно меньше этой волны. Тогда необходимо отметить, что в первом приближении преломленная волна отличается от падающей только фазовым множителем $e^{ik_z' d}$, учитывающим набег фазы при распространении волны в пластинке. Выражение (6) показывает, что при больших Γ_{12} коэффициент отражения Γ может равняться нулю. При этом $2k_z' d = 2\pi m$, где $m = 1, 2, \dots$. Если обозначить $\Lambda = 2\pi / k_z'$, как длину волны пластинке, то получим $d = 0,5\Lambda m$, что говорит о том, что в направлении оси z , в пластинке, укладывается целое число полуволн

Плоская граница раздела. При падении плоской волны на плоскую границу раздела возникают плоские отраженная и преломленная волны. Исследуем процесс образования отраженной волны. В геометрии опыта, направим ось z перпендикулярно к плоскости раздела и найдем выражение для отраженной волны. Известно [6], что угол отражения равен углу падения, тогда отраженная волна распространяется в направлении движения падающей волны, при этом направление оси z изменяется на обратное (рис. 3). Другими словами, отраженная волна как бы является продолжением падающей, с измененным направлением оси z . Выберем начало координат на поверхности раздела. Тогда $U_n = e^{ik_x x + ik_y y + ik_z z}$. Так как на поверхности раздела $U_0 = \Gamma_{12} U_n = e^{ik_x z + ik_y y}$, то для произвольной точки $U_0 = \Gamma_{12} e^{ik_x x + ik_y y + ik_z z}$, где Γ_{12} - коэффициент отражения от границы раздела.

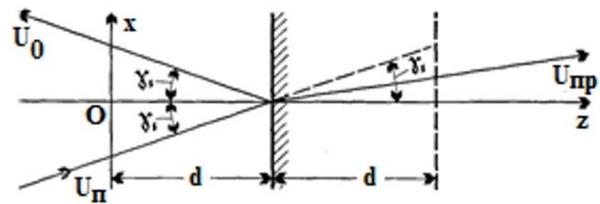
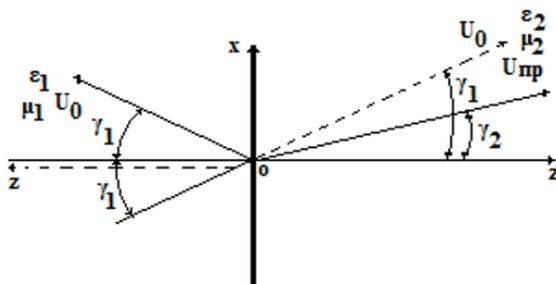


Рис. 3. Отражение и преломление волн на плоской границе раздела двух сред

Рис. 4. К определению коэффициента отражения от плоскости $z = 0$

Исследуем вариант, когда начало координат не лежит на поверхности раздела, а находится на некотором расстоянии от нее (рис. 4). Сделаем допущение, что нам известно поле падающей волны в плоскости $z = 0$: $U_n(x, y, z) = e^{ik_x z + ik_y y}$.

Находим поле отраженной волны в этой плоскости. Для получения отраженной волны, изменим амплитуду падающей в Γ_{12} раз и учтем ее перемещение на расстояние $2d$. Тогда для поля отраженной волны в плоскости $z = 0$ получаем:

$$U_0(x_1, y_1, z_1) = \Gamma_{12} e^{ik_x x + ik_y y + ik_z 2d}$$

Отношение отраженной волны к падающей в плоскости $z=0$ назовем коэффициентом отражения Γ в этой плоскости. Следовательно:

$$\Gamma = \Gamma_{12} e^{ik_z 2d}.$$

Если на плоскую границу раздела падает не идеальная плоская волна, интенсивность которой одинакова во всех точках пространства, а волновой пучок, занимает ограниченную область, то необходимо учесть, что при отражении происходит смещение пучка вдоль осей координат x и y (рис. 5).

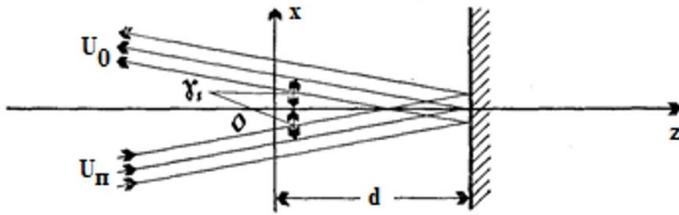


Рис. 5. Смещение волнового пучка при отражении от плоской границы раздела двух сред

Введем обозначение огибающей пучка $U_{огиб}$. Примем расстояние d настолько малым, что при распространении электромагнитной волны на нем, огибающая не изменяется. Для волнового пучка

$$U_0 = U_{огиб}(x, y) e^{ik_x x + ik_y y + ik_z z}.$$

Для нахождения коэффициента отражения, необходимо учесть:

- набег фазы между плоскостями $z=0$ и $z=d$ ($k_2 d = kd \cos \gamma_1$);
- отражение от границы раздела (Γ_{12});
- смещение пучка вдоль осей x и y .

На рис. 6 показаны падающая и отраженная волны, а также углы между падающей волной и осями координат. Согласно приведенной геометрии, пучок смещается вдоль оси x на расстояние $2d_1$, и вдоль оси y на $2d_2$. Так как $AB = \frac{d}{\cos \gamma}$,

то $d_1 = AB \cos \alpha = d \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma}$; $d_2 = AB \cos \beta = d \frac{\cos \beta}{\cos \gamma}$. Для отраженного пучка в плоскости $z=0$ получаем

$$U_0 = U_{огиб}(x-2d_1, y-2d_2) e^{ik_x(x-2d_1) + ik_y(y-2d_2) + i2dk_z}.$$

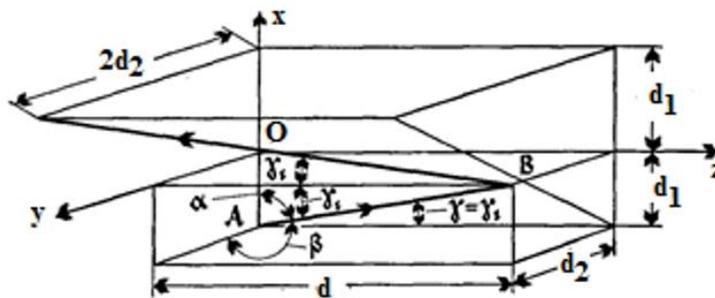


Рис. 6. Падающая и отраженная волны в прямоугольной системе координат

Если расстояние d и угол γ малы, то смещением пучка можно пренебречь. Значение для практики представляет случай, когда плоская граница раздела двух сред не перпендикулярна к оси z' , а расположена под некоторым углом γ' к ней (рис. 7).

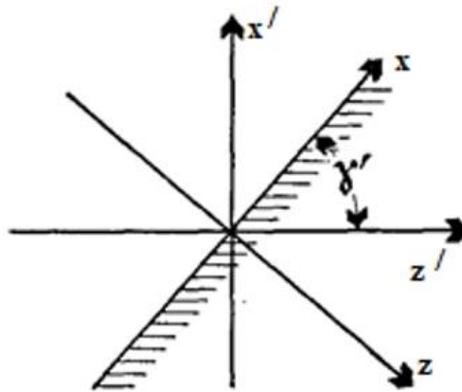


Рис. 7. Вариант взаимодействия когда граница раздела двух сред, не перпендикулярная к оси z'

Предположим, что граница раздела параллельна оси y и проходит через начало координат. Если оси x и z связать с границей раздела (рис. 3), то необходимо ввести новые координаты x' и z' , повернутые относительно прежних на угол $\pi/2 - \gamma'$: $x = x' \sin \gamma' + z' \cos \gamma'$; $z = -x' \cos \gamma' + z' \sin \gamma'$. Падающую и отраженные волны в новых координатах представим в виде:

$$U_{II} = e^{ik(x' \sin \gamma' + z' \cos \gamma') \cos \alpha + ik y \cos \beta + ik(-x' \cos \gamma' + z' \sin \gamma') \cos \gamma},$$

$$U_0 = U_{12} e^{ik(x' \sin \gamma' + z' \cos \gamma') \cos \alpha + ik y \cos \beta - ik(-x' \cos \gamma' + z' \sin \gamma') \cos \gamma}.$$

В плоскости $z' = 0$:

$$U_{II} = e^{ikx' \sin \gamma' \cos \alpha + ik \cos \beta - ikx' \cos \gamma' \cos \gamma},$$

$$U_0 = U_{12} e^{ikx' \sin \gamma' \cos \alpha + ik \cos \beta + ikx' \cos \gamma' \cos \gamma},$$

а коэффициент отражения будет равен:

$$\Gamma = \frac{U_0}{U_n} \Gamma_{12} e^{2ikx' \cos \gamma' \cos \gamma},$$

где γ - угол падения. Итак, если считать, что волна отражается от плоскости $z' = 0$, то коэффициент отражения Γ будет функцией x' . Система координат x', z' была введена временно, чтобы получить нужное выражение для коэффициента отражения. В дальнейшем вместо x' и z' будем использоваться написание x и z . Введем новые углы: α_1 - угол между падающей волной и осью z и β_1 - угол между поверхностью раздела и осью x (рис. 8). Тогда, $\gamma' = \frac{\pi}{2} - \beta_1$, $\gamma = \alpha' - \beta'$, и следовательно,

$$\Gamma = \Gamma_{12} e^{2ikx \sin \beta' \cos(\alpha' + \beta')}.$$

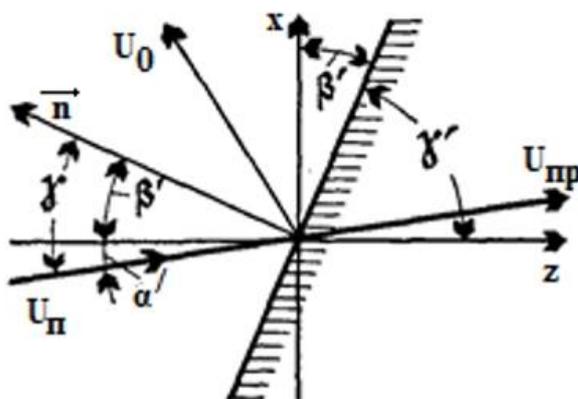


Рис. 8. Поворот осей координат и переход к не штрихованной системе

Обычно угол β мал. В параксиальном приближении угол α' также мал. В этом случае коэффициент отражения не зависит от угла падения α' и равен:

$$\Gamma = \Gamma_{12} e^{2ikx\beta}. \quad (7)$$

Выводы. В данной работе рассмотрены особенности прохождения плоской электромагнитной волны через передающие среды. Носителем информации в оптических информационных технологиях является электромагнитное поле, электромагнитные волны которого, распространяются в неоднородной среде. Наиболее простым является случай, когда электромагнитные волны переходят из одной среды в другую с плоской границей раздела между ними.

Установлено, что в первом приближении преломленная волна отличается от падающей только фазовым множителем $e^{ik'z'd}$, учитывающим набег фазы при распространении волны в пластинке

Если на плоскую границу раздела падает не идеальная плоская волна, интенсивность которой одинакова во всех точках пространства, а волновой пучок, занимает ограниченную область, обоснована необходимость учета при отражении смещения пучка вдоль осей координат x и y (рис. 5).

Установлен вид коэффициента отражения при взаимодействии электромагнитной волны с границей раздела двух сред не перпендикулярной к оси ее распространения (7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гмыря В. А. Оптические информационные технологии, инвариантные системы / В. А. Гмыря, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – № 1. – С. 37-46.
2. Гмыря В. А. Оптические информационные технологии. Импульсная характеристика / В. А. Гмыря, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 23-35.
3. Данилов В. В. Оптические информационные технологии. Спектральное представление сигналов / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 36-44.

4. Данилов В. В. Оптические информационные технологии. Дифракция электромагнитных волн / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 36-44.
5. Данилов В. В. Оптические информационные технологии. Прохождение носителя информации через передающие среды / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков, В.А. Гмыря // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 31-37.
6. Ярив А. Введение в оптическую электронику / А. Ярив. – Москва : Высшая школа, 1983. – 398 с.

Поступила в редакцию 01.11.2019 г.

OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES. FEATURES OF THE PASSAGE OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE THROUGH TRANSMISSION MEDIA

V.V. Danilov, V.I. Timchenko, I.A. Tretiakov, V.A. Gmyrya

In this paper, we consider the features of the passage of a plane electromagnetic wave through transmitting media in the framework of optical information technologies, where the electromagnetic field is the carrier of information, and electromagnetic waves are its carrier.

Keywords: optical information technologies, electromagnetic field, plane electromagnetic wave, dielectric interface.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Тимченко Владимир Иванович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: vlitim@mail.ru

Timchenko Vladimir Ivanovich

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Третьяков Игорь Александрович

заведующий учебной лабораторией кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: es75i@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Head of laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk

Гмыря Валерия Александровна

студентка кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: radiophysik99@mail.ru

Gmyrya Valeria Aleksandrovna

Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 004.932

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

© 2019 М.В. Бабичева, А.С. Юрченко

Предложен уникальный алгоритм обработки изображений отпечатков пальцев с программной реализацией, начиная от получения изображения со сканера, и заканчивая распознаванием отпечатка. На каждом этапе произведен выбор метода, с экспериментальным обоснованием. Обобщены результаты предыдущих исследований авторов. Проведено тестирование метода на реальных отпечатках.

Ключевые слова: биометрия, аутентификация, отпечатки пальцев, обработка изображений, Matlab Image Processing.

Этапы обработки изображения отпечатка пальца. Для автоматизации обработки и распознавания отпечатка пальца предложен следующий общий алгоритм:

- 1) Получение отпечатка со сканера
- 2) Предварительная обработка изображения
- 3) Выделение особых точек
- 4) Распознавание отпечатка

Каждый этап может быть реализован при помощи различных аппаратно-программных средств. В процессе работы были протестированы имеющиеся алгоритмы, на отдельных этапах предложены собственные, отобраны алгоритмы, показавшие наилучшие результаты. Программная реализация проводилась в среде Matlab Image Processing. Выбор осуществлялся, как посредством визуализации результатов обработки, так и посредством расчета уровней контраста и интенсивности пикселей.

Получение отпечатка и предварительная обработка. Из аппаратных средств имелись в наличии: сканер Microsoft 1033 и самодельный сканер отпечатков на основе непосредственно оптического сканера DY50_MAIN_V3, платы Arduino UNO с микроконтроллером Atmega329 (рис 1.). Оба сканера показали хорошее качество сканов отпечатков, однако Microsoft 1033 оказался более удобным в работе, поэтому все эксперименты проводились со сканами отпечатков, снятых при помощи данного сканера.

Поступающее со сканера полноцветное изображение преобразовывается в полутоновое, затем производится улучшение, бинаризация и скелетизация. В таком виде изображение может быть передано на следующий этап. Основным недостатком, полученных со сканера изображений является низкая контрастность. Для изменения контрастности тестировались следующие методы: эйквализация гистограммы, контрастирование с гамма-коррекцией, поиск границ повышения контраста с использованием функции протяженности точек PSF, контрастно-ограниченная адаптивная эйквализация гистограммы. Визуальные результаты экспериментов представлены на рисунке 2, в таблице 1 приведены результаты вычисления уровня среднеквадратичной контрастности изображения [1]. Был выбран метод улучшения на основе вычисления уровня контраста изображения, который показал наилучшие результаты.

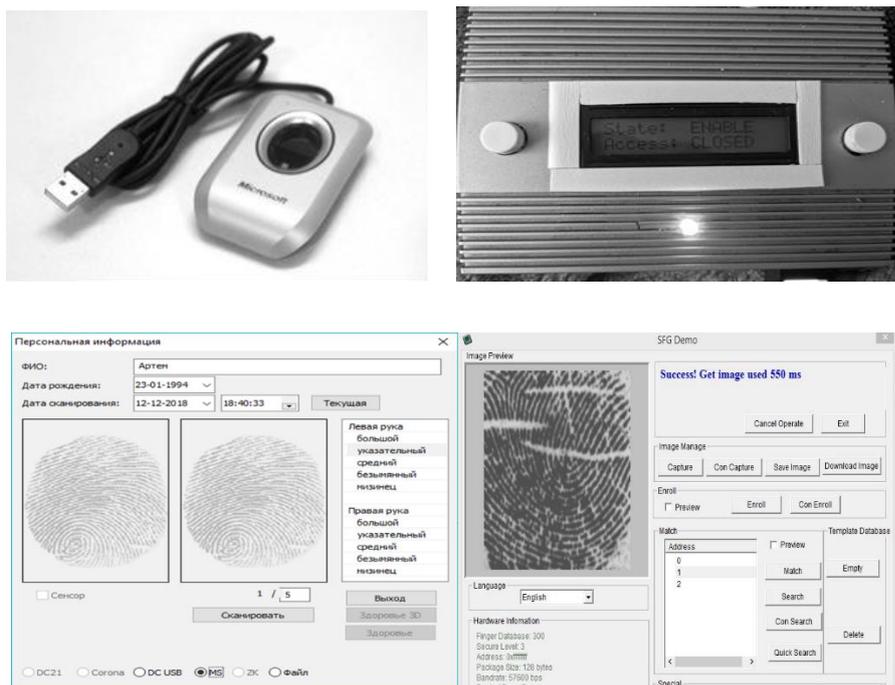


Рис. 1. Оптические сканеры отпечатков Microsoft 1033 и Y50_MAIN_V3 и их интерфейсы



Рис. 2. Изображения отпечатков, полученные различными методами улучшения (а-эйквализация гистограммы, б- контрастирование с гамма-коррекцией, в- поиск границ повышения контраста, г- контрастно-ограниченная адаптивная эйквализация)

Таблица 1. Результаты расчетов уровня контраста

Методы улучшения изображения	Контрастность
Выравнивание гистограммы	10,8071
Контрастирование с гамма-коррекцией	11,7923
Выделение краев с использованием функции протяженности точек	10,3203
Контрастно-ограниченная адаптивная эйквализация гистограммы	11,8002

Для бинаризации тестировались следующие методы: отсечением по порогу яркости, Отцу, Ниблейка и собственным итерационным алгоритмом с обработкой краев [2,3]. Результаты тестирования представлены на рисунке 3.

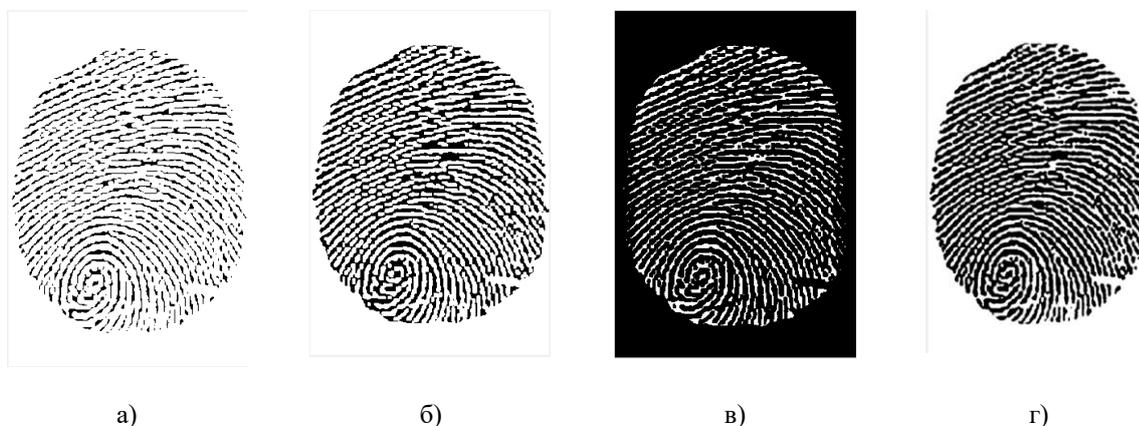


Рис. 3. Изображения отпечатков, полученные различными методами бинаризации (а-отсечение по порогу яркости, б- метод Отцу, в- метод Ниблейка, г- итерационный алгоритм с обработкой краев)

После итерационного алгоритма изображение получилось более четким, чем после обработки другими методами, значит глобальный порог бинаризации рассчитан точнее. Метод отсечения по порогу яркости показал не лучший результат, из-за того, что он не может рассчитать реальный порог изображения, а бинаризует его в слепую. Метод Ниблейка дает сильный краевой эффект и заниженный порог бинаризации, из-за которого изображение значительно затемнено, нет четкости по краям. Выбор метода бинаризации осуществлялся также по результатам расчета интенсивности пикселей, представленного в таблице 2, соотношение для этого метода и метода Отцу приблизительно одинаковы.

Таблица 2. Результаты расчетов интенсивности пикселей

Интенсивность пикселей	Методы бинаризации						
	Отсечение по порогу яркости				Метод Отцу	Метод Ниблейка	Итерац. метод
	0,3	0,5	0,7	0,9			
Количество белых пикселей	252293	535284	822552	116614	725859	377139	720338
Количество черных пикселей	1819817	1536826	1249558	905962	1346251	1694971	1351772

Скелетизация осуществлялась методами: построение остова, утончение и утолщение [4]. Выбор морфологической операции для построения скелета основывался на внешнем анализе полученного отпечатка. Морфологическая операция утолщение объекта показала лучший результат. Она сохранила связность и структуру папиллярных линий, тем самым упростив задачу выделения особых точек.

Выделение особых точек. Для нахождения особых точек, по которым впоследствии проводилось распознавание, применялись следующие методы: Харриса и выделение по локальным признакам. Результаты применения этих двух методов представлены на рисунке 4.

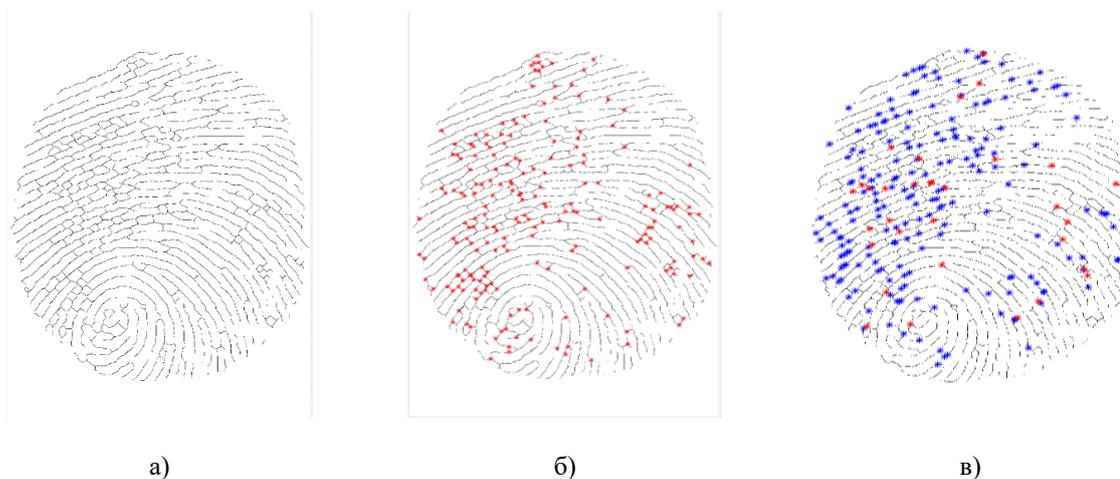


Рис. 4. а) - скелет изображения, б) - выделенные особые точки по алгоритму Харриса, в) - выделенные особые точки по локальным признакам

Изучив результаты работы исследуемых алгоритмов выделения особых точек, можно выделить основные достоинства и недостатки, которые представлены в табл.3.

Таблица 3. Достоинства и недостатки методов выделения признаков

Методы выделения	Достоинства	Недостатки
Харриса	быстродействие, наличие встроенной функции в Matlab, не зависит от качества скелетизации	чувствительность к шуму, зависимость от масштаба изображения
по локальным признакам	выделяет не один, а несколько признаков	зависимость от качества скелетизации, возможность получения ложных минуций, медленный в работе

Оба метода показали удовлетворительные результаты и имеют свои достоинства и недостатки, которые должны учитываться при разработке автоматизированной системы аутентификации. Например, при наличии высокого уровня шума, для изображений, получаемых со сканера, нужно применять метод выделения по локальным признакам, в том случае если имеет большое значение быстродействие системы – метод Харриса, который для выделения признаков отпечатков пальцев ранее не применялся [1, 5].

Распознавание. Распознавание выполнялось по следующим алгоритмам: сравнение по заданному порогу и нейронной сетью. В случае сравнения по заданному порогу решение об идентификации принимается по расчету матриц изображений идентифицирующего и эталонного отпечатков. Эти матрицы представляют собой координаты выделенных признаков. Если в результате расчета матриц значение будет меньше заданного порога, то отпечатки считаются совпавшими, в противном случае будет несовпадение.

Для распознавания нейронными сетями было опробовано несколько архитектур. Это, три сети типа FF (однонаправленная сеть, обучаемая с применением алгоритма обратного распространения с заданным количеством итераций 1000, и целевой ошибкой 0.001) с разным количеством скрытых слоев и нейронов, RBF1 - радиально-базисная сеть с нулевой ошибкой и RBF2,3 - радиально-базисные сети с ненулевой ошибкой и разным значением параметра ширины активационной функции spread - 0.2, 0.7, три сети типа GRNN (обобщенная регрессионная нейронная сеть), с разными значениями параметра spread - 0.2, 0.7, 1. Параметры сетей были подобраны в ходе экспериментов. Сети обучались на векторах из 200 признаков, выделенных из отпечатка пальца одного человека, представленных в виде матрицы 200x2 [6]. Лучшие результаты показала радиально-базисная сеть с нулевой ошибкой. Результаты сравнения с использованием признаков, выделенных методом Харриса представлены на рисунке 5.

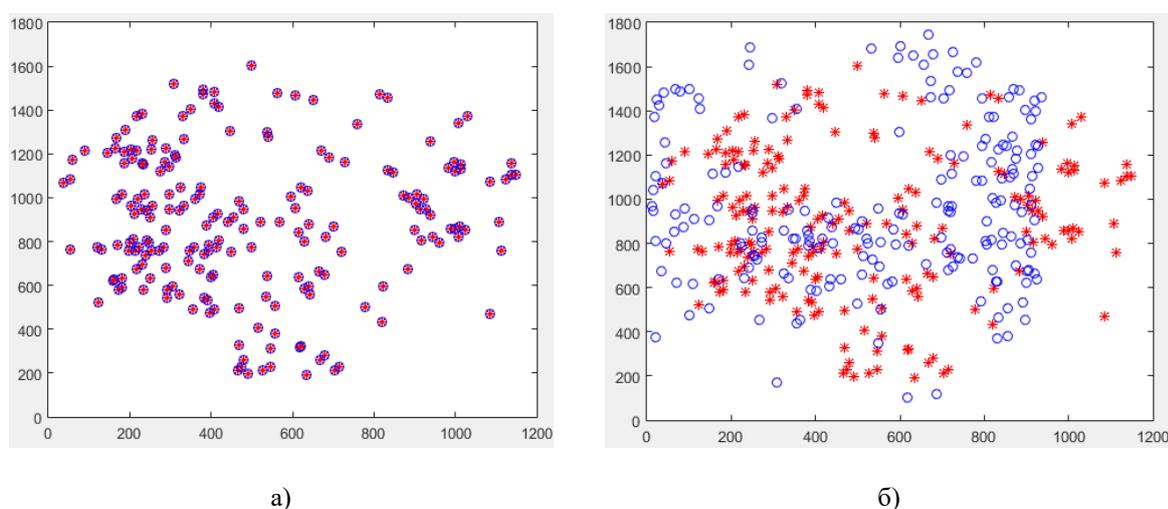


Рис. 5. Сравнение особых точек, найденных детектором Харриса:
а) - одного и того же человека, б) - разных людей

Выводы. Рассмотрены различные методы улучшения, бинаризации, скелетизации, выделения признаков и распознавания. Проведен сравнительный анализ и отобраны лучшие результаты.

По результатам выполнения аутентификации по отпечаткам пальцев были выбраны следующие методы предварительной обработки: контрастно-ограниченная адаптивная эйквализация гистограммы, итеративный алгоритм бинаризации с обработкой краев изображения, скелетизация методом дилатации. Выделение особых точек проводилось по методу Харриса и по локальным признакам, при этом оба показали удовлетворительные результаты и имеют свои достоинства и недостатки, которые должны учитываться при разработке автоматизированной системы аутентификации. Например, при наличии высокого уровня шума, для изображений, получаемых со сканера, нужно применять метод выделения по локальным признакам, в том случае если имеет большое значение быстродействие системы – метод Харриса. Для распознавания была выбрана нейронная сеть RBF сеть с нулевой ошибкой, которая показала лучшие результаты, чем сравнение по заданному порогу.

Алгоритм предлагается применять в разработке автоматизированных систем аутентификации по отпечаткам пальцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыканов А. С. Анализ методов распознавания отпечатков пальца / А. С. Рыканов // Системы обработки информации. – 2010. – № 6. – С. 164-171.
2. Янковский А. А. Критерии выбора метода бинаризации при обработке изображений лабораторных анализов / А. А. Янковский, А. Н. Бугрий // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2010. – № 153. – С. 53-56.
3. Бабичева М. В. Итеративный алгоритм пороговой бинаризации для обработки отпечатков пальцев в биометрических системах доступа / М. В. Бабичева, А. С. Юрченко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 41-46.
4. Гудков В. Ю. Скелетизация бинарных изображений и выделение особых точек для распознавания отпечатков пальцев / В. Ю. Гудков, Д. А. Клюев // Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – № 3. – С. 11-17.
5. Бабичева М. В. Выделение особых точек отпечатков пальцев детекторами углов / М. В. Бабичева, А. С. Юрченко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 10-15.
6. Бабичева М. В. Нейронные сети в системах для научных исследований / М. В. Бабичева, В. В. Данилов, А. С. Юрченко // Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : материалы IV Международной научной конференции, 31 октября 2019 г. – Донецк : ДонНУ, 2019. – Т. 1, ч. 2. – С. 164-165.

Поступила в редакцию 05.11.2019 г.

ALGORITHM FOR PROCESSING IMAGES OF FINGERPRINTS FOR AUTOMATED SYSTEMS OF BIOMETRIC AUTHENTICATION

M.V. Babicheva, A.S. Yurchenko

A unique algorithm for processing fingerprint images with a software implementation is proposed, starting from receiving an image from a scanner and ending with fingerprint recognition. At each stage, there is the choice of method, with experimental justification. The results of previous studies of the authors are summarized. The method was tested on real fingerprints.

Keywords: biometrics, authentication, fingerprints, image processing, Matlab Image Processing.

Бабичева Маргарита Вадимовна

ст. преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: m.v.babicheva60@gmail.com

Babicheva Margarita Vadimovna

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Юрченко Артем Сергеевич

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: 1994artoum@mail.ru

Yurchenko Artem Sergeevich

Student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 004.031:539.3:534.1

НЕЧЕТКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-СТРУЙНЫХ ФОРСУНОК В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ

© 2019 С.В. Сторожев, Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг

Разработана численно-аналитическая нечетко-множественная методика оценивания неопределенных эндогенных параметров при исследовании теоретической модели функционирования центробежно-струйных форсунок, применяемых для формирования газоструйных потоков в технических системах термостабилизации с широким спектром назначения, включая системы охлаждения лимитеров в прототипах современных энергетических устройств термоядерного синтеза. Методика учитывает наличие ошибок рассеяния в значениях экзогенных физико-механических и геометрических параметров модели с нечетко-множественными описаниями и основана на переходе в рамках эвристического принципа обобщения к нечетко-множественным аргументам в аналитических представлениях для исследуемых характеристик функционирования форсунок, получаемых в рамках детерминистической модели. Приведен пример реализации рассматриваемой методики.

Ключевые слова: технические системы термостабилизации, центробежно-струйные форсунки, теоретические модели функционирования, погрешности исходных данных, учет технологических разбросов, нечетко-множественная методика, эвристический принцип обобщения.

Введение. Одной из специфических особенностей математического моделирования в задачах термостабилизации, теплообмена, охлаждения и теплозащиты для большинства областей приложения является высокая степень неопределенности экзогенных параметров рассматриваемых моделей. При этом мера полноты и корректности учета факторов неопределенности является одним из ведущих критериев оценки степени эффективной практической применимости результатов предпроектного моделирования в соответствующих технологических областях. В частности, теоретическое моделирование процессов распыления охлаждающих субстанций и формирования газожидкостных потоков при описании функционирования центробежно-струйных форсунок в технических системах термостабилизации широкого назначения [1 – 5], включая такие современные области, как проблема охлаждения лимитеров в прототипах современных энергетических устройств термоядерного синтеза типа «Токамак» [6 – 7], должно в самой высокой мере предусматривать возможности учета весьма значительного уровня неопределенности и существования разбросов [8 – 13] в параметрах моделируемых процессов на базе разработки соответствующих алгоритмов.

В качестве доминирующего инструмента представления и обработки неопределенностей, как свойства исходной информации в различных типах математических моделей технологических процессов, включая технологические процессы температурной стабилизации, используется методы теории вероятностей и математической статистики, и большинство детерминистических моделей в соответствующих областях имеют свои вероятностные аналоги. Однако, при достаточно высокой эффективности такого подхода, на практике он обладает рядом весьма существенных ограничений. Существующие подходы, основанные на

принципах теории вероятностей, позволяют эффективно моделировать неопределенность значений исходных данных для однородных случайных явлений [14 – 15], в то время как очень многие неопределенные исходные экспериментальные данные в моделях технологических процессов, включая рассматриваемые в данной работе, зачастую не обладают свойством однородности, не могут быть корректно классифицированы как случайные.

В этой связи, целью настоящей работы является решение актуальной задачи синтеза и апробации предполагающей менее жесткие требования к характеру неопределенной экзогенной информации альтернативной нечетко-множественной [16 – 21] методики получения оценок для основных параметров функционирования центробежно-струйных форсунок в технических системах термостабилизации с учетом ошибок рассеяния исходных физико-механических и геометрических данных моделирования. Методика базируется на использовании соотношений детерминистической версии теоретической модели функционирования центробежно-струйных форсунок и последующем переходе в этих соотношениях к нечетким аргументам на базе применения эвристического принципа расширения в теории нечетких множеств [14 – 26].

Соотношения детерминистической версии модели. Описание принципов функционирования центробежно-струйных форсунок, их конструктивных особенностей и характерных параметров, а также анализ ряда базовых вариантов соответствующих детерминистических моделей представлены в работах [8 – 13, 27 – 28]. Экзогенными параметрами моделей рассматриваемого типа являются [27 – 28]: диаметр d_c и площадь сечения S_c цилиндрического канала сопла; площадь сечения S_0 , диаметр d_0 и длина l_0 центрального осевого цилиндрического кругового канала центробежно-струйной форсунки; площади сечений S_{j_b} , диаметры d_{j_b} и длины l_{j_b} ($j = \overline{1, N}$) закручивающих винтовых цилиндрических круговых каналов, центры сечений которых лежат на окружности радиуса R_b в плоскости, перпендикулярной осевому каналу, с полюсом в центре этого канала, а оси в коллинеарных основному осевому направлению плоскостях продольных сечений наклонены под углом γ к направлению центрального канала; радиус вихря в камере форсунки R_v ; радиус сопла форсунки R_c ; коэффициент заполнения соплового канала $\varphi = 1 - R_v^2 / R_c^2$; λ_0 и λ_{j_b} – коэффициенты трения в центральном осевом и закручивающих каналах; ξ_0 и ξ_{j_b} – коэффициенты потерь на местные сопротивления в центральном осевом и закручивающих каналах. Полагается, что осевой и закручивающие каналы имеют полное жидкостное заполнение. Параметр R_b характеризует плечо закручивания жидкости, поступающей по винтовым цилиндрическим каналам.

Эндогенными расчетными параметрами моделей, описывающих функционирование процессов распыления охлаждающей жидкой субстанции в центробежно-струйных форсунках, являются параметры расхода жидкости, параметры дисперсности для создаваемой газокапельной среды, а также параметры факела распыла и скорости истечения жидкости из сопла форсунки.

Апробированные варианты детерминистической модели течения идеальной и реальной жидкости в распылителях центробежно-струйных форсунок и расчета параметров эффективности процессов распыления представлены в работах [8 – 13, 27 – 28] и базируются на применении закона сохранения момента количества движения и

принципа обеспечения максимального расхода протекающей через форсунки жидкости. В рамках представленной в [28] модели функционирования одного из вариантов конструкции центробежно-струйной форсунки параметр расхода распыляемой идеальной жидкости либо жидкой субстанции малой вязкости описывается соотношениями, в которые входят его геометрические характеристики A^* либо A_v^* . Характеристика A^* вводится в случае распыления идеальной жидкости и описывается соотношением

$$A^* = 2 \sin \gamma \cdot (R_b / R_c) (S_c \cdot \sum_{j=1}^N S_{jb}) / ((S_0 + \sum_{j=1}^N S_{jb})^2), \quad (1)$$

а в случае учета вязкости распыляемой реальной жидкости

$$A_v^* = 2 \sin \gamma \cdot (R_b / R_c) (S_c \cdot \sum_{j=1}^N S_{jb}) / ((S_0 \lambda + \sum_{j=1}^N S_{jb})^2), \quad (2)$$

где λ – приведенный коэффициент потерь в подводящих каналах (в устройстве формирования потоков), подлежащий расчету по формуле

$$\lambda = [(\sum_{j=1}^N (\lambda_{jb} l_{jb} / d_{jb} + \xi_{jb})) / (\lambda_0 l_0 / d_0 + \xi_0)]. \quad (3)$$

В рассматриваемых моделях от геометрических параметров A^* и A_v^* определяющим образом зависят [27 – 28] и другие основные эндогенные параметры, в том числе коэффициент φ заполнения сопла и угол распыла β .

Вводимый в рассмотрение коэффициент расхода μ для центробежно-струйной форсунки, согласно [28], в случае распыления идеальной жидкости имеет вид

$$\mu = ((A^*)^2 (2 - \varphi)^{-2} + \varphi^{-2})^{-1/2}. \quad (4)$$

Связь между геометрическим параметром A^* и коэффициентом φ заполнения сопла устанавливается на базе принципа максимума расхода

$$\partial \mu / \partial \varphi = 0. \quad (5)$$

и для случая идеальной жидкости имеет вид

$$A^* = ((2 - \varphi) / \varphi)^{3/2}. \quad (6)$$

откуда

$$\varphi = 2 / (1 + (A^*)^{2/3}), \quad \mu = (\varphi^3 / 2)^{1/2} = 2(1 + (A^*)^{2/3})^{-3/2}. \quad (7)$$

Соответственно, при полном $\varphi = 1$ заполнении соплового канала центробежно-струйной форсунки $A^* = 1$; при $A^* < 1$ ситуация полного заполнения канала сохраняется, а в случае $A^* > 1$ в канале сопла формируется газовый вихрь.

Угол раскрытия факела распыла при заданных характеристиках A^* и φ описывается соотношением

$$\beta = 2 \arctg(A^* \varphi / (2 - \varphi)) = 2 \arctg(((2 - \varphi) / \varphi)^{1/2}). \quad (8)$$

Еще одной эндогенной характеристикой рассматриваемой модели является скорость V_{fc} жидкостного потока в отверстии сопла центробежно-струйной форсунки рассматриваемого типа, определяемая соотношением

$$V_{fc} = (P_f \varphi / \rho_f)^{1/2}, \quad (9)$$

где P_f – давление жидкости в подводящем трубопроводе, ρ_f – параметр плотности распыляемой жидкости.

Представленная система расчетных соотношений является основой для последующего синтеза нечетко-множественной версии методики оценивания неопределенных эндогенных параметров при исследовании теоретической модели функционирования центробежно-струйных форсунок. Процесс перехода к нечетко-множественной расчетной модели рассматривается ниже применительно к случаю распыления идеальной несжимаемой жидкости.

Нечетко-множественная методика оценивания эндогенных параметров модели. Синтезируемая нечеткая модель оценивания характеристик распыления центробежно-струйной форсункой охлаждающей субстанции, интерпретируемой как идеальная жидкость, основывается на применении эвристического принципа расширения (принципа обобщения) к расчетным соотношениям (1) – (4), (6) – (9) детерминистической версии модели при переходе в указанных соотношениях к неопределенным аргументам нечетко-множественной природы.

В процессе построения алгоритма нечеткого оценивания характеристик модели распыления идеальной жидкости центробежно-струйной форсункой записываются аналитические функциональные выражения эндогенных параметров A^* , φ , μ , β , V_{fc} через ее экзогенные характеристики на основе учета зависимостей $\varphi(A^*)$, $\mu(A^*)$, $\beta(A^*)$, $V_{fc}(A^*, P_f, \rho_f)$, описываемых формулами (4), (7) – (9). Экзогенными параметрами рассматриваемой модели, через которые выражается характеристика A^* , являются величины S_0 , S_c , S_{jb} , R_b , R_c , γ . Соответственно, согласно (1), (7), (8), могут быть введены в рассмотрение функциональные зависимости

$$A^* = A^*(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) = F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma). \quad (10)$$

$$\varphi = F_\varphi(A^*) = F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma). \quad (11)$$

$$\mu = F_\mu(A^*) = F_\mu(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma). \quad (12)$$

$$\beta = F_\beta(A^*) = F_\beta(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma). \quad (13)$$

$$V_{fc} = F_f(A^*, P_f, \rho_f) = F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f). \quad (14)$$

Вводимая нечеткая модель оценивания характеристик распыления охлаждающей субстанции, интерпретируемой как идеальная несжимаемая жидкость, основывается на применении эвристического принципа расширения (принципа обобщения) к расчетным соотношениям (10) – (14) детерминистической версии модели с переходом в указанных соотношениях к неопределенным аргументам нечетко-множественной природы, то есть основывается на использовании аналитически функциональных выражений

эндогенных параметров модели A^* , φ , μ , β через экзогенные характеристики S_0 , S_c , S_{jb} , R_b , R_c , γ , а также аналитического выражения для V_{fc} через S_0 , S_c , S_{jb} , R_b , R_c , γ , P_f , ρ_f .

В рамках представленной в работах [16 – 21] общей концепции применения разрабатываемой методики вводится гипотеза об описании обладающих разбросами значений экзогенных параметров S_0 , S_c , S_{jb} , R_b , R_c , γ , P_f , ρ_f нечеткими множествами \tilde{S}_0 , \tilde{S}_c , \tilde{S}_{jb} , \tilde{R}_b , \tilde{R}_c , $\tilde{\gamma}$, \tilde{P}_f , $\tilde{\rho}_f$ с функциями принадлежности $\mu_{\tilde{S}_0}(S_0)$, $\mu_{\tilde{S}_c}(S_c)$, $\mu_{\tilde{S}_{jb}}(S_{jb})$, $\mu_{\tilde{R}_b}(R_b)$, $\mu_{\tilde{R}_c}(R_c)$, $\mu_{\tilde{\gamma}}(\gamma)$, $\mu_{\tilde{P}_f}(P_f)$, $\mu_{\tilde{\rho}_f}(\rho_f)$ и о последующем получении определяемых оценок также в форме нечетких множеств \tilde{A}^* , $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{\beta}$, \tilde{V}_{fc} . Гипотетически, с учетом малости разбросов геометрических конструктивных параметров форсунки, исследования могут проводиться в отдельно рассматриваемых диапазонах значений

$$S_0 S_c < \left(\sum_{j=1}^N S_{jb} \right)^2. \quad (15)$$

либо

$$S_0 S_c \geq \left(\sum_{j=1}^N S_{jb} \right)^2. \quad (16)$$

Для всех указанных экзогенных и эндогенных нечетко-множественных характеристик далее вводятся описания в форме суперпозиций множеств α -срезом. При этом рассматриваются два варианта описываемой методики, отличающиеся гипотезами о характере представления неопределенной исходной информации.

В первом случае неконтрастные величины экзогенных параметров S_0 , S_c , S_{jb} , R_b , R_c , γ , P_f , ρ_f описываются нормальными трапецеидальными нечеткими интервалами \tilde{S}_0 , \tilde{S}_c , \tilde{S}_{jb} , \tilde{R}_b , \tilde{R}_c , $\tilde{\gamma}$, \tilde{P}_f , $\tilde{\rho}_f$ с кортежами реперных точек [25 – 26]

$$\tilde{S}_0 = (S_{10}, S_{20}, S_{30}, S_{40}), \quad \tilde{S}_c = (S_{1c}, S_{2c}, S_{3c}, S_{4c}), \quad \tilde{S}_{jb} = (S_{1jb}, S_{2jb}, S_{3jb}, S_{4jb}), \quad (17)$$

$$\tilde{R}_b = (R_{1b}, R_{2b}, R_{3b}, R_{4b}), \quad \tilde{R}_c = (R_{1c}, R_{2c}, R_{3c}, R_{4c}), \quad \tilde{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4),$$

$$\tilde{P}_f = (P_1, P_2, P_3, P_4), \quad \tilde{\rho}_f = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4).$$

Введенные нечеткие интервалы представляется разложениями по множествам α -срезом в форме

$$\tilde{S}_0 = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}], \quad \underline{S}_{0\alpha} = (1-\alpha)S_{10} + \alpha S_{20}, \quad \bar{S}_{0\alpha} = \alpha S_{30} + (1-\alpha)S_{40}; \quad (18)$$

$$\tilde{S}_c = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}], \quad \underline{S}_{c\alpha} = (1-\alpha)S_{1c} + \alpha S_{2c}, \quad \bar{S}_{c\alpha} = \alpha S_{3c} + (1-\alpha)S_{4c};$$

$$\tilde{S}_{jb} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}], \quad \underline{S}_{jb\alpha} = (1-\alpha)S_{1jb} + \alpha S_{2jb}, \quad \bar{S}_{jb\alpha} = \alpha S_{3jb} + (1-\alpha)S_{4jb};$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_b &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}], \quad \underline{R}_{b\alpha} = (1-\alpha)R_{1b} + \alpha R_{2b}, \quad \bar{R}_{b\alpha} = \alpha R_{3b} + (1-\alpha)R_{4b}; \\ \tilde{R}_c &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}], \quad \underline{R}_{c\alpha} = (1-\alpha)R_{1c} + \alpha R_{2c}, \quad \bar{R}_{c\alpha} = \alpha R_{3c} + (1-\alpha)R_{4c}; \\ \tilde{\gamma} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha], \quad \underline{\gamma}_\alpha = (1-\alpha)\gamma_1 + \alpha\gamma_2, \quad \bar{\gamma}_\alpha = \alpha\gamma_3 + (1-\alpha)\gamma_4; \\ \tilde{P}_{fc} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{P}_{fc\alpha}, \bar{P}_{fc\alpha}], \quad \underline{P}_{fc\alpha} = (1-\alpha)P_1 + \alpha P_2, \quad \bar{P}_{fc\alpha} = \alpha P_3 + (1-\alpha)P_4; \\ \tilde{\rho}_f &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\rho}_{f\alpha}, \bar{\rho}_{f\alpha}], \quad \underline{\rho}_{f\alpha} = (1-\alpha)\rho_1 + \alpha\rho_2, \quad \bar{\rho}_{f\alpha} = \alpha\rho_3 + (1-\alpha)\rho_4. \end{aligned}$$

Во втором из рассматриваемых вариантов алгоритма получения нечетких оценок \tilde{A}^* , $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{\beta}$, \tilde{V}_{fc} полагается, что функции принадлежности $\mu_{\tilde{S}_0}(S_0)$, $\mu_{\tilde{S}_c}(S_c)$, $\mu_{\tilde{S}_{jb}}(S_{jb})$, $\mu_{\tilde{R}_b}(R_b)$, $\mu_{\tilde{R}_c}(R_c)$, $\mu_{\tilde{\gamma}}(\gamma)$, $\mu_{\tilde{P}_f}(P_f)$, $\mu_{\tilde{\rho}_f}(\rho_f)$ для нечетко-множественных неопределенных экзогенных параметров имеют представления, соответствующие по форме функциям плотности для нормальных статистических распределений [29]:

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{S}_0}(S_0) &= \exp(-(S_0 - m_{*S_0})^2 / (2\sigma_{*S_0}^2)), \quad \mu_{\tilde{S}_c}(S_c) = \exp(-(S_c - m_{*S_c})^2 / (2\sigma_{*S_c}^2)), \quad (19) \\ \mu_{\tilde{S}_{jb}}(S_{jb}) &= \exp(-(S_{jb} - m_{*S_{jb}})^2 / (2\sigma_{*S_{jb}}^2)), \quad \mu_{\tilde{R}_b}(R_b) = \exp(-(R_b - m_{*R_b})^2 / (2\sigma_{*R_b}^2)), \\ \mu_{\tilde{R}_c}(R_c) &= \exp(-(R_c - m_{*R_c})^2 / (2\sigma_{*R_c}^2)), \quad \mu_{\tilde{\gamma}}(\gamma) = \exp(-(\gamma - m_{*\gamma})^2 / (2\sigma_{*\gamma}^2)), \\ \mu_{\tilde{P}_f}(P_f) &= \exp(-(P_f - m_{*P_f})^2 / (2\sigma_{*P_f}^2)), \quad \mu_{\tilde{\rho}_f}(\rho_f) = \exp(-(\rho_f - m_{*\rho_f})^2 / (2\sigma_{*\rho_f}^2)), \end{aligned}$$

с параметрами средних значений m_{*S_0} , m_{*S_c} , $m_{*S_{jb}}$, m_{*R_b} , m_{*R_c} , $m_{*\gamma}$, m_{*P_f} , $m_{*\rho_f}$ и среднеквадратических отклонений σ_{*S_0} , σ_{*S_c} , $\sigma_{*S_{jb}}$, σ_{*R_b} , σ_{*R_c} , $\sigma_{*\gamma}$, σ_{*P_f} , $\sigma_{*\rho_f}$. В этом случае

$$\begin{aligned} \underline{S}_{0\alpha} &= m_{*S_0} - \sigma_{*S_0} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{S}_{0\alpha} = m_{*S_0} + \sigma_{*S_0} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \quad (20) \\ \underline{S}_{c\alpha} &= m_{*S_c} - \sigma_{*S_c} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{S}_{c\alpha} = m_{*S_c} + \sigma_{*S_c} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \\ \underline{S}_{jb\alpha} &= m_{*S_{jb}} - \sigma_{*S_{jb}} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{S}_{jb\alpha} = m_{*S_{jb}} + \sigma_{*S_{jb}} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \\ \underline{R}_{b\alpha} &= m_{*R_b} - \sigma_{*R_b} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{R}_{b\alpha} = m_{*R_b} + \sigma_{*R_b} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \\ \underline{R}_{c\alpha} &= m_{*R_c} - \sigma_{*R_c} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{R}_{c\alpha} = m_{*R_c} + \sigma_{*R_c} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \\ \underline{\gamma}_\alpha &= m_{*\gamma} - \sigma_{*\gamma} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{\gamma}_\alpha = m_{*\gamma} + \sigma_{*\gamma} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \\ \underline{P}_{f\alpha} &= m_{*P_f} - \sigma_{*P_f} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{P}_{f\alpha} = m_{*P_f} + \sigma_{*P_f} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}; \\ \underline{\rho}_{f\alpha} &= m_{*\rho_f} - \sigma_{*\rho_f} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{\rho}_{f\alpha} = m_{*\rho_f} + \sigma_{*\rho_f} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}. \end{aligned}$$

Для эндогенных нечетко-множественных характеристик \tilde{A}^* , $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{\beta}$, \tilde{V}_{fc} в рамках применяемой методики записываются представления

$$\tilde{A}^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [A_\alpha^*, \bar{A}_\alpha^*], \quad \tilde{\varphi} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\varphi_\alpha, \bar{\varphi}_\alpha], \quad \tilde{\mu} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\mu_\alpha, \bar{\mu}_\alpha], \quad \tilde{\beta} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\beta_\alpha, \bar{\beta}_\alpha], \quad (21)$$

$$\tilde{V}_{fc} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [V_{fc\alpha}, \bar{V}_{fc\alpha}].$$

Следующий этап алгоритма получения нечетких оценок \tilde{A}^* , $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{\beta}$, \tilde{V}_{fc} основывается на применении α -уровневой формы эвристического принципа обобщения [15, 17 – 21] к четким аналитическим функциональным соотношениям (10) – (14) детерминистического варианта модели распыления идеальной жидкости в процессе распространения областей определения этих соотношений на аргументы нечетко-множественного типа.

На основе представлений (18) – (21), согласно α -уровневому варианту эвристического принципа расширения, для нечетких характеристик \tilde{A}^* , $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{\beta}$, \tilde{V}_{fc} могут быть записаны выражения

$$\tilde{A}^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [A_\alpha^*, \bar{A}_\alpha^*], \quad (22)$$

$$\underline{A}_\alpha^* = \inf_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha]}} F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) \quad \bar{A}_\alpha^* = \sup_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha]}} F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$$

$$\tilde{\varphi} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\varphi_\alpha, \bar{\varphi}_\alpha],$$

$$\underline{\varphi}_\alpha = \inf_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha]}} F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) \quad \bar{\varphi}_\alpha = \sup_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha]}} F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$$

$$\tilde{\mu} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\mu_\alpha, \bar{\mu}_\alpha],$$

$$\underline{\mu}_\alpha = \inf_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha]}} F_\mu(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) \quad \bar{\mu}_\alpha = \sup_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \bar{\gamma}_\alpha]}} F_\mu(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$$

$$\tilde{\beta} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\beta}_\alpha, \overline{\beta}_\alpha],$$

$$\underline{\beta}_\alpha = \inf_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \overline{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \overline{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \overline{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \overline{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \overline{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \overline{\gamma}_\alpha]}} F_\beta(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) \quad \overline{\beta}_\alpha = \sup_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \overline{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \overline{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \overline{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \overline{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \overline{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \overline{\gamma}_\alpha]}} F_\beta(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$$

$$\tilde{V}_{fc} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{V}_{fc\alpha}, \overline{V}_{fc\alpha}],$$

$$\underline{V}_{fc\alpha} = \inf_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \overline{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \overline{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \overline{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \overline{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \overline{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \overline{\gamma}_\alpha] \\ P_f \in [\underline{P}_{f\alpha}, \overline{P}_{f\alpha}] \\ \rho_f \in [\underline{\rho}_{f\alpha}, \overline{\rho}_{f\alpha}]}} F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) \quad \overline{V}_{fc\alpha} = \sup_{\substack{S_0 \in [\underline{S}_{0\alpha}, \overline{S}_{0\alpha}] \\ S_c \in [\underline{S}_{c\alpha}, \overline{S}_{c\alpha}] \\ S_{jb} \in [\underline{S}_{jb\alpha}, \overline{S}_{jb\alpha}] \\ R_b \in [\underline{R}_{b\alpha}, \overline{R}_{b\alpha}] \\ R_c \in [\underline{R}_{c\alpha}, \overline{R}_{c\alpha}] \\ \gamma \in [\underline{\gamma}_\alpha, \overline{\gamma}_\alpha] \\ P_f \in [\underline{P}_{f\alpha}, \overline{P}_{f\alpha}] \\ \rho_f \in [\underline{\rho}_{f\alpha}, \overline{\rho}_{f\alpha}]}} F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f)$$

Представления (22) определяют общий алгоритм формирования нечетких оценок \tilde{A}^* , $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\mu}$, $\tilde{\beta}$, \tilde{V}_{fc} при учете разбросов в значениях экзогенных параметров S_0 , S_c , S_{jb} , R_b , R_c , γ , P_f , ρ_f модели функционирования центробежных форсунок для распыления идеальной несжимаемой жидкости.

Вместе с тем, в рассматриваемом случае более эффективным для числовой реализации является использование модифицированного варианта альфа-уровневой формы эвристического принципа обобщения [15], применимого в случае возможности оценивания свойств знакоопределенности для частных производных функций $F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_\mu(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_\beta(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f)$ по их аргументам.

Так, при выполнении ограничения (15) во всей области изменения аргументов

$$\partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 < 0, \quad \partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c > 0, \quad (23)$$

$$\partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} < 0, \quad \partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b > 0,$$

$$\partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c < 0, \quad \partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma > 0;$$

$$\partial F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 > 0, \quad \partial F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c < 0, \quad (24)$$

$$\partial F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} > 0, \quad \partial F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b < 0,$$

$$\partial F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c > 0, \quad \partial F_\varphi(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma < 0;$$

$$\partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 > 0, \partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c < 0, \quad (23)$$

$$\partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} > 0, \partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b < 0,$$

$$\partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c > 0, \partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma < 0;$$

$$\partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 < 0, \partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c > 0, \quad (24)$$

$$\partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} < 0, \partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b > 0,$$

$$\partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c < 0, \partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma > 0;$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial S_0 > 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial S_c < 0; \quad (25)$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial S_{jb} > 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial R_b > 0,$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial R_c < 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial \gamma > 0,$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial P_f > 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial \rho_f < 0.$$

В этом случае

$$\underline{A}_{\alpha}^* = F_{A^*}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{A}_{\alpha}^* = F_{A^*}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha}); \quad (26)$$

$$\underline{\varphi}_{\alpha} = F_{\varphi}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{\varphi}_{\alpha} = F_{\varphi}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha});$$

$$\underline{\mu}_{\alpha} = F_{\mu}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{\mu}_{\alpha} = F_{\mu}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha});$$

$$\underline{\beta}_{\alpha} = F_{\beta}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{\beta}_{\alpha} = F_{\beta}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha});$$

$$\underline{V}_{f\alpha} = F_f(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}, \underline{P}_{f\alpha}, \underline{\rho}_{f\alpha}),$$

$$\bar{V}_{f\alpha} = F_f(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha}, \bar{P}_{f\alpha}, \bar{\rho}_{f\alpha}).$$

При выполнении во всей области изменения аргументов функций $F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma)$, $F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \lambda)$, $F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f)$ ограничения вида (16) имеют место свойства

$$\partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 < 0, \partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c > 0, \quad (27)$$

$$\partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} > 0, \partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b > 0,$$

$$\partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c < 0, \partial F_{A^*}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma > 0;$$

$$\partial F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 > 0, \partial F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c < 0, \quad (28)$$

$$\partial F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} < 0, \partial F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b < 0,$$

$$\partial F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c > 0, \partial F_{\varphi}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma < 0;$$

$$\partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 > 0, \partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c < 0, \quad (29)$$

$$\partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} < 0, \partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b < 0,$$

$$\partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c > 0, \partial F_{\mu}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma < 0;$$

$$\partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_0 < 0, \partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_c > 0, \quad (30)$$

$$\partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial S_{jb} > 0, \partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_b > 0,$$

$$\partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial R_c < 0, \partial F_{\beta}(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma) / \partial \gamma > 0;$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial S_0 > 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial S_c < 0; \quad (31)$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial S_{jb} < 0,$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial R_b > 0,$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial R_c < 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial \gamma > 0,$$

$$\partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial P_f > 0, \partial F_f(S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f) / \partial \rho_f < 0.$$

В этом случае

$$\underline{A}_{\alpha}^* = F_{A^*}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{A}_{\alpha}^* = F_{A^*}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha}); \quad (32)$$

$$\underline{\varphi}_{\alpha} = F_{\varphi}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{\varphi}_{\alpha} = F_{\varphi}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha});$$

$$\underline{\mu}_{\alpha} = F_{\mu}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{\mu}_{\alpha} = F_{\mu}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha});$$

$$\underline{\beta}_{\alpha} = F_{\beta}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}), \bar{\beta}_{\alpha} = F_{\beta}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha});$$

$$\underline{V}_{f\alpha} = F_f(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_{\alpha}, \underline{P}_{f\alpha}, \underline{\rho}_{f\alpha}),$$

$$\bar{V}_{f\alpha} = F_f(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_{\alpha}, \bar{P}_{f\alpha}, \bar{\rho}_{f\alpha}).$$

Соотношения (21), (26), (32) являются составными элементами алгоритма числовой реализации рассматриваемой модели.

Результаты численных исследований. Примеры расчетов по описанной методике относятся к случаю модели центробежно-струйной форсунки с определяющими значение комплекса A^* экзогенными геометрическими параметрами, для которых используются оба описанных случая задания обусловленных разбросами нечетких описаний. Полагается, что форсунка имеет шесть равномерно расположенных в окружном направлении закручивающих винтовых каналов с одинаковыми

геометрическими характеристиками. Распыляемой идеальной жидкостью является вода.

В случае нечетко-интервального описания имеющих разбросы исходных параметров полагается:

$$\begin{aligned} \tilde{d}_0 &= (4.8l_*, 4.95l_*, 5.03l_*, 5.5l_*); \\ \tilde{d}_c &= (3.78l_*, 3.97l_*, 4.03l_*, 4.16l_*); \\ \tilde{d}_{1b} = \tilde{d}_{2b} = \dots = \tilde{d}_{6b} = \tilde{d}_b, \tilde{d}_b &= (2.91l_*, 2.98l_*, 3.02l_*, 3.08l_*); \\ R_b &= (14.96l_*, 14.98l_*, 15.01l_*, 15.07l_*); \\ \tilde{\gamma} &= (0.99\gamma_*, 1.05\gamma_*, 1.08\gamma_*, 1.15\gamma_*) \\ \tilde{P}_f &= (3.55P_*, 4.05P_*, 4.46P_*, 5.67P_*) \\ \tilde{\rho}_f &= (0.98\rho_*, 1.0\rho_*, 1.04\rho_*, 1.1\rho_*); \\ l_* &= 10^{-3}[\text{м}]; \rho_* = 10^3[\text{кг/м}^3]; P_* = 10^6[\text{Па}]; \gamma_* = 1[\text{рад}] \end{aligned}$$

В этом случае

$$\begin{aligned} \tilde{S}_0 &= (18.17l_*^2, 19.24l_*^2, 19.87l_*^2, 23.57l_*^2); \\ \tilde{S}_c &= (11.22l_*^2, 12.38l_*^2, 12.76l_*^2, 13.59l_*^2); \\ \tilde{S}_b = \tilde{S}_{jb} &= (6.65l_*^2, 6.97l_*^2, 7.16l_*^2, 7.45l_*^2); \end{aligned}$$

функции принадлежности для нечетких экзогенных параметров модели имеют вид, представленный на рисунках 1 – 7; принимается ограничение (15), и расчеты на основании соотношений (21), (26) дают представления функций принадлежности для нечетких эндогенных параметров, представленные на рисунках 8 – 11.

В альтернативном предположении о том, что функции принадлежности нечетко-множественных неопределенных экзогенных параметров рассматриваемой модели имеют представления, соответствующие по форме функциям плотности для нормальных статистических распределений с параметрами средних значений $m_{*S_0} = 19.56l_*^2$, $m_{*S_c} = 12.57l_*^2$, $m_{*S_{jb}} = 7.07l_*^2$, $m_{*R_b} = 15.0l_*$, $m_{*R_c} = 2.0l_*$, $m_{*\gamma} = 1.07\gamma_*$, $m_{*P_f} = 4.26P_*$, $m_{*\rho_f} = 1.02\rho_*$ и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{*S_0} = 3.912l_*^2$, $\sigma_{*S_c} = 2.514l_*^2$, $\sigma_{*S_{jb}} = 1.414l_*^2$, $\sigma_{*R_b} = 3.0l_*$, $\sigma_{*R_c} = 0.4l_*$, $\sigma_{*\gamma} = 0.214\gamma_*$, $\sigma_{*P_f} = 0.852P_*$, $\omega_{*\rho_f} = 0.204\rho_*$, соответствующие графики функций принадлежности для нечетких исходных параметров изображены на рисунках 12 – 19.

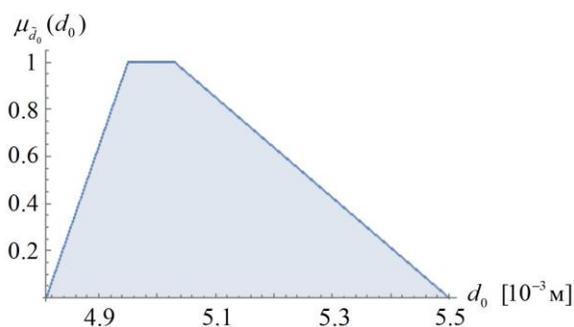


Рис. 1. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{d}_0}(d_0)$

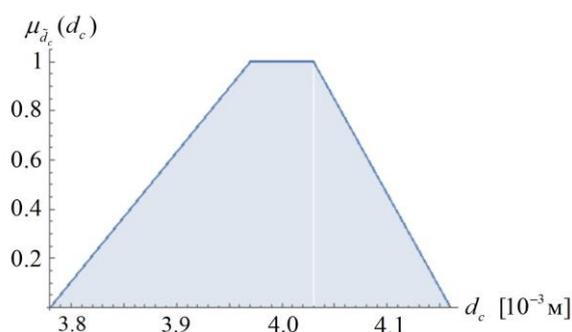


Рис. 2. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{d}_c}(d_c)$

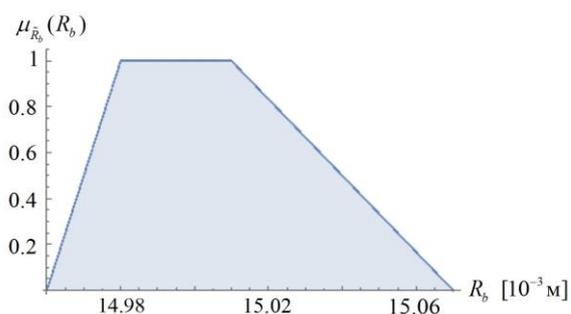


Рис. 3. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{R}_b}(R_b)$

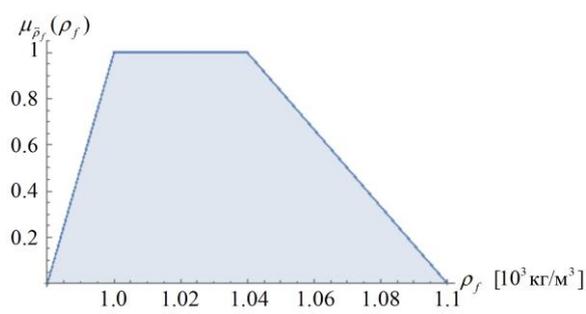


Рис. 4. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\rho}_f}(\rho_f)$

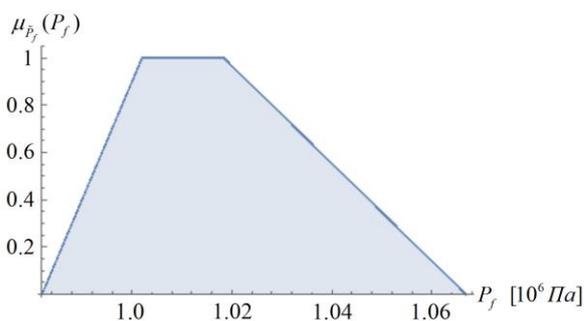


Рис. 5. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{P}_f}(P_f)$

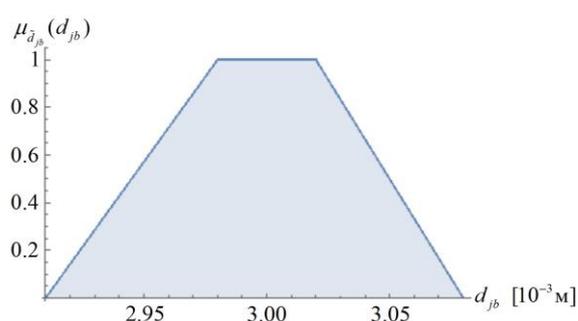


Рис. 6. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{d}_{ib}}(d_{ib})$

Рассчитываемые функции принадлежности для нечетких эндогенных характеристик модели приводятся на рисунках 20 – 23.

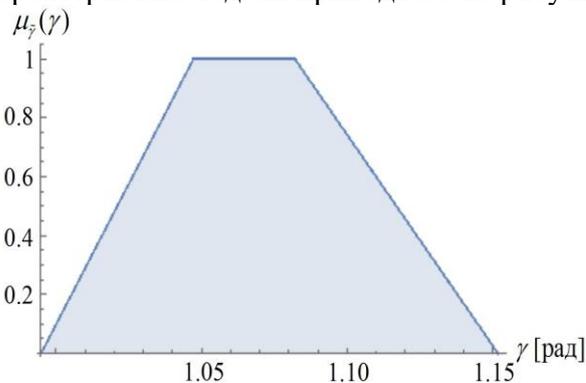


Рис. 7. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\gamma}}(\gamma)$

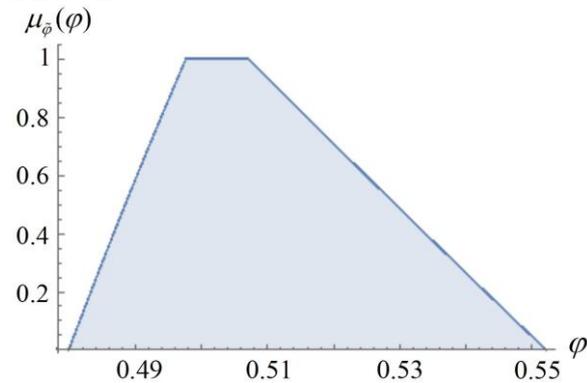


Рис. 8. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\varphi}}(\varphi)$

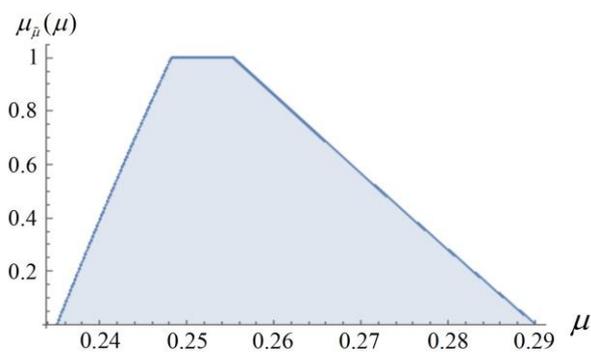


Рис. 9. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\mu}}(\mu)$

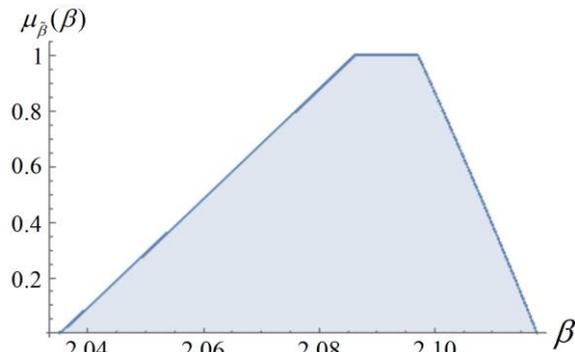


Рис. 10. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\beta}}(\beta)$

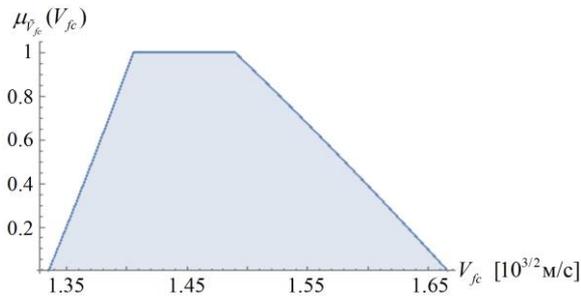


Рис. 11. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{V}_{fc}}(V_{fc})$.

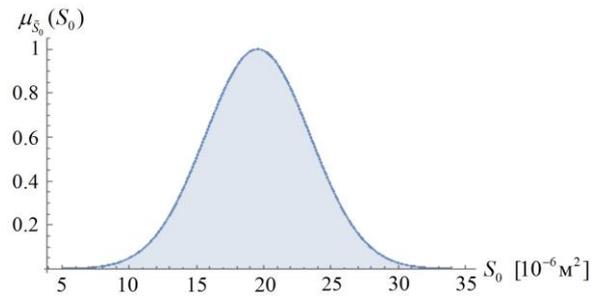


Рис. 12. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{S}_0}(S_0)$.

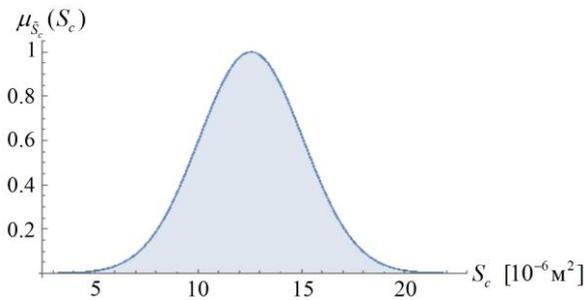


Рис. 13. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{S}_c}(S_c)$.

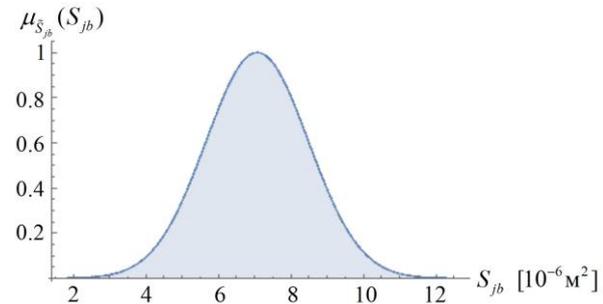


Рис. 14. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{S}_{jb}}(S_{jb})$.

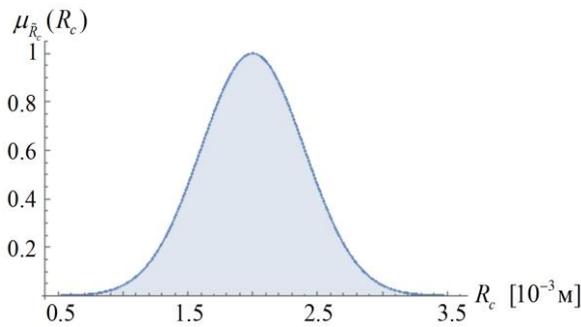


Рис. 15. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{R}_c}(R_c)$.

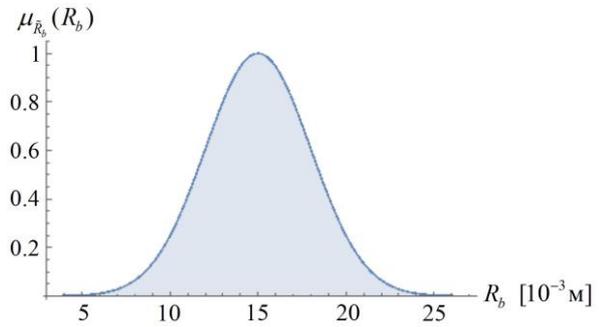


Рис. 16. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{R}_b}(R_b)$.

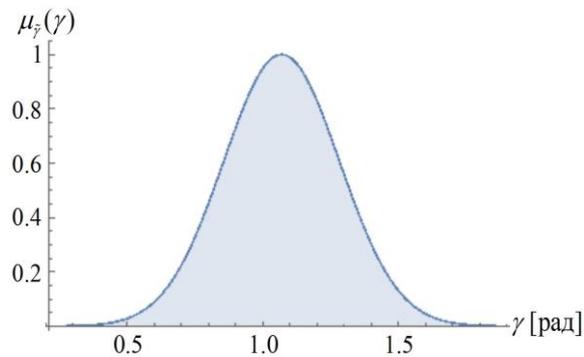


Рис. 17. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\gamma}}(\gamma)$.

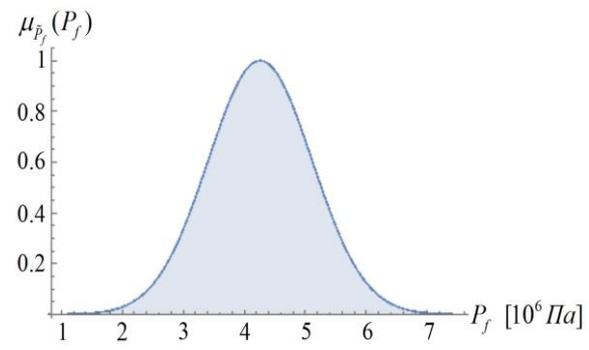


Рис. 18. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{P}_f}(P_f)$.

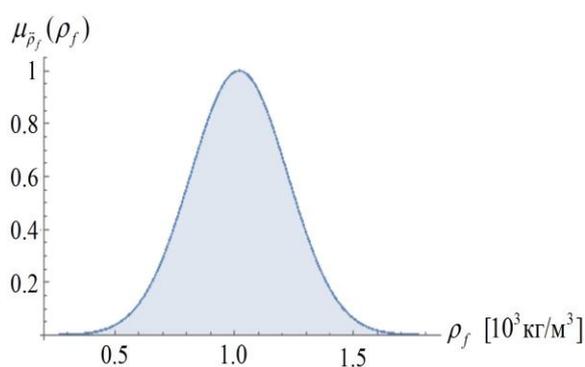


Рис. 19. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\rho}_f}(\rho_f)$.

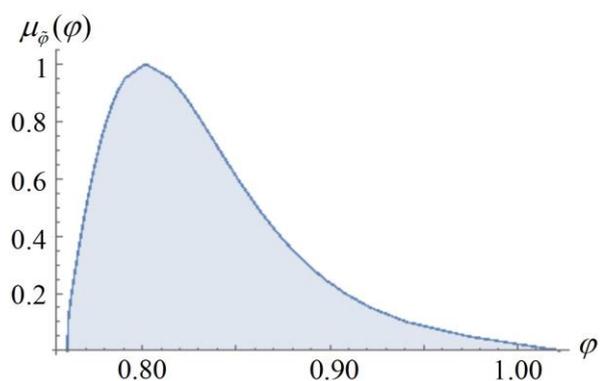


Рис. 20. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\varphi}}(\varphi)$.

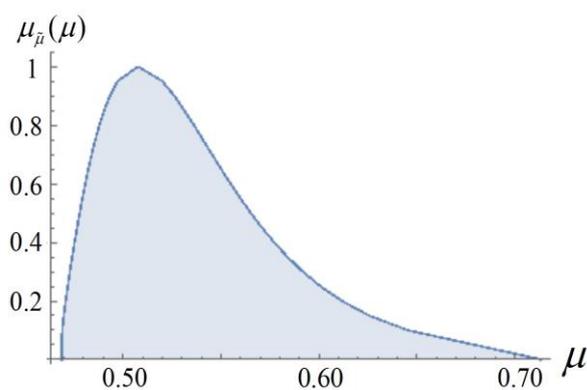


Рис. 21. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\mu}}(\mu)$.

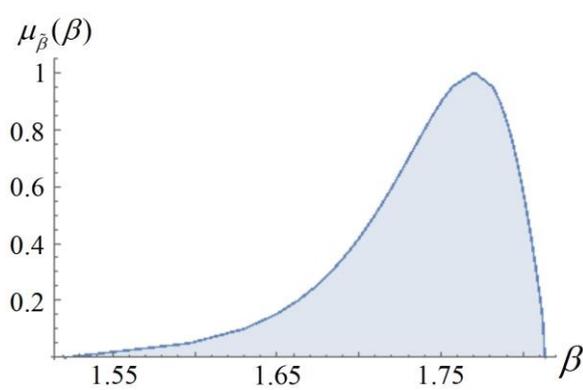


Рис. 22. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{\beta}}(\beta)$.

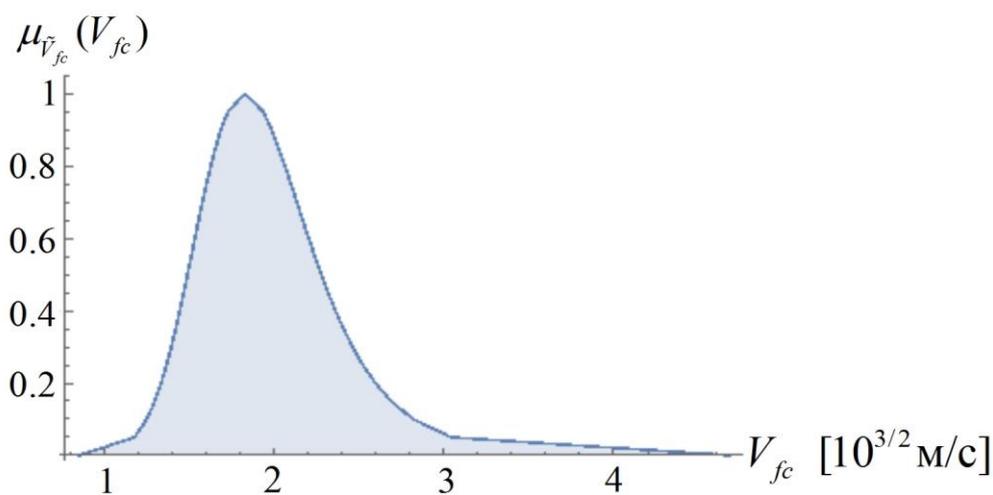


Рис. 23. Функция принадлежности $\mu_{\tilde{V}_{fc}}(V_{fc})$.

Полученные оценки описывают показатели степеней уверенности в том, что соответствующие эндогенные характеристики рассматриваемой модели функционирования центробежно-струйной форсунки будут принимать определенные значения при учете задаваемых уровней погрешностей в расчетных величинах экзогенных параметров модели.

Выводы. Разработана численно-аналитическая нечетко-множественная методика оценивания неопределенных эндогенных параметров при исследовании теоретической модели функционирования центробежно-струйных форсунок, применяемых для формирования газоструйных потоков в технических системах термостабилизации с широким спектром назначения, включая системы охлаждения лимитеров в прототипах современных энергетических устройств термоядерного синтеза. Методика учитывает наличие ошибок рассеяния в значениях экзогенных физико-механических и геометрических параметров модели с нечетко-множественными описаниями и основана на переходе в рамках эвристического принципа обобщения к нечетко-множественным аргументам в аналитических представлениях для исследуемых характеристик функционирования форсунок, получаемых в рамках детерминистической модели. Приведен пример реализации рассматриваемой методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадер В. И. Исследование теплообмена при охлаждении полого горизонтального цилиндрического слитка двухфазной веерной струей / В. И. Бадер // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 4. – С. 75-76.
2. Овчаренко М. П. Исследование параметров водовоздушного вторичного охлаждения МНЛЗ / М. П. Овчаренко // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 27-29.
3. Белевич А. И. Конструкции и характеристики пароструйных эжекторов ТЭС и АЭС / А. И. Белевич. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 210 с.
4. Герлига А. В. Результаты моделирования системы аварийного снижения давления под гермооболочкой реакторной установки АЭС с ВВЭР-1000 на основе струйного распылителя-охлаждителя / А. В. Герлига, И. И. Свириденко, Г. Г. Балакан // Вестник СевГТУ. – 2007. – Вып. 85. – С. 66-73.
5. Галустов В. С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике / В. С. Галустов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
6. Инновационный способ решения проблем охлаждения и термостабилизации элементов токамаков с капиллярно-пористыми структурами / М. Ю. Жарков, Д. О. Соколов, Б.Л.Х. Чан [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена : юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену и Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках : XXI школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (22–26 мая 2017 г., Санкт-Петербург : тезисы докладов. В 2 т. Т. 2. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 183-184.
7. Применение диспергированного газожидкостного потока для охлаждения жидкометаллического лимитера токамака Т-10 / А. В. Вертков, А. Т. Комов, И. Е. Люблинский [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, вып. 1. – С. 51-58.
8. Витман Л. А. Распыливание жидкости форсунками / Л. А. Витман. – Москва : Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.
9. Балакан Г. Г. Математическое моделирование работы струйного распылителя-охлаждителя (СРО) / Г. Г. Балакан, А. В. Герлига // Труды ОПУ. – Одесса, 2006. – Вып. 2 (26). – С. 71-75.
10. Соколов Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
11. Метод исследования структуры факела распыла эжекционной форсунки / В. А. Архипов, А. Л. Астахов, С. А. Басалаев [и др.] // Ползуновский вестник. – 2016. – № 3. – С. 96-100.

12. Экспериментальное исследование диспергирования жидкости эжекционными форсунками / В. А. Архипов, С. С. Бондарчук, М. Я. Евсевлев [и др.] // Инженерно-Физический Журнал. – 2013. – Т. 86, № 6. – С. 1229-1236.
13. Вальдберг А. Ю. Изучение дисперсного состава факела распыла жидкости центробежно-струйной форсунки / А. Ю. Вальдберг, К. П. Макеева, Н. Е. Николайкина // Изв. МГТУ «МАМИ». – 2012. – Т. 4, № 2 (14). – С. 7-11.
14. Дилигенский Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, П. В. Севастьянов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 397 с.
15. Ротштейн А. П. Моделирование и оптимизация надежности многомерных алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба, А. Н. Козачко. – Винница : УНІВЕРСУМ, 2007. – 215 с.
16. Бобков В. И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик / В. И. Бобков, В. В. Борисов, М. И. Дли // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 3. – С. 73-83.
17. Нечеткие оценки для собственных частот поперечных колебаний однородных стержней / С. В. Сторожев, В. Е. Болнокин, Д. И. Мутин [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – №4(78). – С. 24–28.
18. Storozhev S. V. Uncertainty in the models of the theory of volume elastic waves through the use of the theory of fuzzy sets / S. V. Storozhev // Modeling and information technologies: selected papers of the international scientific school "Paradigma" (Summer-2015, Varna, Bulgaria) / Compiling editor dr. sc., prof. O. Ja. Kravets. – City place Yelm, State WA, country-region USA : Science Book Publ. House, 2015. – P. 45-52.
19. Storozhev S. V. Fuzzy Evaluations for Kinematic Characteristics of Nonlinear Second Harmonics of Shear Waves in Transversely Isotropic Medium / S. V. Storozhev // Nonlinear Dynamics – 2016. Proc. of 5-th International Conference (September 27-30, 2016). – Kharkov : National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», 2016. – P. 509-514.
20. Model of fuzzy estimation of mechanical stress concentration for aerospace and industrial flat structures with polygonal holes of uncertain curvature at rounded corner points / V. G. Vyskub, E. I. Mutina, S. V. Storozhev, V. I. Storozhev. – DOI:10.1088/1757-899X/537/2/022013. – Текст : электронный // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537 – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41220492_29683053.pdf (дата обращения: 14.01.2019).
21. Сторожев С. В. Учет неопределенности экзогенных параметров при моделировании процессов распада струи жидкости в пневматических распылителях / С. В. Сторожев, Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2019. – № 1-2 (66-67). – С. 3-10.
22. Anastassiou G. A. Fuzzy Mathematics: Approximation Theory / G. A. Anastassiou. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – 444 p.
23. Bede B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic / B. Bede. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. – 276 p.
24. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic. An introduction with Engineering Application / M. Hanss. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – 253 p.
25. Grzegorzewski P. Trapezoidal approximations of fuzzy numbers / P. Grzegorzewski, E. Mr'owka // Fuzzy Sets Syst. – 2005. – Vol. 153. – P. 115-135.
26. Ban A. I. Trapezoidal approximation and Aggregation / A. I. Ban, L. C. Coroianu, P. Grzegorzewski // Fuzzy Sets Syst. – 2011. – Vol. 177. – P. 45-59.
27. Пажи Д. Г. Распылители жидкости / П. Г. Пажи, В. С. Галустов. – Москва : Химия, 1979. – 216 с.
28. Пажи Д. Основы техники распыления жидкости / Д. Пажи, В. Галустов. – Москва : Химия, 1984. – 256 с.
29. Сторожев С. В. Алгоритм двухпараметрической аппроксимации нормального частотного распределения нечетким интервалом / С. В. Сторожев // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2014. – № 2. – С. 78-80.

Поступила в редакцию 21.10.2019 г.

FUZZY SET STRATEGY FOR ESTIMATION OF SOME CHARACTERISTICS FUNCTIONING CENTRIFUGAL-JET INJECTORS IN THE TECHNICAL SYSTEM OF THERMAL STABILIZATION

S.V. Storozhev, Nguyen-Kuok Shi, Tran Ba Le Hoang

A numerical-analytical fuzzy-set methodology for estimating uncertain endogenous parameters when studying a theoretical model of the operation of centrifugal-jet injectors used to form gas-jet flows in technical thermal stabilization systems with a wide range of purposes, including cooling systems for limiters of thermonuclear fusion devices has been developed. The technique takes into account the presence of scattering errors in the values of exogenous physical, mechanical and geometric parameters of the model. The heuristic principle of generalization for obtaining analytical representations of the studied characteristics model of the injectors functioning with fuzzy-set arguments is used. An example of the implementation of the methodology is given.

Keywords: technical systems of thermal stabilization, centrifugal-jet injectors, theoretical models of functioning, errors of initial data, accounting for technological scatter, fuzzy-set technique, heuristic principle of generalization.

Сторожев Сергей Валериевич

кандидат экономических наук, доцент кафедры высшей математики и информатики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.
E-mail: cergeys@i.ua

Storozhev Sergey Valerievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of High Mathematics and Informatics of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

Нгуен Куок Ши

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: nguyenuocshi@yahoo.com

Nguyen-Kuok Shi

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russian Federation Moscow.

Чан Ба Ле Хоанг

аспирант ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: hoang.tranbale@gmail.com

Tran Ba Le Hoang

post-graduate student National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russian Federation Moscow.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 537.84

ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕЙЛОРОВСКИХ И ВОЛНИСТЫХ ВИХРЕЙ ПРИ МГД-ВРАЩЕНИИ

© 2019 А.Ф. Зибольд

Рассматривается стационарная неустойчивость осесимметричного течения вязкой проводящей жидкости в бесконечно длинном круговом цилиндре, возникающего под влиянием коаксиально вращающегося магнитного поля произвольной поворотной симметрии. Задача решена для двух случаев: в низкочастотном приближении и для произвольных значений относительной частоты. Устойчивость первичного азимутального течения рассматривается относительно возникновения вихрей Тейлора и волнистых вихрей различных порядков.

Ключевые слова: вращающееся магнитное поле, стационарная неустойчивость, вихри Тейлора, волнистые вихри.

Исследуется неустойчивость течения вязкой несжимаемой электропроводной жидкости в бесконечно длинном цилиндрическом сосуде, возбуждаемого соосно вращающимся магнитным полем (ВМП) произвольной поворотной симметрии. Поскольку ближайшим аналогом такого течения в обычной гидродинамике является течение Куэтта между вращающимися цилиндрами, остановимся на некоторых классических результатах, которых следует ожидать при переходе к нашей магнитогидродинамической постановке задачи.

Известно, что при больших значениях числа Рейнольдса течение Куэтта между соосными цилиндрами (внутренний цилиндр вращается, а внешний неподвижен) теряет устойчивость [1]. При этом первичное чисто ламинарное течение сменяется ламинарно-вихревым течением. На фоне первичного течения возникает вторичное течение в виде так называемых вихрей Тейлора, представляющих собой систему осесимметричных тороидов с последовательно чередующимися направлениями вращения жидкости в них. Вихри Тейлора возникают как стационарная бифуркация течения Куэтта.

Анализируя устойчивость течения Куэтта между вращающимися цилиндрами, Линь [2] отметил, что уравнения первого приближения для малых возмущений скорости и давления допускают решения периодические относительно φ и z :

$$f=f(r) \cdot \exp(\sigma t + in\varphi + iaz),$$

где n – целое число, а a – действительное (безразмерное волновое число).

Обычно рассматривают специальный случай вращательной симметрии $n=0$. В этом случае первичное течение не зависит от φ , но возмущения скорости u_r , u_φ , u_z и давления q не равны нулю. Такая задача об устойчивости первичного азимутального течения по отношению к стационарным осесимметричным возмущениям как раз позволяет исследовать условия возникновения вторичного течения в виде тейлоровских вихрей. Случай $n \neq 0$ соответствует появлению так называемых волнистых вихрей. При определенных условиях происходит бифуркация вихрей Тейлора в волнистые вихри.

При этом тороиды трансформируются таким образом, что образуют волну, распространяющуюся в азимутальном направлении. Поскольку число волн вдоль азимута может быть только целым, то понятно, почему n – целое (n – порядок волнистости). Конечно, после потери устойчивости первичного азимутального течения результирующее ламинарно-вихревое течение будет представлять собой суперпозицию первичного азимутального течения и системы вихрей Тейлора. И в дальнейшем необходимо исследовать устойчивость относительно возникновения волнистых вихрей уже такого сложного течения. Сложился стандартный подход к таким исследованиям [3]: структура течения и амплитуда реальных вихрей Тейлора находятся в нелинейной постановке, далее задача исследования устойчивости такого нового течения (задача бифуркации в волнистые вихри) изучается в линейной постановке. Теория предполагает ряд бифуркаций с последовательно применяемыми поочередно линейными и нелинейными приближениями. Именно такой подход использовали Дэви, Ди Прима и Стюарт в своей ставшей уже классической работе [4].

Донецкой группой гидродинамиков под руководством проф. А.Б. Капусты был выполнен цикл работ по исследованию устойчивости осесимметричного ламинарного течения проводящей жидкости в бесконечно длинном круговом цилиндре, возникающего под действием соосно вращающегося магнитного поля произвольной поворотной симметрии [5-9]. Задача решена для двух случаев: в низкочастотном приближении и для произвольных значений относительной частоты. С использованием метода Галеркина для широкого диапазона изменения параметров течения рассчитаны кривые нейтральной устойчивости, отделяющие область одномерного азимутального течения от области трехмерного ламинарно-вихревого течения. Для всех исследованных диапазонов значений параметров течения в расчетах была получена одновихревая (по радиусу) структура тейлоровских вихрей. Ричардсон [10], рассматривавший подобную задачу, получил одну корректную точку, так что говорить о кривой нейтральной устойчивости при этом не приходится. С достаточной уверенностью можно утверждать, что полученная Ричардсоном при этом трехвихревая структура вторичных течений нереальна и является следствием недостаточной точности выполненных им расчетов. Исследовано влияние параметров течения как на изменение характерного размера тейлоровского вихря, так и на смещение центра вихря вдоль радиуса цилиндра.

На следующем этапе, по аналогии с классическим подходом, исследовалась бифуркация тейлоровских вихрей в волнистые. Учитывая сложность нелинейной постановки задачи при МГД-вращении, была предпринята попытка оценить насколько будут отличаться результаты задачи на устойчивость в линейной постановке. При этом использовалось рациональное соображение о малости нелинейных эффектов ввиду малости самой первичной азимутальной скорости при формировании тейлоровских вихрей (режим, сопоставимый с классическим). Дэви, Ди Прима и Стюарт теоретически установили, что критическое число Тейлора, при котором тейлоровские вихри становятся неустойчивыми и возникают волнистые вихри, на 8% превышает число Тейлора, при котором первичное одномерное течение теряет свою устойчивость и впервые появляются вихри Тейлора. Поскольку бифуркация тейлоровских вихрей в волнистые для течения Куэтта происходит при весьма малых скоростях движения жидкости, для МГД-вращения это будет соответствовать малым числам Гартмана (область вблизи границы абсолютной устойчивости по Ha).

Для корректного сопоставления результатов используем аналог числа Тейлора для магнитной гидродинамики – магнитное число Тейлора. Получаем аналогичную

оценку в 6.78%, что близко к результатам работы [4]. Дальнейшие расчеты при уже не малых числах Гартмана привели к неожиданным результатам [11-17]. Оказалось, что в случае одной пары полюсов ВМП ($p=1$) кривые нейтральной устойчивости для $n=1$ располагаются не строго внутри области, ограниченной кривыми нейтральной устойчивости для $n=0$, как это происходит при исследовании устойчивости течения Куэтта, а при определенных значениях параметров течения пересекают эти кривые (рис. 1).

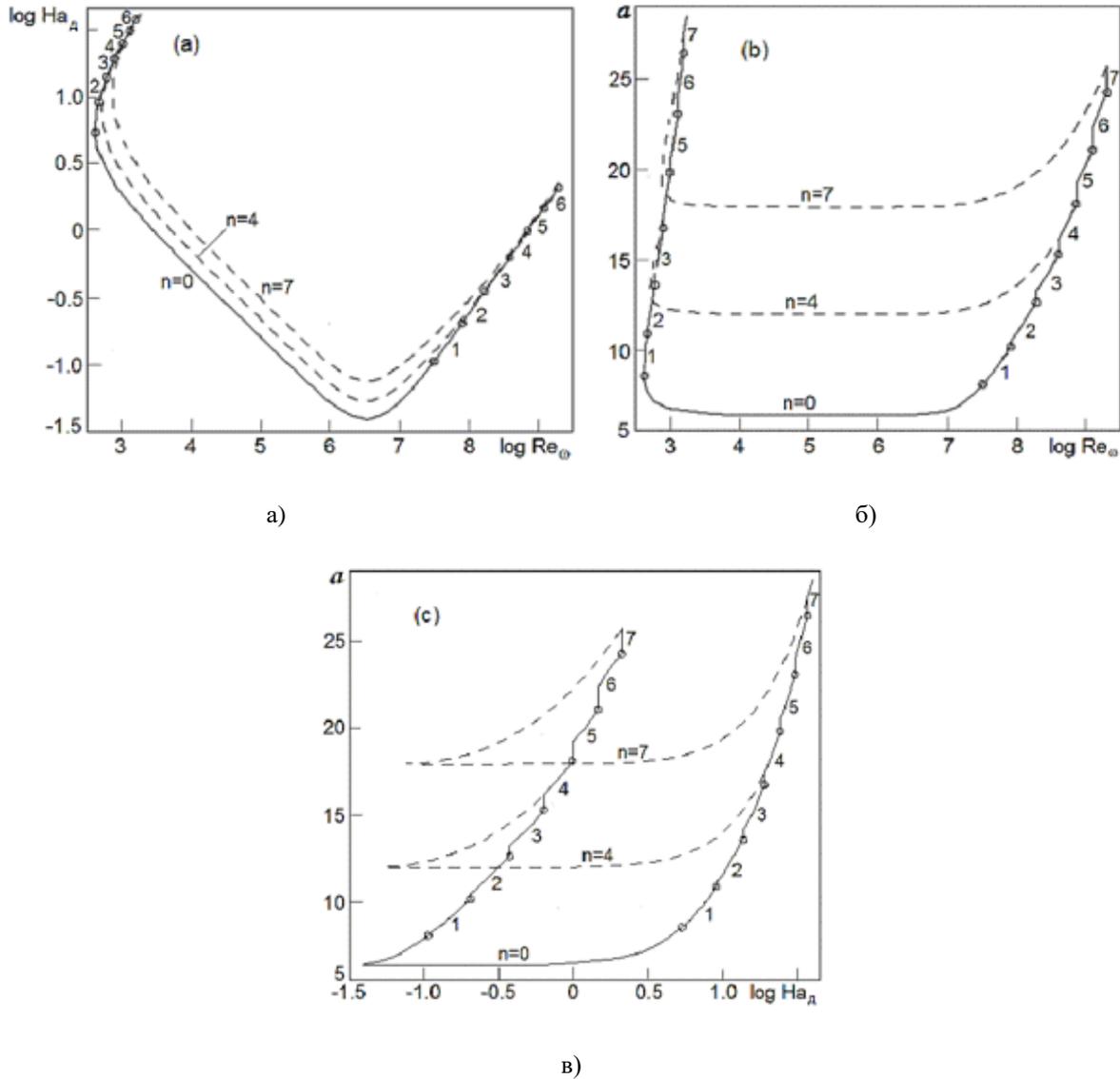


Рис. 1. Проекция кривых нейтральной устойчивости: а) в плоскости Re_∞, Ha_D , б) в плоскости Re_∞, α , в) в плоскости Ha_D, α . Везде $p=1, Pr_m=10^{-6}$

При этом выше точки бифуркации граница области неустойчивости будет соответствовать отрезку кривой нейтральной устойчивости с $n=1$, а дальнейший участок кривой с $n=0$ реализоваться не будет. Аналогично кривые нейтральной устойчивости для $n=2$ пересекают кривые нейтральной устойчивости для $n=1$, и так далее. Фактически, мы имеем дело с целым каскадом бифуркаций. Характерно, что такие переходы сопровождаются скачкообразным увеличением волнового числа, т.е.

переходом ко все более мелкомасштабным вихрям. Оказалось, что при $p=1$ тейлоровские вихри возникают в достаточно широком, но ограниченном диапазоне параметров течения, и при возрастании параметров теряют устойчивость и переходят в волнистые вихри. При этом потеря устойчивости первичного течения может приводить к появлению непосредственно волнистых вихрей того или иного порядка, минуя стадию тейлоровских вихрей. С увеличением порядка поворотной симметрии ВМП ($p=2$) сокращается диапазон параметров, при которых потеря устойчивости первичного течения приводит к появлению тейлоровских вихрей. При $p=3$ вихри Тейлора вообще не возникают, а сразу появляются волнистые вихри с $n \geq 1$. При $p=4$ зона возникновения волнистых вихрей с $n=1$ сокращается, а при $p=5$ волнистые вихри появляются уже только с $n \geq 2$. Увеличение значений числа Гартмана, относительной частоты и порядка поворотной симметрии ВМП уменьшает характерный размер как тейлоровских, так и волнистых вихрей. Центры вихрей при этом смещаются к стенке цилиндра.

Оказалось, что значения волновых чисел, при которых происходят переходы между структурами с соседними n , довольно-таки слабо зависят от порядка поворотной симметрии ВМП. При этом и величина скачка волновых чисел в точках переходов для каждого n остается практически постоянной. Если при переходе от режима с $n=0$ к режиму с $n=1$ вертикальный размер волновой ячейки практически не изменяется, при переходе от $n=1$ к $n=2$ уменьшается на 2%, при дальнейших переходах этот размер уменьшается на 4-5%. Можно предположить, что это объясняется тем, что геометрические параметры гидродинамических структур в точках переходов существенным образом зависят от геометрии магнитного поля. А различие конфигурации магнитных полей для различных p при не малых значениях относительной частоты в большой степени нивелируется из-за скин-эффекта.

Выводы. Выполненное исследование позволило установить интересный факт, что при потере устойчивости первичного течения возможно возникновение волнистых вихрей без промежуточной стадии в виде тейлоровских вихрей. В этом заключается принципиальное отличие полученных результатов от результатов классической задачи исследования устойчивости течения Куэтта между соосными цилиндрами [4], когда переходу к волнистым вихрям обязательно предшествует стадия тейлоровских вихрей. Такое отличие можно объяснить тем, что течение Куэтта возникает за счет сил вязкости (прилипание жидкости к вращающемуся цилиндру). А в нашем случае при использовании ВМП течение возбуждается за счет полевого воздействия на проводящую жидкость при неподвижной стенке цилиндра. Профили первичного течения, таким образом, принципиально отличаются: в нашем случае азимутальная скорость на оси цилиндра обращается в нуль, а между ядром течения и стенкой цилиндра всегда существует хотя бы тонкий погранслой.

Проведенное исследование позволяет расширить наши представления о механизмах возникновения неустойчивости течения проводящей жидкости, возбуждаемого ВМП в бесконечно длинном цилиндрическом сосуде. Оказалось, что использование линейной постановки задачи вполне корректно. Это позволило получить принципиально важную возможность прогнозировать возникновение вторичного течения в виде тейлоровских вихрей или волнистых вихрей того или иного порядка в зависимости от величины силового воздействия на жидкость и порядка поворотной симметрии ВМП. По-видимому, эти выводы будут справедливы и для достаточно длинных цилиндров конечной длины, когда можно пренебречь влиянием торцов на течение в центральной части сосуда. Но эти вопросы требуют дальнейшей проработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor G. I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders / G. I. Taylor // Philosophical Transactions of the Royal Society. – 1923. – Vol. A223. – P. 289-343.
2. Линь Цзя-цзяо. Теория гидродинамической устойчивости / Линь Цзя-цзяо ; пер. с англ. под ред. С. В. Фальковича. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1958. – 194 с.
3. Richtmyer R. D. Principles of Advanced Mathematical Physics. Vol. 2 / R. D. Richtmyer. – Berlin-Heidelberg-New York : Springer-Verlag, 1981. – 323 с.
4. Davey A. On the instability of Taylor vortices / A. Davey, R. C. Di Prima, J. T. Stuart // Journal of Fluid Mechanics. – 1968. – Vol. 31, № 1. – P. 17-52.
5. Капуста А. Б. О стационарной неустойчивости осесимметричного течения жидкости во вращающемся магнитном поле / А. Б. Капуста, А. Ф. Зибольд // Магнитная гидродинамика. – 1977. – Т. 13, № 3. – С. 67-76.
6. Капуста А. Б. Влияние симметрии вращающегося магнитного поля на устойчивость стационарного осесимметричного течения / А. Б. Капуста, А. Ф. Зибольд // Магнитная гидродинамика. – 1981. – Т. 17, № 4. – С. 134-136.
7. Капуста А. Б. Стационарная неустойчивость осесимметричного течения, возбуждаемого высокочастотным вращающимся магнитным полем / А. Б. Капуста, А. Ф. Зибольд // Магнитная гидродинамика. – 1983. – Т. 19, № 1. – С. 77-81.
8. Зибольд А. Ф. Стационарная неустойчивость осесимметричного течения жидкости в слабом вращающемся магнитном поле / А. Ф. Зибольд // Магнитная гидродинамика. – 1984. – Т. 20, № 2. – С. 61-68.
9. Зибольд А. Ф. Об одной простой постановке задачи на устойчивость в слабом вращающемся магнитном поле / А. Ф. Зибольд // Магнитная гидродинамика. – 1984. – Т. 20, № 3. – С. 132-133.
10. Richardson A. T. On the stability of a magnetically driven rotating fluid flow / A. T. Richardson // Journal of Fluid Mechanics. – 1974. – Vol. 63, № 3. – С. 593-605.
11. Zibold A. F. Instability of the Taylor vortices: transition to the wavy-vortex flow / A. F. Zibold // Book of abstracts : Russian Conference on Magneto Hydrodynamics, June 22-25, 2015, Perm, Russia / Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS. – Perm, 2015. – P. 120.
12. Zibold A. F. Stationary wave instability of axisymmetric flow of a liquid in a rotating magnetic field / A. F. Zibold // Book of abstracts of Sixth International Symposium on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics BIFD 2015, ESPCI Paris, 15-17 July 2015. – Paris, 2015. – P. 269.
13. Zibold A. F. Effect of the symmetry of a rotating magnetic field on the instability of a flow of the conducting liquid : Taylor's and wavy vortices / A. F. Zibold // Proceedings of the 10th PAMIR International Conference – Fundamental and Applied MHD, Cagliari, Italy, June 20-24, 2016. – Cagliari, 2016. – P. 12-16.
14. Зибольд А. Ф. Влияние симметрии вращающегося магнитного поля на неустойчивость течения проводящей жидкости: вихри Тейлора и волнистые вихри / А. Ф. Зибольд // Комп'ютерна гідромеханіка : тези п'ятої міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 29-30 вересня 2016 р. / Інститут гідромеханіки НАН України. – Київ, 2016. – С. 33-34.
15. Zibold A. F. Effect of the symmetry of a rotating magnetic field on the flow instability of the conducting liquid (Taylor's and wavy vortices) / A. F. Zibold // Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics : Book of abstracts of the 7th International Symposium (BIFD-2017), The Woodlands, TX, USA, July 11-14, 2017. – Woodlands, 2017. – P. 107.
16. Zibold A. F. Peculiarity of Taylor's and wavy vortices initiation in the instability study of the conducting liquid flow, generated by a rotating magnetic field // Book of abstracts of Russian conference on Magneto Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, June 18-21, 2018, Perm, Russia. – Perm, 2018. – P. 162-163.
17. Зибольд А. Ф. Особенности возникновения тейлоровских и волнистых вихрей под действием вращающегося магнитного поля / А. Ф. Зибольд // Комп'ютерна гідромеханіка : тези шостої міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 26-27 вересня 2018 р. / Інститут гідромеханіки НАН України. – Київ, 2018. – С. 28-29.

Поступила в редакцию 23.10.2019 г.

**PECULIARITY OF TAYLOR'S AND WAVY VORTICES BEGINNING,
GENERATED BY MHD-ROTATION**

A.F. Zibold

Stationary instability of axisymmetric laminar flow of a viscous conducting liquid in infinitely long circular cylinder, arising under the influence of coaxially rotating magnetic field of any rotary symmetry, is investigated. The problem is solved for two cases: in low-frequency approach and for any value of relative frequency. The stability of a primary azimuthal flow is considered in terms of Taylor's vortices, and wavy vortices of different orders.

Keywords: rotating magnetic field, stationary instability, Taylor's vortices, wavy vortices.

Зибольд Александр Федорович
пенсионер,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: aleksandrzibold@gmail.com

Zibold Alexander Fedorovich
pensioner,
DPR, Donetsk.

УДК 532.5

О СВЯЗИ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ С ПРОЯВЛЕНИЕМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В РАСТВОРАХ МПАВ

© 2019 А.П. Симоненко, П.В. Асланов, И.А. Золотарёва, Т.К. Гучмазова

На основе анализа результатов экспериментальных исследований явления снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) и физико-химических свойств лиотропных жидких кристаллов смектического типа предложена гипотеза о связи снижения ГСТТ с проявлением, в пристенной области течения растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ), жидкокристаллических свойств – анизотропии динамической вязкости и вязко-упругих свойств.

Ключевые слова: гидродинамическое сопротивление турбулентного трения, мицеллообразующие поверхностно-активные вещества, жидкие кристаллы.

Анизотропия динамической вязкости. На основании обзора работ, посвящённых снижению ГСТТ добавками высокомолекулярных полимеров (ВМП), показано, что в результате большого градиента скоростей в вязком подслое и переходной области полимерные макромолекулы ориентируются большими осями вдоль по потоку. В результате этого величины вязкости движущейся жидкости с добавками отличаются вдоль разных осей - по потоку и перпендикулярно к нему. В связи с этим, вполне обосновано, ряд авторов для объяснения явления снижения ГСТТ полимерными макромолекулами ввели понятие коэффициента анизотропии динамической вязкости Ka [1-6].

Для удлинённых частиц, при небольших градиентах скорости, $Ka=1$, а при больших — всегда $Ka>1$, т.к. с ростом критерия Рейнольдса угол преимущественной ориентации анизометрических частиц (полимерных макромолекул) в потоке (относительно продольной оси) уменьшается, приближаясь к нулю. В неподвижной жидкости, а также в ядре потока, вязкость имеет наибольшее значение, а вблизи стенки — наименьшее. Поэтому вязкость сред с гидродинамически-активными полимерами большой молекулярной массы характеризуются неньютоновскими свойствами, т.е. зависит от сдвиговых напряжений. Особо следует заметить, что потоки таких жидкостей обладают не только анизотропией вязкости, но и появлением вязкоупругих свойств.

По мнению авторов работ [7,8] анизотропия динамической вязкости свойственна также растворам гидродинамически-активных МПАВ и некоторым суспензиям удлинённых частиц.

Корреляция между эффектом снижения ГСТТ и мицеллообразованием. Критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) — важная физико-химическая характеристика. Она показывает склонность МПАВ к образованию мицеллярных структур и зависит как от особенностей молекулярного строения МПАВ, так и от внешних факторов: температуры, наличия в растворе электролитов, полярных органических веществ и т. д.

Критические концентрации мицеллообразования ($ККМ_1$, $ККМ_2$ и т. д.) могут быть определены по изменению объёмных (или поверхностных) свойств растворов при повышении в них содержания МПАВ. При ККМ резко изменяется ход кривых концентрационной зависимости большинства физико-химических характеристик

растворов - поверхностного натяжения, электропроводности, светорассеяния, вязкости и др.

ККМ₁ и ККМ₂, в растворах ионогенных МПАВ, могут быть определены по измерению концентрационной зависимости электропроводности. Подвижность отдельных ионов таких МПАВ заметно отличается от подвижности агрегатов из них (мицелл), поэтому при ККМ происходит резкое изменение этой зависимости. В работе [9] приведены результаты измерения величины обратной эквивалентной электропроводности водных растворов пальмитата натрия (C₁₅H₃₁CONa), как функции от его концентрации в растворе.

Результаты исследований показали, что характер кривой вблизи ККМ₁ указывает на изменение состояния молекул растворенного вещества. Наблюдающийся спад кривой, после ККМ₁, объясняется тем, что образующиеся мицеллы хотя и переносят ток, но, из-за большого размера, менее подвижны в электрическом поле, чем неагрегированные ионы. Кроме этого, сильное электростатическое притяжение со стороны заряженных мицелл связывает часть противоположно заряженных ионов на их поверхности. Такая блокировка электрических зарядов также уменьшает электропроводность растворов. ККМ₁ соответствует появлению в растворе пальмитата натрия сферических мицелл Гартли. При ККМ₂, на кривой зависимости обратной электропроводности от концентрации МПАВ, в растворе наблюдается второй, более резкий излом. Он связан с увеличением степени агрегации молекул МПАВ, укрупнению мицелл и изменению их формы. При этом в растворе образуются анизометрические мицеллярные структуры — цилиндрические палочкообразные и пластинчатые мицеллы, которые заряжены слабее сферических из-за меньшей диссоциации МПАВ при больших концентрациях, а также обладают меньшей подвижностью в электрическом поле по сравнению с мицеллами Гартли. Оба эти фактора и приводят к резкому снижению электропроводности растворов при ККМ₂.

В работе [10] авторы отмечают, что в области малых концентраций (выше ККМ₁, но меньше ККМ₂) мицеллы МПАВ всегда симметричны, сохраняют сфероидальную форму и равномерно покрыты по поверхности гидратированными полярными группами. Это означает, что сферические мицеллы вполне стабилизированы. Их межфазное натяжение – удельная свободная поверхностная энергия на границе с окружающим растворителем – очень близко к нулю. Поэтому они не могут взаимодействовать друг с другом, образовывать анизометрические цепочки или пространственные сетки. Это легко обнаруживается реологическими методами. Вязкость таких коллоидных систем, в широком интервале не слишком больших градиентов скорости, подчиняется уравнению Эйнштейна, линейно возрастая с концентрацией МПАВ в растворе. Это хорошо согласуется в области концентраций до ККМ₂ с измеренной концентрационной зависимостью относительной вязкости водного раствора пальмитата натрия. При дальнейшем увеличении содержания МПАВ, начиная со второй критической концентрации мицеллообразования (ККМ₂), мицеллы пальмитата натрия становятся все более асимметричными и вызывают появление ярко выраженной аномалии вязкости. Очевидно, что это связано с превращением сфероидальных мицелл в асимметричные пластинчатые мицеллы, ориентация которых и вызывает отклонение от истинно вязкого течения.

Жидкие кристаллы и их классификация [11-15]. Жидкие кристаллы (ЖК) – это фазовые состояния, в которые переходят некоторые вещества, или их растворы, при определенных условиях (температуре, давлении, концентрации вещества в растворе). ЖК одновременно характеризуются свойствами как жидкостей (текучесть), так и

кристаллов (анизотропия). По структуре ЖК представляют собой вязкие жидкости, состоящие из молекул вытянутой формы, которые определенным образом упорядочены во всем объеме этой жидкости. Наиболее характерным свойством ЖК является их способность изменять ориентацию под воздействием небольших «возмущающих факторов» (электрические и магнитные поля, механическое напряжение и др.). По типу ЖК разделяют на две группы: нематики и смектики. В свою очередь нематики подразделяют на собственно нематические и холестерические жидкие кристаллы.

Смектический тип (смектик – от греческого слова «смегма» – мыло) ближе всех из ЖК к истинно кристаллическим телам. Молекулы таких ЖК располагаются в слоях и их центры тяжести движутся в двух измерениях на смектической плоскости. При этом длинные оси молекул в каждом слое могут располагаться как перпендикулярно плоскости слоя (ортогональные смектики), так и под некоторым углом к ней (наклонные смектики).

Нематический тип ЖК (нематик – от греческого слова «нема» – нить) характеризуется наличием только одномерного ориентационного порядка длинных (калиматики) и коротких (дискотики) осей молекул. При этом центры тяжести молекул расположены в таких ЖК хаотично, что свидетельствует об отсутствии трансляционного порядка.

ЖК можно разделить по способам их получения: а) термотропные ЖК, образующиеся в результате нагрева твердого вещества и существующие в определенном диапазоне температур и давлений; б) лиотропные ЖК, которые представляют собой двухкомпонентные или многокомпонентные системы и образуются в растворах (смесях) стержневидных молекул данного вещества и воды или других полярных растворителей.

Из лиотропных жидких кристаллов, с точки зрения снижения ГСТТ, особый интерес представляют собственно ЖК, вязкость которых практически не отличается от вязкости растворителя. Для растворов гидродинамически-активных МПАВ это наименьшая ньютоновская вязкость, которую они приобретают при увеличении сдвиговых напряжений [16].

Профили скорости и спектры энергии [17]. Результаты измерений профилей осредненной скорости в универсальных координатах $U^+ = f(y^+)$ для растворов одного из наиболее эффективных МПАВ – метаупона, с концентрациями 0,2 и 0,3%, представлены на рис. 1. Здесь безразмерная скорость определялась из выражения $U^+ = \langle U \rangle / U^*$, где $\langle U \rangle$ – осредненная по времени локальная скорость течения, $U^* = (\tau_w / \rho)^{1/2}$ – динамическая скорость, τ_w – напряжение трения на стенке, ρ – плотность жидкости, а безразмерная координата $y^+ = U^* y / \nu$, где y – текущая нормальная к стенке координата ($y=0$ на стенке) рассчитывалась по вязкости раствора ν , определенной из закона Ньютона $\tau_w = \rho \nu (\langle U \rangle / dy)_{y \rightarrow 0}$. Измерения проводились при числах Рейнольдса, рассчитанных по вязкости растворителя, равных 10000, 21000 и 37000.

Из рисунка видно, что введение добавок приводит к значительным изменениям в распределении профилей скорости по сечению потока. При течении растворов метаупона они изменяются значительно круче в сравнении с универсальным профилем для ньютоновских жидкостей. На всех профилях скорости можно выделить те же три характерные зоны, удовлетворяющие трехслойной модели турбулентного течения в трубах, что и при течении ньютоновских жидкостей: вязкий подслой, переходную или буферную зону и зону турбулентного ядра. Вязкий подслой и переходная зона при течении ньютоновских жидкостей занимают, в зависимости от расходной скорости, не более 15% сечения трубы и уменьшаются с увеличением скорости течения. Для случая течения раствора метаупона с концентрацией 0,2% это положение сохраняется в силе.

При этом следует заметить, что безразмерная толщина вязкого подслоя (ее значение в этом случае $\delta_{\text{мв}}^+ = 8$) увеличивается по сравнению с течением воды ($\delta_{\text{в}}^+ = 5$), а границу переходной зоны, так же как и для ньютоновских жидкостей (в том числе воды), можно определить при координате $y^+ = 30$. Если профиль скорости в переходной зоне и турбулентном ядре описывать принятым для трехслойной модели турбулентного течения в трубе ньютоновских жидкостей уравнением вида $U^+ = A \cdot \lg y^+ + B$, то в обеих зонах течения значение коэффициента A больше, чем при течении воды. Соответственно меняет свое значение и величина B . При этом коэффициенты A и B принимают различные значения (величины) для разных чисел Рейнольдса при течении раствора метаупона.

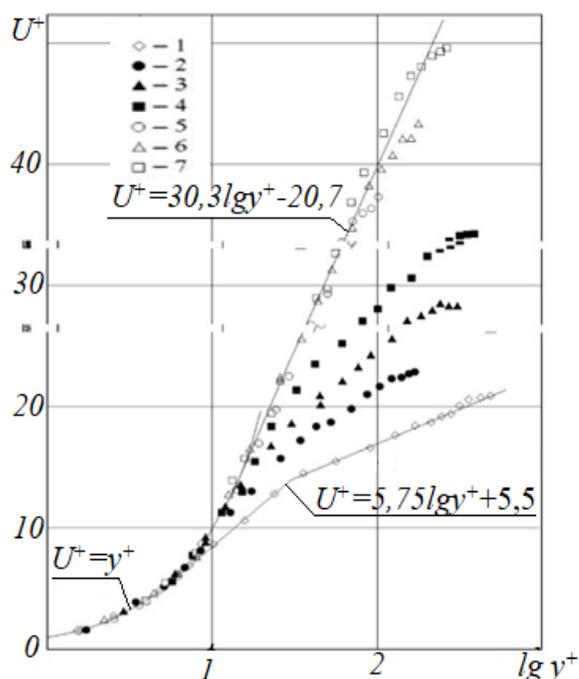


Рис. 1. Безразмерные профили скорости при течении воды (1) и растворов метаупона концентраций 0,2% вес. (кривые 2 – 4) и 0,3% вес. (кривые 5 – 7), числа Рейнольдса рассчитаны по вязкости воды и равны 10000, 21000 и 37000

Значительно существеннее отличаются профили скорости при течении раствора метаупона с концентрацией равной 0,3% вес. Область вязкого подслоя и переходной зоны занимают в этом случае около 60% сечения потока в независимости от расходной скорости течения (числа Рейнольдса рассчитаны по вязкости растворителя), что является неожиданным результатом. Универсальную координату внешней границы вязкого подслоя для всех трех режимов течения можно определить приблизительно равной 15, что существенно больше, чем для случая течения воды, так и для случая течения раствора метаупона с концентрацией равной 0,2% вес. В переходной зоне, для всех трех исследованных режимов течения раствора этой концентрации, кривые $U^+ = f(y^+)$ совпали.

Раствор метаупона концентрации 0,3% вес. обладает максимальным, для данных условий проведения эксперимента, снижением сопротивления трения (рис. 1). Математическая обработка совокупности экспериментальных точек для этих трех режимов течения показала, что в переходной зоне течения в универсальных координатах зависимость осредненной скорости течения по сечению потока можно аппроксимировать выражением

$$U^+ = 30,3 \cdot \lg y^+ - 20,7.$$

За внешнюю границу переходной зоны можно принять координату $y=0,6H$, где H – полувысота канала. В турбулентном ядре профили скорости также описываются логарифмическим уравнением вида

$$U^+ = A_1 \cdot \lg y^+ + B_1,$$

где A_1 , для всех трех чисел Рейнольдса, при которых проводились исследования, можно принять равным $11,6$, а B_1 для каждого режима течения имеет свое значение.

Одной из важных характеристик, определяющих структуру турбулентного потока, является плотность энергии пульсаций скорости. Экспериментально можно измерить только спектральные функции по частотам, связанные с соответствующей одномерной спектральной функцией по волновым числам. Тем не менее, одномерный спектр служит достаточно хорошим приближением к трехмерному спектру (исключая область малых волновых чисел), что позволяет получить по нему важную информацию о структуре турбулентного потока. С помощью лазерного анемометра авторами работы [17] измерены спектры продольных пульсаций скорости при течении воды и раствора МПАВ – цетилпиридиний хлорида (ЦПХ) в прямоугольном канале сечением $0,04 \cdot 0,04$ м. Измерения одномерных энергетических спектров продольных пульсаций скорости были проведены в двух точках с координатами $y = 2,5$ и 20 мм, которые расположены в переходной зоне (при течении ЦПХ) и в области турбулентного ядра (на оси канала) соответственно. Результаты измерений приведены на рис. 2 в виде зависимости нормированной спектральной плотности энергии продольных пульсаций скорости $E^+ = E(k)/\sqrt{u'^2}$ от безразмерного волнового числа $k^+ = kR_r$, где $\sqrt{u'^2}$ – среднеквадратичное значение продольных пульсаций скорости, R_r – гидравлический радиус канала.

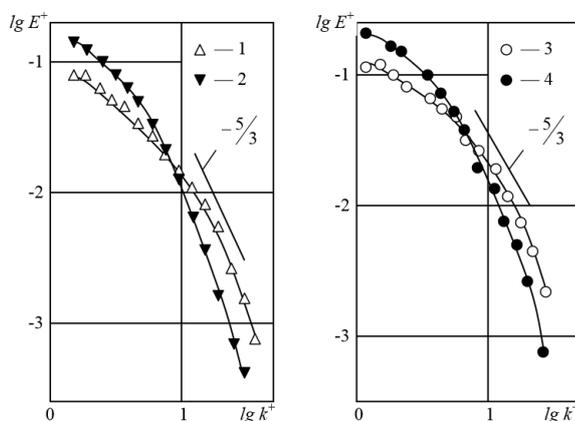


Рис. 2. Спектры продольных пульсаций скорости при течении воды (1, 3) и водного раствора цетилпиридиний хлорида (2, 4) при $y = 2,5$ мм (1, 2) и 20 мм (3, 4). Данные работы [18]

Следует отметить, что в области низких волновых чисел спектральная плотность энергии E^+ в растворе ЦПХ выше, чем в воде. Следовательно, в потоке с добавками ЦПХ возрастает относительная доля энергии, содержащейся в движениях большого масштаба. В целом добавки поверхностно-активных веществ приводят к существенному изменению в распределении энергии пульсаций скорости по спектру волновых чисел. Можно считать, что они как бы «перекрывают» спектральный канал передачи турбулентной энергии в его высокочастотной части путем изменения структуры мелкомасштабной турбулентности. Отметим, что аналогичное воздействие на перестройку энергетического спектра продольных пульсаций скорости оказывают и добавки высокомолекулярных полимеров.

В турбулентном потоке диссипация энергии происходит в вихрях наименьшего размера, когда на движение существенное влияние оказывают силы внутреннего трения (вязкости). Это означает, что энергия, сосредоточенная в высокочастотной части спектра, быстро рассеивается вследствие трения. Скорость этого рассеивания характеризуется средней удельной диссипацией турбулентной энергии ε . Зная ε и предполагая изотропность мелкомасштабных пульсаций скорости, можно определить внутренний (колмогоровский) масштаб турбулентности, совпадающий по порядку своего значения с масштабом наибольших из тех возмущений, на которые вязкость еще оказывает существенное влияние. По опытным данным, с использованием соотношений $\varepsilon = 2\nu \int_0^\infty k^2 E(k) dk$ и $\lambda = \varepsilon^{-1/4} \cdot \nu^{3/4}$ была проведена оценка диссипации турбулентной энергии ε и колмогоровского масштаба λ_0 для течений воды и раствора ЦПХ. Рассчитанные значения ε и λ_0 , для точек с координатами $y=2,5$ и 20 мм, приведены в таблице 1.

Анализ результатов расчета значений величин ε и λ_0 показывает, что введение добавок МПАВ в турбулентный поток жидкости приводит к уменьшению диссипации турбулентной энергии и возрастанию колмогоровского масштаба турбулентности. Аналогичное влияние на ε и λ_0 оказывают также добавки полимеров.

Таблица 1. Рассчитанные значения ε и λ_0 , для точек с координатами $y=2,5$ и 20 мм

y, мм	Вода		Раствор ЦПХ	
	$10^4 \cdot \varepsilon, \text{ Дж/кг}\cdot\text{с}$	$10^4 \cdot \lambda_0, \text{ м}$	$10^4 \cdot \varepsilon, \text{ Дж/кг}\cdot\text{с}$	$10^4 \cdot \lambda_0, \text{ м}$
2,5	5,16	2,04	4,65	3,90
20	1,48	2,79	0,37	4,14

Таким образом, эффект снижения турбулентного трения в растворах мицеллообразующих поверхностно-активных веществ связан с уменьшением диссипации кинетической энергии пульсационного движения и увеличения средних линейных размеров турбулентных возмущений (вихрей), посредством которых осуществляется диссипация турбулентной энергии в тепло.

Предполагаемый механизм эффекта. Общими особенностями, характеризующими течение растворов МПАВ и полимеров (по отношению к воде), являются: утолщение вязкого подслоя; возникновение упругих напряжений и существование запасенной упругой энергии; уменьшение турбулентного трения; усиление асимметрии в распределении плотности вероятности продольных пульсаций скорости вблизи стенки; снижение спектральной плотности турбулентной энергии в области больших волновых чисел.

Отличительные особенности: в растворах МПАВ (по сравнению с полимерными) существенно снижается интенсивность продольных пульсаций скорости; в потоках с добавками МПАВ анизотропия турбулентных пульсаций скорости значительно меньше.

Автор работы [18] связывает снижение ГСТТ с образованием в растворах МПАВ периодических коллоидных структур (ПКС).

Периодические коллоидные структуры представляют собой системы, которые по своим физико-механическим свойствам являются промежуточными между идеально упругими телами и ньютоновскими жидкостями. По-другому их ещё называют ультраслабыми твердыми телами. Свойства этих структур сильно зависят от формы, размеров и взаимного положения частиц, а также от толщины разделяющих их жидких прослоек. Это определяется природой действующих в дисперсной системе сил и, соответственно, их величиной, которая зависит от расстояния между частицами и их геометрических параметров.

Таким образом, на основе приведенного анализа можно высказать предположение о

том, что эффект снижения турбулентного трения в растворах МПАВ связан с возникновением в них локальных периодических коллоидных структур.

Следует отметить, что, с точки зрения жидкокристаллического состояния вещества, периодические коллоидные структуры, возникающие в растворах МПАВ, представляют собой лиотропные жидкие кристаллы.

Таким образом, можно предположить, что эффект снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения в растворах МПАВ связан с проявлением в пристенной области течения жидкокристаллических свойств – анизотропии динамической вязкости и вязкоупругих свойств.

Выводы. На основе анализа результатов экспериментальных исследований установлена аналогия физико-химических свойств мицеллярных растворов гидродинамически-активных МПАВ и лиотропных жидких кристаллов смектического типа. Для снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения жидкостей могут быть использованы вещества, которые в процессе растворения образуют лиотропные жидкие кристаллы смектического типа, с проявлением вязко-упругих свойств и анизотропии динамической вязкости в пристенной области течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повх И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – 2-е изд., доп. – Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1976. – 504 с.
2. Пилипенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // Итоги науки и техн. ВИНИТИ. Механика жидкости и газа. – 1980. – Т. 15 – С. 156-257.
3. Кобец Г. Ф. О физическом обосновании механизма снижения сопротивления полимерными добавками / Г. Ф. Кобец // Влияние полимерных добавок и упругости поверхности на пристенную турбулентность. – Новосибирск, 1987. – С. 24-44.
4. Кобец Г. Ф. Расчёт сопротивления при турбулентном течении слабо концентрированных растворов полимеров / Г. Ф. Кобец. – Новосибирск : ИТ СО АН СССР, 1984. – 35 с.
5. О снижении гидродинамического сопротивления добавками полимеров / П. И. Седов, Н. Г. Васецкая, В. А. Иоселевич, В. Н. Пилипенко // Механика турбулентных потоков : тр. конф. / редкол. : В. В. Струминский (отв. ред.) и др. – Москва : Наука, 1980. – С. 7-28.
6. Повх И. Л. Снижение гидродинамического сопротивления добавками / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // Физическая гидродинамика [сб. ст.]. – Киев : Вища школа ; Донецк, 1977. – С. 7-19.
7. Симоненко А. П. Гидродинамически-активные композиции на основе полимеров и поверхностно-активных веществ для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / А. П. Симоненко. – Донецк, 2013. – 397 с.
8. Чернюк В. В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків рідин гідродинамічноактивними додатками : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.16 / Чернюк Володимир Васильович ; ДУ «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – 310 с.
9. Особенности турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, С. Н. Максютенко и др. // Механика турбулентных потоков : тр. конф. / редкол. : В. В. Струминский (отв. ред.) и др. – Москва : Наука, 1980. – С. 44-69.
10. Сердюк А. И. Мицеллярные переходы в растворах поверхностно-активных веществ / А. И. Сердюк, Р. В. Кучер ; отв. ред. В. А. Волков ; ИГГИ АН УССР, ДонГУ. – Киев : Наук. думка, 1987. – 208 с.
11. Сонин А. С. Лиотропные нематики / А. С. Сонин // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 153, Вып. 2. – С. 273-309.
12. Кирсаков Е. А. Течение дисперсных и жидкокристаллических систем / Е. А. Кирсанов. – Иваново : Иван. гос. ун-т., 2006. – 232 с.
13. Клеман М. Основы физики частично упорядоченных сред. Жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимеры и биологические объекты / М. Клеман, О. Д. Лаврентович ; пер. с англ. Е. Б. Логинова [и др.] под ред. С. А. Пикина и В. Е. Дмитриенко. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 679 с.
14. Гребёнкин М. Ф. Жидкокристаллические материалы / М. Ф. Гребёнкин, А. В. Иващенко. – Москва : Химия, 1989. – 287 с.
15. Волохина А. В. Жидкокристаллические полимеры / А. В. Волохина, Ю. К. Годовский, Г. И. Кудрявцев и др. ; под ред. Н. А. Платэ. – Москва : Химия, 1988. – 415 с.

16. Повх И. Л. О связи снижения турбулентного трения и жидкокристаллического состояния в растворах мицеллообразующих ПАВ / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко // Поверхностно-активные вещества и сырье для их производства : сб. тез. докл. IV Всес. конф. – Волгоград, 1984. – С. 208-209.
17. Повх И. Л. Исследование структуры турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, П. В. Асланов // Пограничные слои в сложных условиях. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. – С. 133-138.
18. Ступин А. Б. Эффект снижения турбулентного трения жидкостей добавками полимеров и поверхностно-активных веществ / А. Б. Ступин // Научная школа Ивана Лукича Повха : к 100-летию со дня рождения / [редкол. : А. Б. Ступин (отв. ред.) и др.]. – Донецк : ДонНУ, 2009. – С. 9-70.

Поступила в редакцию 25.10.2019 г.

ON THE RELATIONSHIP OF THE REDUCTION OF HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF TURBULENT FRICTION WITH THE MANIFESTATION OF LIQUID CRYSTAL PROPERTIES IN MFS SOLUTIONS

A.P. Simonenko, P.V. Aslanov, I.A. Zolotaryova, T.K. Guchmazova

Based on an analysis of the results of experimental studies of the phenomenon of a decrease in the hydrodynamic resistance of turbulent friction (HSTT) and the physicochemical properties of lyotropic liquid crystals of the smectic type, a hypothesis is proposed on the relationship between the decrease in HSTT and the manifestation of liquid-crystalline properties in the near-wall region of the flow of MPAA solutions - anisotropy of dynamic viscosity and viscoelastic properties.

Keywords: hydrodynamic resistance of turbulent friction, micelle-forming surfactants, liquid crystals.

Симоненко Александр Петрович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-Mail: sap2012@rambler.ru

Simonenko Aleksandr Petrovich

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Асланов Петр Васильевич

Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-Mail: aslanov.fnpme@gmail.com

Aslanov Petr Vasilevich

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Золотарёва Ирина Александровна

аспирантка кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: ia_zolotaryova@mail.ru

Zolotaryova Irina Aleksandrovna

Postgraduate student at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Гучмазова Тамара Константиновна

аспирантка кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: guchmazova@bk.ru

Guchmazova Tamara Konstantionovna

Postgraduate student at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

ПОВХ ИВАН ЛУКИЧ – УЧИТЕЛЬ, УЧЕНЫЙ, ЧЕЛОВЕК



Иван Лукич Повх

Если охарактеризовать Ивана Лукича, то эта была живая история нашей страны. История парнишки, начавшую свою трудовую деятельность на конном дворе в Донбассе, в частях особого назначения, получившего высшее образование в Ленинграде (Военно-инженерная школа в 1928–30 гг., курсы подготовки в аспирантуру по математике при Государственном Институте научной педагогики в 1931–33 гг., физико-механический факультет Ленинградского политехнического института в 1934–38 гг.). Ну а затем репрессии. Иван Лукич был сослан в Тобольск. Даже в ссылке он занимался просветительской деятельностью, работал учителем средней школы, доцентом и заведующим кафедрой математики Учительского института в г. Тобольске.

После реабилитации и восстановления в партии Иван

Лукич Повх вернулся в Ленинградский политехнический институт, в котором после окончания аспирантуры плодотворно занимался научной и педагогической деятельностью, где и проявил себя не только способным студентом, но и организатором. Будучи секретарем партийной организации, создал в ЛПИ кафедру Гидроаэродинамики, которую долгие годы возглавлял учитель Ивана Лукича профессор Лойцианский.

Ну, а затем война. Иван Лукич воюет и трудится в Ленинграде. С первых дней блокады он политбоец 11-ой бригады, воевал на Финском, Калининградском участках фронта, на знаменитой Невской Дубровке. В одном из боев Иван Лукич был тяжело ранен. За ратные подвиги в дни блокады Ленинграда награжден орденом Красной Звезды, медалями. Сразу же после госпиталя, продолжал заниматься научной деятельностью. Возглавлял лабораторию по испытанию фильтров-поглотителей отравляющих веществ (хлор, хлорпикрин, фосген, синильная кислота и т. д.) для газозащиты города. Под руководством Ивана Лукича создавались новые способы увеличения высоты подъема аэростатов заграждения от фашистских самолетов. И несмотря на то, что большая часть Украины была еще оккупирована, лаборатория во главе с Иваном Лукичом получила задание приступить к исследованию гидродинамических характеристик турбин Днепровской ГЭС. Затем защита кандидатской, докторской диссертаций и наконец, в 1960 году Иван Лукич возвращается в Донецк, работая заместителем директора Института горного дела АН УССР, зав. отделом ДонНИИ Чермета, а с 1964 года профессор Донецкого педагогического

института. Здесь же и создается кафедра физической гидродинамики, которая имеет уже 50 летнюю историю, которая требует отдельного повествования.

Вот уже почти 23 года, как Ивана Лукича нет с нами. Он бы обрадовался высокой оценке, которую дало университету (у основания которого он стоял) правительство, присвоив ему звание "национальный".

Ну, а что бы его огорчило? Думаю, он очень огорчился, увидев, что в Донецке уже четыре университета. Эти приставки технический, медицинский, и т.д. к университету искажают то понятие, которое дано этому учреждению более 900 лет тому назад и подменяют основные функции – готовить специалистов в области фундаментальных и гуманитарных наук.

Вряд ли он понял многоступенчатую систему подготовки: бакалавр, специалист, магистр. Вряд ли найдется чиновник от образования, который смог бы объяснить необходимость такой градации. Общепринятое объяснение, что это еще один шаг к Европе его не удовлетворил. Ведь на сегодняшний день более тысячи физиков, химиков, математиков, биологов покинули пределы Донецка и работают, в основном, по специальности за рубежом. Значит, система нашего образования была не такой уж плохой, если в университетах Европы и США находится место нашим выпускникам, в ущерб коренному населению.

Насторожило введение прагматизма в образование. История помнит, что Рим поставил Грецию на рельсы прагматизма: уделялось особое внимание архитектуре, кораблестроительству, значительно меньше интересуясь фундаментальным наукам. Это привело к тому, что кроме «римского права» и десятка философов Рим ничего миру не дал. Даже боевой строй, позаимствовав у греков, римляне не меняли почти тысячу лет.

Сокращения интереса к фундаментальным, точным наукам, вряд - ли будет способствовать усилению нашей державы. Зная это, кафедра прикладывает максимум усилий, для того чтобы интерес к этим наукам у молодежи не пропал и наличие трудов этого номера лучшее подтверждение. Научные труды этого номера - своеобразный отчет нашему Учителю.

Зав. кафедрой Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха, д-р техн. наук, профессор



В.В. Белоусов

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Для публикации в журнале «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимаются ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные работы, содержащие новые результаты теоретических и экспериментальных исследований в области технических наук. Авторы научных статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за сам факт их публикации. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала после рецензирования, учитывая научную значимость и актуальность представленных материалов. Если рецензия положительна, но содержит замечания и пожелания, редакция направляет статьи авторам на доработку вместе с замечаниями рецензента. Автор должен ответить рецензенту по всем пунктам рецензии. После такой доработки редколлегия принимает решение о публикации статьи. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензии или выдержки из них, либо аргументированное письмо редактора. Редколлегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения. В случае отказа в публикации статей редколлегия не возвращает автору рукопись статьи. Статья, задержанная на срок более трех месяцев или требующая повторной переработки, рассматривается как вновь поступившая. Гонорар авторам не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.

2. Рукопись предоставляется в одном экземпляре (на русском или английском языках), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список литературы, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.donnu.g@donnu.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Рукописи, не соответствующие редакционным требованиям, и статьи, не соответствующие тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную правку рукописей. Корректур статей авторам не высылаются.

3. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
- **Междустрочный интервал:** одинарный.
- **Абзацный отступ:** 1 см.
- **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Аннотация, таблицы, подрисуночные подписи, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.

4. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *инициалы и фамилия(и) автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Аннотацию и ключевые слова рекомендуется отделять с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание, например, постановка задачи, методы ее решения, анализ полученных результатов. В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее со следующей строки приводится нумерованный перечень используемых литературных источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание» и ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо включение в список литературы источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *инициалы и фамилия(и) автора(ов)*, аннотация, *ключевые слова* на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языке):
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень и звание, должность, с указанием организации (полное название, в именительном падеже), которую представляет автор;
 - страна, город;
 - адрес электронной почты.

5. Образец оформления статьи:

УДК 004.62

МЕТОДЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2019 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

В настоящей работе произведен сравнительный анализ методов параллельной сегментации экспериментальных кривых, выявлены соответствующие недостатки, предложены решения и рекомендации для их устранения.

Ключевые слова: экспериментальные кривые; сегментация; квадратичная невязка; разладка; минимизация.

Введение. При решении задачи сегментации экспериментальных кривых выделяют...

Постановка задачи. Методы сегментации экспериментальных кривых имеют...

Сегментация параллельными методами. В методах параллельной...

Выводы. Рассмотренные в данной работе методы имеют как преимущества, так...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И. В. Никифоров. – Москва : Наука, 1983. – 199 с.
2. Медведева Е. В. Метод сегментации изображений в прикладных телевизионных системах / Е. В. Медведева, Е. Е. Курбатова // Т-Comm. – 2010. – № 2. – С. 46-49.

Поступила в редакцию xx.xx.2019 г.

METHODS OF PARALLEL SEGMENTATION EXPERIMENTAL CURVES

I.A. Tretiakov, V.V. Danilov

In this paper, comparative analysis of methods of parallel segmentation experimental curves revealed deficiencies and proposed solutions and recommendations for their elimination.

Keywords: experimental curves; segmentation; quadratic discrepancy; frustration; minimization.

Третьяков Игорь Александрович

заведующий учебной лабораторией кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: es75i@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Head of laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиопизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

6. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Необходимо следить за тем, чтобы после возможного уменьшения до размера 80 мм высота букв и цифр на рисунке оставалась не менее 2 мм. Каждый рисунок должен иметь подрисуючную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: Рис. №. Название. Каждая таблица должна иметь заглавие (выравнивание – по центру) в формате: Таблица №. Название. Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуючная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами. Сканированные рисунки не принимаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

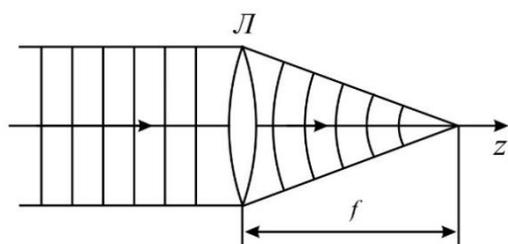


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	39	кОм

7. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Все числовые значения физических величин выражаются в системе СИ. В десятичных дробях целая часть должна отделяться от дробной запятой, а не точкой. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редактора формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0–6.0 с параметрами:

- **текст и переменная:** курсив;
- **матрица и вектор:** полужирный курсив;
- **размер:** обычный 12 пт., крупный индекс 9 пт., мелкий индекс 7 пт., крупный символ 18 пт., мелкий символ 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b\xi_t \quad (1)$$

8. Материалы предоставляются по адресу:

Донецкая Народная Республика 83001, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Белоусов Вячеслав Владимирович, каб. 252.

Зам. главного редактора: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Ответственный секретарь: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Контактные тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: yestnik.donnu.g@donnu.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

2019. – № 4

Технический редактор: И.А. Третьяков

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,

ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано в печать 27.12.2019 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 9,99

Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.

Тел.: +38 (062) 302 92 27.

Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности

в Государственный реестр

серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.