ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ **академии наук высшей школы** Российской ФЕДЕРАЦИИ

№ 3 (56) июль–сентябрь 2022

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 № 90-р):

Физико-математические науки

- 1.3.8-Физика конденсированного состояния
- 1.3.14-Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14-Антенны, СВЧ устройства и их технологии
- 2.2.15-Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16-Радиолокация и радионавигация

<u>Технические науки</u>

- 1.3.8 Физика конденсированного состояния
- 1.3.11-Физика полупроводников
- 1.3.14-Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.09.01-Электромеханика и электрические аппараты

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

- 2.2.14-Антенны, СВЧ устройства и их технологии
- 2.2.15-Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16-Радиолокация и радионавигация

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу http://journals.nstu.ru/doklady/rules. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2022

июль-сентябрь

№ 3 (56)

Выходит четыре раза в год ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия) Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония) А. Загоскин, PhD (Великобритания) Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия) М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина) К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф. И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф. А.О. Давидов, д-р техн. наук Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф. В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц. С.Л. Елистратов, д-р техн. наук А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф. И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф. В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф. М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф. О.В. Нос, д-р техн. наук, проф. В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф. В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф. А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф. А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф. С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф. С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф. В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г. (свидетельство ПИ № ФС 77–81374 от 30.06.2021 г.)

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346, телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2022 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2022

July-September

№ 3 (56)

Journal is published quarterly ISSN 1727-2769

Journal was established by Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia) D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia) A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom) E.V. Ilvichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany) M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine) K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof. A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.) G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof. S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.) A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof. I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof. V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof. M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof. O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof. V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof. A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof. S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof. S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof. V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2022

июль – сентябрь № 3 (56)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Дееб Р.	
Влияние относительного продольного и поперечного шага	
на характеристики потока шахматного пучка каплевидных	
труб	5

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Житник С.В., Степанов М.А.	
Двухточечная модель вращающихся л	ипастей31

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

 2022
 July– September
 № 3 (56)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Deeb R.

Yatsenko A.S.

Superheavy elements2	25
----------------------	----

TECHNICAL SCIENCES

 ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2022

июль-сентябрь

№ 3 (56)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ =

УДК 532.5.004.414.23

ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ШАГА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ШАХМАТНОГО ПУЧКА КАПЛЕВИДНЫХ ТРУБ

Р. Дееб^{1,2}

¹Университет Дамаска ²ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Настоящая работа была проведена с целью исследования гидродинамических характеристик пучка труб каплевидной формы с помощью программного пакета ANSYS Fluent при различных относительных продольных и поперечных шагах (18 случаев). Исследование охватывает влияние основных проектных параметров чисел Рейнольдса Re =1,78 × $\times 10^3 \sim 18,72 \cdot 10^3$, относительного продольного шага $S_{\rm npo}/D_{\rm 3\kappa}$ =1,44 ~ 2,04 и относительного поперечного шага $S_{\rm non}/D_{\rm 3\kappa}$ = 1,24 ~ 1,82 ($S_{\rm non}, S_{\rm npo}$ и $D_{\rm 3\kappa}$ – поперечный, продольний шаг и эквивалентный диаметр каплевидной трубы соответственно). Результаты настоящего исследования показывают, что коэффициент аэродинамического сопротивления уменьшается с увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления *f* варьируется в зависимости от числа Рейнольдса и относительного поперечного шага. Среди исследованных случаев было найдено, что минимальные значения *f* были достигнуты для случая А ($S_{\rm npo}/D_{\rm 3\kappa}$ = 1,24 и $S_{\rm non}/D_{\rm 3\kappa}$ = 1,44) при Re = 1,78 · 10³ и для случая Л ($S_{\rm npo}/D_{\rm 3\kappa}$ = 5,007,03, = 1,64) при Re > 1,78 · 10³. Предложена зависимость, позволяющая определять коэффициент аэродинамического сопротивления умерициент аэродинамического сопротивления умерициента А ($S_{\rm npo}/D_{\rm 3\kappa}$ = 1,24 и $S_{\rm non}/D_{\rm 3\kappa}$ = 1,24 и

Ключевые слова: каплевидная труба, относительный поперечный шаг, относительный продольный шаг, профиль скорости, коэффициент сопротивления давления, коэффициент аэродинамического сопротивления, численное исследование, CFD.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-5-24

Введение

Важной экономической задачей в настоящее время является рациональное использование энергетических ресурсов во всех сферах деятельности человека. Основным шагом для достижения этой задачи является использование теплообменников, обладающих высокой эффективностью и низкими массогабаритными характеристиками. Одним из основных, технически и экономически целесообразных путей снижения массы и повышения эффективности энергоустановок является применение теплообменников, характеризующихся высокой теплоаэродинамической эффективностью, дешевизной и простотой изготовления.

Выбор эффективного теплообменника должен основываться на совместном решении вопроса аэродинамического сопротивления и теплообмена. Многие исследователи работали над этим вопросом в течение нескольких предыдущих десятилетий. Было найдено, что в отличие от круглых труб некруглые трубы имеют низкое гидравлическое сопротивление и высокую теплоотдачу [1–6]. В работах [7–10] приведены результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления пучков труб некруглого сечения в диапазоне изменения чисел Рейнольдса Re = $(3\sim30) \cdot 10^3$ и с различными продольными и поперечными шагами. Было показано, что числа Эйлера для пучков плоскоовальных и каплевидных труб в 6–10 и 7–13 раз соответственно больше,

© 2022 Дееб Р.

чем у пучка круглых труб. Авторы показали, что шаговые характеристики пучка влияют на аэродинамическое сопротивление, причем величина поперечного шага труб оказывает более значительное влияние на общее сопротивление пучков. Статья [11] посвящена проблеме гидродинамики шахматного пучка кулачковых труб. Было найдено, что коэффициенты сопротивления кулачковой трубы примерно на 64 % ниже, чем круглой. Авторы научной работы [12] провели численное и экспериментальное исследование конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматного пучка труб каплевидной формы в диапазоне чисел Рейнольдса от 1850 до 9700. Результаты их исследования показали, что теплогидродинамическая эффективность пучка каплевидных труб с нулевым углом атаки примерно в 2,3~1,9 и 1,4~1,7 раза больше, чем пучка труб круглого и эллиптического сечения соответственно. В [13] экспериментально и численно исследованы теплообмен и гидродинамика двух расположенных бок о бок каплевидных труб для чисел Рейнольдса от 8000 до 40 000 в сравнении с круглыми трубами. Показано, что теплогидродинамическая эффективность «Webb» каплевидных труб в 1,2-2 раза выше, чем у труб круглого сечения, главным образом из-за низкого аэродинамического сопротивления каплевидных труб.

В статье [14] экспериментально и численно исследовано аэродинамическое сопротивление одиночных труб круглой и каплевидной формы в диапазоне чисел Рейнольдса Re = $(13, 2 \sim 30, 4) \cdot 10^3$ и для двенадцати углов атаки каплевидной трубы ($\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что аэродинамическое сопротивление каплевидной трубы значительно ниже, чем у круглой. Показано, что не существует оптимального угла атаки, обеспечивающего наименьшее аэродинамическое сопротивление для всего исследуемого диапазона чисел Рейнольдса. Авторы работ [15–21] численно исследовали тепловые и гидродинамические характеристики при поперечном обтекании пучков каплевидных труб различной конфигурации. Их результаты показали, что аэродинамическое сопротивление трения пучков каплевидных труб меньше, чем круглых, при углах атаки $\theta = 0^\circ$ и 180°. Также авторы пришли к выводу, что существует значительное снижение коэффициента аэродинамического сопротивления трения до 90 % для каплевидных труб по сравнению с круглыми трубами.

Из обзора литературы следует, что влияние относительного продольного и поперечного шага на характеристики потока, омывающего пучок каплевидных труб, не изучено. Предметом исследования настоящей работы является численный анализ влияния относительного продольного и поперечного шага на характеристики потока пучка каплевидных труб в шахматной компоновке при поперечном обтекании воздухом с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Работа выполнена для диапазона чисел Рейнольдса $(1,78-18,72) \cdot 10^3$, шести относительных продольных $S_{npo}/D_{3\kappa} = (1,44 - 2,04)$ и четырех относительных поперечных шагов $S_{non}/D_{3\kappa} = (1,24 - 1,82)$.

1. Описание объекта исследования

С помощью ANSYS Fluent [22] проведено численное исследование теплообмена и гидродинамики пучка из 45 каплевидных труб, расположенных в канале квадратного сечения со стороной 305 мм и длиной 780 мм (рис. 1). Каплевидные трубы имеют следующие размеры и параметры относительного расположения: радиус широкой части 5,8 мм, радиус малой части 2,9 мм, эквивалентный диаметр $D_{3\kappa} = 22,5$ мм, характерная длина каплевидной трубки l = 70, 59 мм, поперечные шаги $S_{non} = 28; 32,5; 37; 41$ мм и продольные шаги $S_{npo} = 32,5; 34,75; 37; 39,25;$ 41,5; 46 мм, расстояние между трубами ряда у стенки канала и стенкой канала варьировалось от 29,48 до 68,4 мм. Было рассмотрено девятнадцать моделей, описанных в табл. 1. Геометрические характеристики поперечного сечения каплевидной трубы представлены на рис. 2.



Рис. 1 – Расчетная область с граничными условиями

Fig. 1 - Computational domain with boundary conditions



Рис. 2 – Поперечное сечение каплевидной трубы

Fig. 2 – Drop-shaped tube cross-section dimensions

2. Численный метод

2.1. Постановка задачи и граничные условия

Задача вынужденной конвекции решалась в ANSYS Fluent с использованием приближения вязкой несжимаемой жидкости с учетом возможной турбулизации потока и без учета теплообмена излучением. Для системы уравнения неразрывности, уравнений движения и уравнения энергии применялся решатель Pressure – Velocity Coupling и модель турбулентности RNG k- ε с использованием пристеночной функции «Enhanced Wall Treatment» (для замыкания данной системы уравнений) [12, 19]. Был выбран решатель двойной точности, метод

решения – *SIMPLIC*, использовались численные схемы второго порядка точности «*Second Order Upwind*». Окончание расчета происходило при достижении погрешностей 10⁻⁸.

В качестве внешнего теплоносителя, обтекающего пучок труб, рассматривался поток воздуха со скоростью на входе в канал $u_{\rm BX}$ =1,33 ~ 14 м/с, что соответствует числам Рейнольдса Re = (1,78–18,72) · 10³, при температуре $T_{\rm BX}$ = 56,5° и атмосферном давлении. Средняя температура стенки $T_{\rm труб}$ = 20,8°. Теплофизические свойства рассчитываются по средней температуре набегающего потока. Граничные условия, заданные в ANSYS Fluent, показаны на рис. 1.

Таблица 1 / Table 1

Модель	$S_{ m non}/D_{ m 9\kappa}$ (P_T)	$G/D_{ m _{3K}}$ (P_L)	$S_{\text{про}}/D_{ ext{sk}}$ (P_G)
A/A			1,44
Б/В	1.24	2.04	1,64
B/C] 1,24	3,04	1,84
Γ/D			2,04
Д/Е			1,44
E/F	1 4 4	2.44	1,64
Ж/G	1,44	2,44	1,84
3/H			2,04
И/І		1,84	1,44
K/J			1,54
Л/К	1.64		1,64
M/L	1,04		1,74
H/M			1,84
O/N			2,04
П/О			1,44
P/P	1.92	1 2 1	1,64
C/Q	1,02	1,51	1,84
T/R			2,04

Вариации геометрии пучков труб Geometry variations of tube bundles

Здесь $S_{\text{поп}}/D_{3\kappa}$ – относительный поперечный шаг; $S_{\text{про}}/D_{3\kappa}$ – относительный продольный шаг; $G/D_{3\kappa}$ – отношение расстояния между трубами крайнего ряда и стенкой канала к эквивалентному диаметру.

2.2. Расчетная сетка и валидация численной модели

Расчетная сетка генерируется с использованием ICEM CFD. Для наиболее точной симуляции сетка (Quad и Tri элементы) строилась со сгущением вблизи стенки труб (рис. 3) и с соблюдением необходимого требования к выбранной модели турбулентности по значению $1 < y^+ < 5$. Качество сетки 0,96 сохраняется на протяжении всего моделирования.

В данной работе с целью получения оптимального решения поставленной задачи количество узлов варьировалось от 6754 до 229 442 (рис. 4). Сетка из 187 584 узлов обеспечивает сеточно-независимое решение. Следовательно, в этой работе рассматривается сетка с данными параметрами.

Модель турбулентности RNG *k*-*є* подходит для сложных течений, включающих вихри, отрыв потока и вторичное течение [22]. В работе [12] проведены экспериментальные и численные исследования аэродинамики и теплообмена пучка каплевидных труб, полностью аналогичного модели Л (тот же канал, продольный и поперечный шаг и размеры труб, используемые в настоящей работе), но только с тремя рядами труб. Результаты показали отличное совпадение экспериментальных и численных данных при использовании модели турбулентности RNG k-е с функцией «Enhanced Wall Treatment». В [4] было показано, что валидация численной модели некруглых труб может быть проведена заменой этих труб круглыми трубами с таким же эквивалентным периметром. Следовательно, для валидации используемой численной модели решение сравнивалось с экспериментальными результатами, полученными Жукаускасом [22] для круглых труб эквивалентного периметра ($S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} = S_{\text{про}}/D_{\text{эк}} = 1,64$) при тех же условиях эксплуатации (рис. 5). Максимальная погрешность между экспериментальными результатами и результатами моделирования составляет ~6,85 %, что свидетельствует об адекватности модели и метода моделирования, представленных в данном исследовании.



Рис. 3 – Расчетная сетка, модель К

Fig. 3 – Mesh details of the numerical model, model K



Fig. 4 - Mesh-sensitivity analysis, model K



Рис. 5 – Валидация численной модели

Fig. 5 – Numerical results validation

3. Результаты исследований и их обсуждение

3.1. Контуры скорости и статического давления

Рис. 6 иллюстрирует контуры скорости для моделей А, Г, И и П для низкого и высокого значения Re. Для всех моделей при Re = $1,78 \cdot 10^3$ есть три отрывные зоны: две на боковых поверхностях и одна в кормовой части труб. Отрыв пограничного слоя от поверхности обусловлен силами трения, изменением давления и скорости. Также отрыв потока может происходить в результате увеличения сопротивления давления, вызванного перепадом давления протекающего воздуха между передней и задней поверхностями трубы. С увеличением числа Re до $18,7 \cdot 10^3$ вихревые зоны на боковых поверхностях трубы исчезают и существуют только на ее задней поверхности. Это связано с тем, что при высоких значениях Re кинетическая энергия потока внутри пограничного слоя возрастает, что позволяет сместиться точке отрыва дальше вниз по потоку.

По мере увеличения относительного продольного шага площадь вихрей, образующихся за каждой трубой в каждом ряду, увеличивается, так как влияние верхней и нижней труб на вихрь, образовавшийся за ближайшей к ним трубой в предыдущем ряду, уменьшается. Было отмечено также, что максимальная скорость при малых относительных поперечных шагах больше, чем при больших относительных поперечных шагах, поскольку воздушный поток ускоряется в узком проходе, образованном между двумя соседними трубами в одном ряду.

Рис. 7 и 8 показывают профили средней скорости в середине зазора между рядами труб для моделей А, Г, И, П в области y > 0, поскольку данные по обе стороны от оси x симметричны. При изменении относительного продольного шага и постоянном относительном поперечном шаге (рис. 7) во всех случаях заметно, что профиль скорости имеет форму «М-М-М- ∞ ». Форма « ∞ » обусловлена большим расстоянием между трубой, которая находится вблизи стенки канала, и стенкой канала. Профили скорости «Р 1-2» аналогичны профилям скорости «Р 3-4» и «Р 5-6». Сдвиговый слой, отделенный от труб первого, третьего и пятого ряда, обладает большим градиентом скорости для «Р 1-2», «Р 3-4» и «Р 5-6» соответственно. Уменьшение скорости в окрестности y/l = 0,2; 0,59; 1 и 1,4 обусловлено наличием труб второго, четвертого и шестого ряда для «Р 1-2», «Р 3-4» и «Р 5-6»



Модель A/ Model A



Модель Г/ Model D



Модель И/ Model I



Модель П/ Model O

Рис. 6 – Контуры скорости *U*, м/с

Fig. 6 -Velocity contours U, m/s

Профили скорости «Р 2-3» и «Р 4-5» также аналогичны. Градиент скорости сдвигового слоя от труб второго и четвертого ряда выше, чем от труб первого, третьего и пятого ряда для «Р 1-2» и «Р 5-6» соответственно. В табл. 2 указаны максимальные значения скорости *U*/*U*_{вх} в середине зазора между рядами труб.

Исходя из контурной скорости на рис. 6 и данных в табл. 2, модель А достигает более высокой скорости, чем другие модели. Это связано с тем, что зазор, образованный между рядами в модели А, меньше, чем в других моделях Б, В, Г, и, таким образом, как упоминалось ранее, площадь вихрей за каждым рядом меньше.



Puc. 7 – Профили средней скорости в середине зазора между рядами труб ($S_{\text{поп}}/D_{3\kappa}$ = const) *Fig.* 7 – Mean velocity profiles U/U_{∞} at mid gap between the tube's columns (P_T = const)



 $(\hat{S}_{\pi po}/D_{3\kappa} = \text{const})$

Fig. 8 – Mean velocity profiles U/U_{∞} in the mid gap between the tube's columns ($P_L = \text{const}$)

Таблица 2 / Table 2

$S_{\text{npo}}/D_{3\kappa}(P_L)\uparrow - S_{\text{non}}/D_{3\kappa}(P_T) = \text{const}$										
	Р	1-2	P 2	2-3	P 3-	P 3-4		P 4-5		5-6
Re, $\times 10^3$	1,78	18,72	1,78	18,72	1,78	18,72	1,78	18,72	1,78	18,72
A/A	1,707	1,564	1,745	1,557	1,814	1,601	1,874	1,632	1,907	1,632
Б/В	1,571	1,42	1,656	1,464	1,731	1,505	1,801	1,544	1,848	1,563
B/C	1,525	1,370	1,610	1,419	1,697	1,466	1,769	1,507	1,828	1,538
Γ/D	1,484	1,335	1,575	1,388	1,669	1,441	1,744	1,485	1,808	1,522
			S_{nor}	$D_{3\kappa}(P_T)$	$\uparrow - S_{\rm npo}/D_{ m ok}$	$(P_L) = co$	onst			
	Р	1-2	P 2	2-3	P 3-	4	P	4-5	Р	5-6
Re, $\times 10^3$	1,78	18,72	1,78	18,72	1,78	18,72	1,78	18,72	1,78	18,72
A/A	1,707	1,564	1,745	1,557	1,814	1,601	1,874	1,632	1,907	1,632
Д/Е	1,663	1,533	1,744	1,569	1,823	1,617	1,887	1,659	1,915	1,669
И/І	1,550	1,45	1,647	1,51	1,680	1,57	1,713	1,61	1,699	1,64
П/О	1,496	1,433	1,546	1,504	1,530	1,576	1,525	1,625	1,529	1,651

$(U/U_{\rm BX})_{\rm макc}$ в середине зазора между рядами труб $(U/U_{\infty})_{\rm max}$ values in the mid gap between every two adjacent columns of tubes

При изменении относительного поперечного шага и постоянном относительном продольным шаге существует отличие скоростного профиля моделей Д, И и П от модели А. Наименьшие значения $U/U_{\rm BX}$ смещаются вправо по мере увеличения $S_{\rm non}/D_{\rm 3K}$ (рис. 8). Также можно отметить, что форма «З» изменяется в зависимости от расположения трубы возле стенки канала. Выявлено, что более низкие значения ($U/U_{\rm BX}$)_{мин} для модели И больше по сравнению с остальными моделями.

Табл. 2 показывает, что значения $(U/U_{\rm BX})_{\rm макс}$, после «Р 1-2», увеличиваются при увеличении относительного поперечного шага от 1,24 (модель А) до 1,44 (модель Д). Продолжение увеличения $S_{\rm поп}/D_{\rm эк}$ приводит к уменьшению значений $U/U_{\rm BX}$ (максимальные значения $U/U_{\rm BX}$ для моделей И и П очень близки, но меньше, чем у модели Д. Было обнаружено, что влияние относительного продольного шага на значения $(U/U_{\rm BX})_{\rm макс}$ больше, чем относительного поперечного шага.

Увеличение числа Рейнольдса, связанное с увеличением скорости воздуха на входе в канал $U_{\rm BX}$, приводит к увеличению максимального значения средней скорости U. Это связано с увеличением интенсивности турбулизации воздуха, проходящего между рядами труб. Было показано, что $(U/U_{\rm BX})_{\rm Makc}$ увеличивается в направлении вниз по потоку. Это может соответствовать увеличению ширины потока между рядами труб за счет турбулентной диффузии.

На рис. 9 представлены контуры статического давления в пучке для моделей A, Γ , Π , Π при Re = 1,78·10³ и Re = 18,72·10³. Для всех случаев видно, что давление имеет самые высокие значения в лобовой части труб в точке застоя, это связано с тем, что в этой точке скорость потока стремится к нулю (см. рис. 6). Давление уменьшается по мере того, как воздух проходит мимо рядов труб.

3.2. Контуры коэффициента сопротивления давления и аэродинамического сопротивления

Распределения локального коэффициента сопротивления давления C_p по половине периметра труб в каждом ряду (трубы 1, 2, 3, 4, 5, 6 на рис. 1) при Re = 18,7·10³ показаны на рис. 10. Для всех исследованных моделей в точке застоя в лобовой части труб C_p имеет максимальное значение. По мере прохождения

воздуха по поверхности труб C_p уменьшается до минимального значения на боковой поверхности, а затем увеличивается до точки отрыва в кормовой части труб. Наблюдается, что максимальное отрицательное статическое давление также постепенно уменьшается от первого до шестого ряда. Модель И имеет самые низкие отрицательные значения C_p по сравнению с моделями А, Б, В, Г, Д, П (рис. 10). Таким образом, модель И допускает небольшой неблагоприятный градиент давления, который, в свою очередь, снижает C_p .



Модель П/ Model O

Рис. 9 – Контуры статического давления Р, Па

Fig. 9 - Static pressure contours, Pa



Рис. 10 – Изменение локального коэффициента сопротивления давления по периметру труб

Fig. 10 - Pressure coefficient distribution along the tube's perimeter

Исследования аэродинамического сопротивления проведены в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от $1,78 \cdot 10^3$ до $18,72 \cdot 10^3$. Коэффициент аэродинамического сопротивления определяется как [17]

Ĵ

$$f = \frac{\Delta P}{1/2\rho U_{\rm cp}^2 N_L},\tag{1}$$

где N_L – число поперечных рядов; ΔP – перепад давления воздушного потока (из результатов расчета в ANSYS Fluent); $U_{\rm cp}$ – средняя скорость потока в узком сечении канала.

Рис. 11 демонстрирует зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса для моделей А, Б, В, Г, Д, И, П. Видно, что f уменьшается с увеличением числа Re. Это можно объяснить тем, что коэффициент полного сопротивления является суммой коэффициентов сопротивления давления и сопротивления трения. Изменение значения коэффициента сопротивления трению является более существенным, чем изменение значения коэффициента сопротивления давлению при более низких числах Re, что приводит к более высокому падению давления, в то время как противоположное происходит при более высоких числах Re. В случае высоких Re влияние вязких сил уменьшается, а влияние инерционных сил увеличивается. При высоких числах Re отрывная точка сдвигается вниз по потоку, и, следовательно, сопротивление давления уменьшается. Рис. 11 показывает, что при $\text{Re} \ge 6,68 \cdot 10^3$ и $S_{\text{про}}/D_{\text{эк}} = \text{const коэф-}$ аэродинамического сопротивления модели И примерно фициент на (8,19-37,45) %, (9,51-38,23) %, (9,9-28,6) % меньше, чем у моделей А, Д, П соответственно. Также было найдено, что при $\text{Re} \ge 6,68 \cdot 10^3$ и $S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} = \text{const}$ f модели В примерно на (1,77-6,81) %, (2,47-7,81) %, (0,78-1,58) % меньше, чем у моделей А, Б, Г, соответственно.



На рис. 12 и 13 показано влияние изменения относительного поперечного и продольного шага соответственно на коэффициент аэродинамического сопротивления при различных Re. Для всех исследованных относительных продольных шагов при Re $\geq 6,68 \cdot 10^3$ и для $S_{\rm npo}/D_{\rm sk} > 1,64$ при Re = $1,78 \cdot 10^3$ было обнаружено, что кривые коэффициента аэродинамического сопротивления имеют схожую форму (аналогичную форме ложки), где значение *f* увеличивается с увеличением относительного поперечного шага, потом уменьшается до минимального значения, а затем снова увеличивается (рис. 12). При Re = $1,78 \cdot 10^3$, когда $S_{\rm npo}/D_{\rm sk} \leq 1,64$, кривые коэффициента аэродинамического сопротивления постоянно увеличиваются. Здесь можно выделить три случая, в которых значения коэффициента аэродинамического сопротивленых посто-

- Re = $1,78 \cdot 10^3$ и $S_{\text{про}}/D_{\text{эк}} > 1,64 \rightarrow f_{\text{мин}}$ где $S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} = 1,64$;
- Re = $1,78 \cdot 10^3$ и $S_{\text{про}}/D_{\text{эк}} \le 1,64 \rightarrow f_{\text{мин}}$, где $S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} = 1,24$;
- Re > 1,78 · 10³ для всех $S_{\text{про}}/D_{\text{эк}} \rightarrow f_{\text{мин}}$, где $S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} = 1,64$.



Puc. 12 - 3ависимость $f = f(S_{\text{поп}}/D_{3\kappa})$

Fig. 12 - Friction factor versus transverse pitch ratio





Fig. 13 - Friction factor versus longitudinal pitch ratio

Рис. 14 иллюстрирует значение коэффициента аэродинамического сопротивления для всех исследованных моделей как для низкого, так и для высокого значения Re. При малых числах Re $(1,78 \cdot 10^3)$ модель A имеет наименьшее значение f, а при высоких числах Re $(18,72 \cdot 10^3)$ модель Л имеет лучшие гидродинамические характеристики по сравнению с остальными моделями.



Puc. 14 – Сравнение f для всех исследованных моделей



Для расчета аэродинамического сопротивления пучков труб каплевидной формы при 1,44 $\leq S_{npo}/D_{3\kappa} \leq 2,04, 1,24 \leq S_{non}/D_{3\kappa} \leq 1,82$ и 1,31 $\leq G/D_{3\kappa} \leq 3,04$ в диапазоне чисел Рейнольдса от 1,78 \cdot 10³ до 18,72 \cdot 10³ предлагается использовать следующую зависимость:

$$f = a \operatorname{Re}_{D,\max}^{-b} \left(\frac{S_{\Pi O \Pi}}{D_{\mathfrak{I} \mathsf{K}}} \right)^{c} \left(\frac{S_{\Pi \mathsf{PO}}}{D_{\mathfrak{I} \mathsf{K}}} \right)^{d} \left(\frac{G}{D_{\mathfrak{I} \mathsf{K}}} \right)^{e},$$
(2)

где $\operatorname{Re}_{D,\max} = \rho U_{cp} D_{3\kappa} / \mu$ – числа Рейнольдса, рассчитанные по средней скорости потока в узком сечении для пучков труб каплевидной формы (μ – коэффициент динамической вязкости); $S_{\text{поп}}/D_{3\kappa}$ – относительный поперечный шаг; $S_{\text{про}}/D_{3\kappa}$ – относительный продольный шаг; $G/D_{3\kappa}$ – отношение расстояния между трубами крайнего ряда и стенкой канала к эквивалентному диаметру.

Коэффициенты *a, b, c, d* представлены в табл. 3. Максимальное отклонение между корреляцией (2) и результатами моделирования составляет приблизительно ±8,42 %. Приведенное выше уравнение хорошо согласуется с результатами моделирования (рис. 15).

Таблица 3 / Table 3

	Constants for	the propose		(-)	
	а	b	С	d	е
$1,24 \le S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} \le 1,44$	0,01375	-0,17661	2,78498	-0,04107	1,88144
1,44 $S_{\text{поп}}/D_{\text{эк}} < 1,64$	0,01698	-0,25899	3,59002	-0,12097	2,19775
$1.64 \le S_{rrow}/D_{2r} \le 1.82$	0,02232	-0,31534	5,42758	-0,33455	1,27994

Коэффициенты уравнения (2) Constants for the proposed correlation (2)

• Re= $1,78 \times 10^3$, ANSYS • Re= $6,68 \times 10^3$, ANSYS • Re= $13,37 \times 10^3$, ANSYS • Re= $18,72 \times 10^3$, ANSYS • Re= $1,78 \times 10^3$, yp.(2) • Re= $6,68 \times 10^3$, yp.(2) • Re= $13,37 \times 10^3$, yp.(2) • Re= $18,72 \times 10^3$, yp.(2)



Рис. 15 – Сравнение коэффициента аэродинамического сопротивления, полученного с помощью моделирования, с уравнением (2)

Fig. 15 – Comparison of the f obtained by Eq. (2) with simulation results

Заключение

Приведены результаты численного исследования аэродинамики при поперечном обтекании шахматных пучков труб каплевидной формы. Исследование выполнено для диапазона чисел Рейнольдса $(1,78 \sim 18,72)10^3$, относительных продольных шагов $(S_{npo}/D_{3\kappa}: 1,44; 1,54; 1,64; 1,74; 1,84; 2,04)$ и относительных поперечных шагов $(S_{non}/D_{3\kappa}: 1,24; 1,44; 1,64; 1,82)$. Полученные контуры скорости и давления использовались для исследования влияния различных параметров на гидродинамические характеристики. По результатам настоящей работы можно сделать следующие выводы.

1. Влияние относительного продольного шага на значения максимальной скорости в зазоре между рядами труб $(U/U_{\rm BX})_{\rm Makc}$ более существенно, чем влияние относительного поперечного шага.

2. Коэффициент аэродинамического сопротивления *f* пучков каплевидных труб уменьшается с увеличением Re.

3. Не существует определенного относительного шага, обеспечивающего наименьшие значения коэффициента аэродинамического сопротивления. Минимальные значения f были достигнуты для случая А ($S_{npo}/D_{3\kappa} = 1,24$ и $S_{non}/D_{3\kappa} = 1,44$) при Re = $1,78 \cdot 10^3$ и для случая Л ($S_{npo}/D_{3\kappa} = S_{non}/D_{3\kappa} = 1,64$) при Re > $1,78 \cdot 10^3$.

4. Предложена зависимость, позволяющая определить коэффициент аэродинамического сопротивления для рассматриваемых пучков каплевидных труб.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований теплообмена и аэродинамических характеристик пучков труб каплевидной формы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Дееб Р. Обобщение и анализ результатов последних исследований в области улучшения характеристик теплообмена и гидродинамики при поперечном обтекании гладких труб // Тепловые процессы в технике. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 50–69.
- Wang J., Zheng H., Tian Z. Numerical simulation with a TVD–FVM method for circular cylinder wake control by a fairing // Journal of Fluids and Structures. – 2015. – Vol. 57. – P. 15–31. – DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.05.008.
- Horvat A., Leskovar M., Mavko B. Comparison of heat transfer conditions in tube bundle cross-flow for different tube shapes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 49, iss. 5–6. – P. 1027–1038. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.030.
- Rajiva L.M., Abhilas S., Mihir K.D. Thermal performance of mixed tube bundle composed of circular and elliptical tubes // Thermal Science and Engineering Progress. – 2018. – Vol. 5. – P. 492–505. – DOI: 10.1016/j.tsep.2018.02.009.
- Deeb R. Experimental and numerical investigation of the effect of angle of attack on air flow characteristics around drop-shaped tube // Physics of Fluids. – 2021. – Vol. 33. – P. 065110. – DOI: 10.1063/5.0053040.
- Deeb R. The effect of angle of attack on heat transfer characteristics of drop-shaped tube // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 183, pt. B. – P. 122115. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122115.
- 7. Антуфьев В.М., Белецкий Г.С. Теплоотдача и аэродинамические сопротивления трубчатых поверхностей в поперечном потоке. М.; Л.: Машгиз, 1948. 120 с.
- Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 184 с.
- 9. **Кэйс В.М., Лондон А.Л.** Компактные теплообменники. М.: Госэнергоиздат, 1962. 160 с.
- Brauer H. Investigation of cross flow heat exchangers with different tube shapes // Vereinigung der Grosskesselbesitzer. Mitteilungen. – 1961. – Vol. 22, N 73. – P. 261–276. – In German.
- Lavasani A.M., Bayat H. Experimental study of convective heat transfer from in-line cam shaped tube bank in crossflow // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 65. – P. 85– 93. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.078.
- Parametric study of air cooling process via water cooled bundle of wing-shaped tubes / S. Sayed, O. Mesalhy, T. Khass, A. Hassan // Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology. – 2012. – Vol. 15, N 3. – DOI: 10.21608/EIJEST.2012.96756.
- Жукова Ю.В., Терех А.М., Руденко А.И. Исследование конвективного теплообмена пакетов каплеобразных труб // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы Х школы-семинара молодых ученых и специалистов. – Казань, 2016. – С. 15–18.
- Дееб Р. Экспериментальное и численное исследование влияния угла атаки на характеристики воздушного потока при обтекании одиночной каплевидной трубы // Физикохимическая кинетика в газовой динамике. – 2021. – Т. 22. – № 2. – С. 53–67.
- Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow around circular and non-circular tubes // IOP Conference Series: Journal of Physics. – 2021. – Vol. 2088. – P. 012008. – DOI: 10.1088/1742-6596/2088/1/012008.
- Deeb R., Sidenkov D.V. Investigation of flow characteristics for drop-shaped tubes bundle using ansys package // 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – Moscow, Russia, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111775.
- Дееб Р., Колотвин А.В. Численное исследование и сравнение теплообмена и гидродинамики коридорного пучка труб круглой и каплевидной формы // Труды Академэнерго. – 2020. – № 3 (60). – С. 42–59.
- Deeb R., Arnob A.A. Numerical investigation of heat transfer characteristics of in-line dropshaped tubes bundle // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, Russia, 2021. – P. 1046–1050. – DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632258.

- Deeb R., Arnob A.A. Numerical investigation of flow through drop-shaped tubes bundle in in-line arrangement// 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, Russia, 2021. – P. 1051–1055. – DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632099.
- Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical modelling of heat transfer and hydrodynamics for dropshaped tubes bundle // IOP Conference Series: Journal of Physics. – 2020. – Vol. 1683. – P. 042082. – DOI: 10.1088/1742-6596/1683/4/042082.
- Дееб Р. Влияние угла атаки на теплообменные и гидродинамические характеристики шахматного пучка труб каплевидной формы в поперечном обтекании // Доклады АН ВШ РФ. – 2020. – № 3 (48). – С. 21–36. – DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-21-36.

22. ANSYS Fluent Reference Guide. Release 16.0. - ANSYS Inc., 2015.

THE EFFECT OF LONGITUDINAL AND TRANSVERSE PITCH RATIO ON THE FLOW CHARACTERISTICS OF STAGGERED DROP-SHAPED TUBES BUNDLE

Deeb R.^{1,2}

¹Damascus University ²National Research University (Moscow Power Engineering Institute)

The present work has been conducted to clarify flow behavior across staggered drop-shaped tubes bundle at various longitudinal and transversal pitch ratios (the tubes bundle configures in 18 cases). The investigation covers the effects of key design parameters of Reynolds numbers Re = $(1,78-18,72) \times 10^3$, longitudinal pitch ratios ($P_L = 1,44, 1,54, 1,64, 1,74, 1,84$ and 2.04) and transversal pitch ratios ($P_T = 1,24, 1,44, 1,64$ and 1,82). ANSYS Fluent software package is used to predict the flow pattern around tubes. The results of this study showed that at a constant longitudinal pitch ratio. As the Re increases, the friction factor decreases. The minimum values of the friction factor were achieved for ($P_L = 1,24$ and $P_T = 1,44$) at Re = $1,78 \cdot 10^3$, and ($P_T = P_L = 1,64$) at Re > $1,78 \cdot 10^3$. Correlation of the friction factor for the studied models were presented.

Keywords: drop-shaped tube, friction factor, longitudinal pitch, transversal pitch, pressure coefficient, drag coefficient, CFD, Fluent.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-5-24

REFERENCES

- 1. Deeb R. Comparative analysis of the latest improvements in heat transfer and hydrodynamic characteristics of smooth tubes in cross flow. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal processes in engineering*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 50–69. (In Russian).
- Wang J., Zheng H., Tian Z. Numerical simulation with a TVD–FVM method for circular cylinder wake control by a fairing. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, vol. 57, pp. 15–31. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.05.008.
- Horvat A., Leskovar M., Mavko B. Comparison of heat transfer conditions in tube bundle cross-flow for different tube shapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, iss. 5–6, pp. 1027–1038. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.030.
- Rajiva L.M., Abhilas S., Mihir K.D. Thermal performance of mixed tube bundle composed of circular and elliptical tubes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 5, pp. 492–505. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.02.009.
- Deeb R. Experimental and numerical investigation of the effect of angle of attack on air flow characteristics around drop-shaped tube. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, p. 065110. DOI: 10.1063/5.0053040.

22

- Deeb R. The effect of angle of attack on heat transfer characteristics of drop-shaped tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 183, pt. B, p. 122115. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122115.
- Antufev V.M., Beletskii G.S. *Teplootdacha i aerodinamicheskie soprotivleniya trubchatykh* poverkhnostei v poperechnom potoke [Heat transfer and aerodynamic resistance of ribbed surfaces in cross-flow]. Moscow, Leningrad, Mashgiz Publ., 1948. 120 p.
- Antufev V.M. *Effektivnost' razlichnykh form konvektivnykh poverkhnostei nagreva* [Efficiency of various forms of convective heating surfaces]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1966. 184 p.
- 9. Kays W.M., London A.L. *Kompaktnye teploobmenniki* [Compact heat exchangers]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 160 p. (In Russian).
- 10. Brauer H. Investigation of cross flow heat exchangers with different tube shapes. *Vereinigung der Grosskesselbesitzer. Mitteilungen*, 1961, vol. 22, no. 73, pp. 261–276. (In German).
- 11. Lavasani A.M., Bayat H. Experimental study of convective heat transfer from in-line cam shaped tube bank in crossflow. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 65, pp. 85–93. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.078.
- Sayed S., Mesalhy O., Khass T., Hassan A. Parametric study of air cooling process via water cooled bundle of wing-shaped tubes. *Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology*, 2012, vol. 15, no. 3. DOI: 10.21608/EIJEST.2012.96756.
- Zhukova Yu.V., Terekh A.M., Rudenko A.I. [Investigation of convective heat transfer of drop-shaped tube bundels]. *Problemy teplomassoobmena i gidrodinamiki v energomashinostroenii* [Problems of heat and mass transfer and hydrodynamics in power engineering]. Kazan, 2016, pp. 15–18. (In Russian).
- 14. Deeb R. Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie vliyaniya ugla ataki na kharakteristiki vozdushnogo potoka pri obtekanii odinochnoi kaplevidnoi truby [Experimental and numerical investigation of the effects of angle-of-attack on air flow characteristics for single drop-shaped tube]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike = Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 53–67.
- Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow around circular and non-circular tubes. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2021, vol. 2088, p. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/2088/1/012008.
- Deeb R., Sidenkov D.V. Investigation of flow characteristics for drop-shaped tubes bundle using ansys package. 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ Inforino48376.2020.9111775.
- 17. Deeb R., Kolotvin A.V. Numerical investigation of heat transfer and hydrodynamics for inline drop-shaped tubes bundle. *Trudy Akademenergo* = *Transactions of Academenergo*, 2020, no. 3 (60), pp. 42–59. (In Russian).
- Deeb R., Arnob A.A. Numerical investigation of heat transfer characteristics of in-line dropshaped tubes bundle. 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2021, pp. 1046– 1050. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632258.
- Deeb R., Arnob A.A. Numerical investigation of flow through drop-shaped tubes bundle in in-line arrangement. 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2021, pp. 1051– 1055. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632099.
- Deeb R., Sidenkov D.V. Numerical modelling of heat transfer and hydrodynamics for dropshaped tubes bundle. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2020, vol. 16836, p. 042082. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/4/042082.
- 21. Deeb R. Vliyanie ugla ataki na teploobmennye i gidrodinamicheskie kharakteristiki shakhmatnogo puchka trub kaplevidnoi formy v poperechnom obtekanii [Effect of angle of attack on heat transfer and hydrodynamic characteristics for staggered drop-shaped tubes bundle in cross-flow]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2020, no. 3 (48), pp. 21–36. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-21-36.
- 22. ANSYS Fluent Reference Guide. Release 16.0. ANSYS Inc., 2015.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Дееб Равад – родился в 1990 году, ассистент кафедры машиностроения, Университет Дамаска (Сирия, Дамаск), аспирант и ассистент кафедры теоретических основ теплотехники, Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов: разработка и реализация численных и математических моделей для моделирования задач гидродинамики и теплопередачи пучков труб, используемых в теплообменнике, инновационные технологии энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Опубликовано 45 научных работ. (Адрес: 111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14. Е-mail: e.rawad.deeb@yandex.com).

Deeb Rawad (b. 1990) – assistant of General Mechanic Engineering Department, Damascus University (Damascus, Syria), Ph.D. student of Theoretical Bases of Heat Engineering Department, National Research University (Moscow Power Engineering Institute). His research interests are currently focused on development and implementation of numerical and mathematical models for modeling hydrodynamics and heat transfer problems of tube bundles used in heat exchangers, innovative technologies for energy-saving, and energy-efficient equipment. He is author of 45 scientific papers. (Address: 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russia. E-mail: e.rawad.deeb@yandex.com).

Статья поступила 13 февраля 2022 г. Received February 13, 2022

To Reference:

Deeb R. Vliyanie otnositel'nogo prodol'nogo i poperechnogo shaga na kharakteristiki potoka shakhmatnogo puchka kaplevidnykh trub [The effect of longitudinal and transverse pitch ratio on the flow characteristics of staggered drop-shaped tubes bundle]. *Doklady Akademii mauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 5–24. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-5-24.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

июль-сентябрь

№ 3 (56)

= ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 535.338

2022

СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

А.С. Яценко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

В статье представлены основные этапы развития учений об элементах с большим зарядом ядра и их место в периодической таблице.

Ключевые слова: Периодическая таблица элементов, атом, тяжелые элементы. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-25-30

Тяжелое есть составленное из множества легких частей.

Платон А.

Мы живем в постоянном поиске ответов на сложные вопросы. Одним из таких вопросов является следующий: какой самый тяжелый элемент существует в природе? Взгляд на таблицу Менделеева не дает однозначного ответа, так как последние элементы – искусственные. Многие исследователи пытались найти новые элементы в глубине Земли, на поверхности Луны или в космических лучах и телах. Однако их поиски не увенчались успехом.

В VII–V веках до н. э. жители древности определяли и характеризовали первоматерии. Атомистическое учение об элементах было принято в VI–IV веках до н. э. В V–III веках до н. э. существовало правило «семь металлов древности» – золото, серебро, ртуть, медь, олово, свинец, железо. С годами число найденных элементов увеличивалось [1, 2]. В 1815 г. англичанин У. Проут доказал первичность водорода, а остальные элементы по массе кратны ему. В 1817 г. немецкий химик Л. Гмелин предложил понятие «тяжелые элементы» по массе тяжелее атома железа. Критериями этого положения были:

– относительная атомная масса > 50 г/см³;

– плотность, равная или больше плотности железа ($\geq 8 \ \text{г/cm}^3$);

- пороговая плотность 5 г/см³.

Исследователи того времени активно обсуждали это понятие. Наконец, состоявшийся в 1860 г. I Международный съезд химиков, подтвердил это понятие.

Дальнейшее развитие понятия атома проходило в следующем порядке. В 1869 г. Д. Менделеев [3] представил таблицу для 66 элементов, выявив периодичность в строении атомов. Позднее Дж. Томсон (1897) открыл в атоме электрон, а Э. Резерфорд (1911) – ядро. Оба они разработали свои модели атомов. Однако открытые в 1860 г. оптические спектры элементов не описывались в обеих моделях. Решить эту задачу взялся Н. Бор с помощью теории квантов [4], начало которой положил в 1900 г. М. Планк [5]. Каждая спектральная линия соответствует осциллятору с частотой, который может поглотить (испустить) целое число электронов.

В 1939–1955 годах таблица элементов усилиями американских физиков пополнилась редкоземельными тяжелыми элементами. Руководители этих работ Г. Сиборг и Э. Мак-Миллан в 1951 г. получили Нобелевские премии.

© 2022 А.С. Яценко

Первые трансурановые элементы были синтезированы в начале 40-х гг. XX века в лаборатории Лоуренса (США).

С повышением заряда ядра строение атома усложняется. Порядок заполнения таблицы с большим зарядом ядра впервые представил в 1955 г. американский физик Г. Сиборг [5] с помощью таблиц элементов Д. Менделеева и Ю. Томсена в виде лестницы для распределения электронных оболочек (рис. 1).



Рис. 1 – Удобная форма Периодической системы, указывающая предсказываемое положение новых элементов

Fig. 1 – A convenient form of the Periodic table, indicating the predicted position of new elements

В настоящее время в природе найдено 94 элемента. Остальные получены искусственно. Позднее аналогично элементы с Z = 104 и выше стали называть сверхтяжелыми. Основной критерий поиска таких элементов – масса ядра.

Со дня открытия Периодического закона прошло 150 лет, но до сих пор появляются попытки уточнить или усовершенствовать ее. Многообразие вариантов вызвано стремлением разных авторов найти удовлетворительное решение некоторых спорных моментов в самой структуре Периодической таблице химических элементов, существующих до сих пор. За последние 60 лет специалисты в области химии и физики разработали и выполнили эксперименты со сверхтяжелыми элементов получены в сложных ядерных реакциях и экспериментальных условиях [6–12]. Мишень – долгоживущий изотоп основного элемента, бомбардировка – ускоренным пучком стабильных изотопов высокой интенсивности. Частичные данные о сверхтяжелых атомах сведены в табл. 1, 2 из работ [7–12]. Получены скудные, но очень ценные результаты.

Эти элементы получены в известных лабораториях мира – Беркли, Ливермор (США), Дубна (Москва), Дармштадт (Германия). У каждой лаборатории – свой подход к их изучению. Все элементы утверждены Международными союзами физиков (IUPAP), председатель Н. Тарасова, и химиков (IUPAC), председатель Б. Маккелара.

Таблица 1 / Table 1

Название	Символ	Z	Конфи- гурация	Терм	Реакция	Место	Год
Резерфордий	Rf	104	$5f^{14}6d^27s^2$		Ри + Ne Беркли		1969
Дубний	Db	105	$5f^{14}6d^{3}7s^{2}$	$dd^{3}7s^{2}$ Am + Ne Дубна Беркли $drage$		1976 1976	
Сиборгий	Sg	106	$5f^{14}6d^47s^2$	⁵ D ₀₋₄	Cf+O	Беркли	1974
Борий	Bh	107	$5f^{14}6d^57s^2$	⁶ S _{5/2}	Bi + Cr Bk + Ne	Дубна Дармштадт }	1976 1981
Хассий	Hs	108	$5f^{14}6d^67s^2$	⁵ D ₄₋₀	Pb + Fe	Дармштадт	1984
Мейтнерий	Mt	109	$5f^{14}6d^77s^2$	${}^{4}\mathrm{F}_{9/2-3/2}$	Bi + Fe	Дармштадт	1982
Дармштадий	Ds	110	$5f^{14}6d^87s^2$		Pb + Ni	Дармштадт	1994
Рентгений	Rg	111	$5f^{14}6d^97s^2$		Bi + Ni	Дармштадт	1996
Коперниций	Cn	112	$5f^{14}6d^{10}7s^2$		Pb + Zn	Дубна Дармштадт }	2000 2000
Нихоний	Nh	113	6d ¹⁰ 7p7 s ²		Np + Ca	Дубна	2004
Флеровий	Fl	114	$6d^{10}7p^27s^2$		Pu + Ca	Дубна	2004
Московий	Mc	115	$6d^{10}7p^37s^2$		Am + Ca	Дубна	2003
Ливерморий	Lv	116	$6d^{10}7p^47s^2$		Cu + Ca	Дубна	2000
Теннесин	Тс	117	$6d^{10}7p^57s^2$	³ P ₂₋₀	Bk + Ca	Дубна Ливермор }	2000 2000
Оганессон	Og	118	$6d^{10}7p^67s^2$		Cf + Ca	Дубна	2006

Частичные данные по сверхтяжелым элементам Partial data on superheavy elements

Таблица 2 / Table 2

Частичные энергетические уровни новых элементов Partial energy levels of new elements

Элемент	Конфигурация	Терм	Е, см ⁻¹
Sg	$6d^4 7s^2$	⁵ D ₀₋₄	0, 4834, 7614, 9607, 103635
	6d ³ 7s ² 7p	${}^{5}I^{0}$	14717, 17043, 20628, 24138, 26271
Bh	$6d^57s^2$	⁶ S _{5/2}	0
		${}^{4}P_{3/2-1/2}$	13062, 15659
		${}^{4}G_{7/2-1/2}$	13828, 14981, 16447
	$6d^47s^27p$	${}^{6}S^{0}$	12792
		${}^{6}\mathrm{D}^{0}$	17781, 19485, 22930, 25171, 26587
Hs	$6d^67s^2$	⁵ D ₄₋₀	0, 2102, 7400, 8270, 9285
	6d ⁵ 7s ² 7p	${}^{5}I^{0}$	13093, 15600, 29444
Mt	$6d^77s^2$	${}^{4}F_{9/2-3/2}$	0, 5047, 7996, 12628
	$6d^67s^27p$	${}^{6}I^{0}$	21879, 24388, 24524, 25990

В ближайшее время эти союзы утвердят еще два элемента 119 и 120, которые откроют VIII период. Получение атомов новых элементов является весьма сложным, так как наблюдаются они очень редко – от единичных в минуту (Rf) до единичных в неделю (Og).

Крайне малое время жизни – микросекунды. Издавна было принято включать в названия вновь открытых элементов наименования стран, городов и авторов открытий. Например, 118 элемент назван оганессоном в честь сотрудника ОИЯИ г. Дубна.

Атомные ядра этих элементов расположены в центре атомов и несут всю долю массы атома. В ряду этих элементов атомная масса лежит в области 267-294 а.е

Ядерная физика медленно и настойчиво двигает границы существования материи все дальше и дальше [12]. Успех в дальнейшем зависит от развития чувствительного приборостроения. В настоящее время самым сверхтяжелым элементом на Земле считается 118 элемент. Однако Вселенная состоит из многих элементов, которые в настоящее время не доступны. Успех в дальнейшем зависит от появления разработок приборов для защиты сверхтяжелых элементов. Теоретические расчеты предполагают существование более 287 новых элементов. Для их обнаружения нужны более точные экспериментальные методы и установки.

Пока открытым остается вопрос о размещении этих элементов в Периодической таблице. Предварительно они представлены в середине таблицы (рис. 2). Системный порядок элементов Периодической таблицы предполагает, что элементы с Z = 104 - 112 равномерно распределены. Элементы с Z = 113 - 118 главная группа с элементами s- и p-оболочками. Однако окончательно скорее всего они войдут в третью строку под таблицей после строк с редкоземельными и трансурановыми элементами. Открытым остается вопрос: куда войдут остальные элементы?

72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	TI	Pb	Bi	Po	At	Rn
104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ђ	Og

Puc. 2 - Место сверхтяжелых элементов в Периодической таблице

Fig. 2 – The place of superheavy elements in the Periodic table

Данная работа предназначена как методическое пособие широкому кругу читателей – студентам, аспирантам и научным инженерам, занимающимся вопросами атомной спектроскопии, физики плазмы и астрофизики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Эрдеи-Груз Т. Основы строения материи: пер. с нем. М.: Мир, 1976. 486 с.
- Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. М.: Мысль, 1979. – 620 с.
- 3. Менделеев Д.И. Сочинения. В 25 т. Т. 2. М.: Химтеориздат, 1934. 519 с.
- 4. Бор Н. Три статьи о спектрах и строении атома. М.: Госиздат; Петроград: Мосполиграф, 1923. 156 с.
- Сиборг Г. Расширение пределов периодической системы // Сто лет Периодического закона химических элементов (1869–1969): докл. на пленар. заседаниях / Х Юбилейный Менделеевский съезд. – М.: Наука, 1971. – С. 21–39.
- Oganessian Yu. Super heavy elements: on the 150th anniversary of the discovery of the periodic table of elements // Nuclear Physics News. 2019. Vol. 29 (1). P. 5–10. DOI: 10.1080/10619127.2019.1571799.

- Dzuba V. Ionization potentials and polarizabilities of superheavy elements from Db to Cn (Z = 105–112) // Physical Review A. – 2016. – Vol. 93 (3). – P. 032519. – DOI: 10.1103/PhysRevA.93.032519.
- Martin W.C., Sugar J. Designations of ds2p energy levels in neutral zirconium, hafnium, and rutherfordium (Z=104) // Physical Review A. – 1996. – Vol. 53 (3). – P. 1911–1914. – DOI: 10.1103/PhysRevA.53.1911.
- 9. Першина В. Электронная структура и химические свойства сверхтяжелых элементов // Успехи химии. – 2009. – Т. 78, № 12. – С. 1243–1262.
- The excitation energies, ionization potentials and oscillator strengths of neutral and ionized species of Uub (Z = 112) and the homologue elements Zn, Cd and Hg / Y.J. Yu, J.G. Li, C.Z. Dong, X.B. Ding, S. Fritzsche, B. Fricke // European Physical Journal D. 2007. Vol. 44 (1). P. 51–56. DOI: 10.1140/epjd/e2007-00172-y.
- Ionization potentials and radii of neutral and ionized species of elements 107 (bohrium) and 108 (hassium) from extended multiconfiguration Dirac-Fock calculations / E. Johnson, B. Fricke, T. Jacob, C.Z. Dong, S. Fritzsche, V. Pershina // Journal of Chemical Physics. – 2002. – Vol. 116(5). – P. 1862–1868. – DOI: 10.1063/1.1430256.
- 12. Eichler R. The periodic table of elements: superheavy in chemistry // Nuclear Physics News. 2019. Vol. 29 (1). P. 11–15.

SUPERHEAVY ELEMENTS

Yatsenko A.S.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article presents the main stages in the development of the doctrine of elements with a large nuclear charge and their place in the periodic table.

Key words: Periodic table of elements, atom, heavy elements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-25-30

REFERENCES

- 1. Erdey-Grúz T. *Osnovy stroeniya materii* [Fundamentals of the structure of matter]. Moscow, Mir Publ., 1976. 486 p. (In Russian).
- 2. Diogenes Laertes. *O zhizni, ucheniyakh i izrecheniyakh znamenitykh filosofov* [About the life, teachings and sayings of famous philosophers]. Moscow, Mysl' Publ., 1979. 620 p. (In Russian).
- Mendeleev D.I. Sochineniya. V 25 t. T. 2 [Works. In 25 vols. Vol. 2]. Moscow, Khimteorizdat Publ., 1934. 519 p.
- 4. Bohr N. *Tri stat'i o spektrakh i stroenii atoma* [Three articles on the spectra and structure of the atom]. Moscow, Gosizdat Publ., Petrograd, Mospoligraf Publ., 1923. 156 p. (In Russian).
- Seaborg G. [Expansion of the limits of the periodic system]. Sto let Periodicheskogo zakona khimicheskikh elementov (1869–1969) [One hundred years of the periodic law of chemical elements (1869–1969)]. X Anniversary Mendeleev Congress. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 21–39. (In Russian).
- Oganessian Yu. Super heavy elements: on the 150th anniversary of the discovery of the periodic table of elements. *Nuclear Physics News*, 2019, vol. 29 (1), pp. 5–10. DOI: 10.1080/10619127.2019.1571799.
- Dzuba V. Ionization potentials and polarizabilities of superheavy elements from Db to Cn (Z = 105–112). *Physical Review A*, 2016, vol. 93 (3), p. 032519. DOI: 10.1103/ PhysRevA.93.032519.
- Martin W.C., Sugar J. Designations of ds2p energy levels in neutral zirconium, hafnium, and rutherfordium (Z=104). *Physical Review A*, 1996, vol. 53 (3), pp. 1911–1914. DOI: 10.1103/PhysRevA.53.1911.

- 9. Pershina V. Elektronnaya struktura i khimicheskie svoistva sverkhtyazhelykh elementov [Electronic structure and chemical properties of superheavy elements]. *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*, 2009, vol. 78, no. 12, pp. 1243–1262. (In Russian).
- Yu Y., Li J.G., Dong C.Z., Ding X.B., Fritzsche S., Fricke B. The excitation energies, ionization potentials and oscillator strengths of neutral and ionized species of Uub (Z = 112) and the homologue elements Zn, Cd and Hg. *European Physical Journal D*, 2007, vol. 44 (1), pp. 51–56. DOI: 10.1140/epjd/e2007-00172-y.
- Johnson E., Fricke B., Jacob T., Dong C.Z., Fritzsche S., Pershina V. Ionization potentials and radii of neutral and ionized species of elements 107 (bohrium) and 108 (hassium) from extended multiconfiguration Dirac-Fock calculations. *Journal of Chemical Physics*, 2002, vol. 116 (5), pp. 1862–1868. – DOI: 10.1063/1.1430256.
- 12. Eichler R. The periodic table of elements: superheavy in chemistry. *Nuclear Physics News*, 2019, vol. 29 (1), pp. 11–15.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Яценко Алексей Степанович – родился в 1941 году, канд. техн. наук, ведущий инженер, институт автоматики и электрометрии СО РАН. Область научных интересов: спектроскопия атомов и ионов. Опубликовано 40 работ. (Адрес: 630058, Россия, Новосибирск, ул. Добровольческая, д. 2).

Yatsenko Aleksey Stepanovich (b. 1941) – PhD (Eng.), leading engineer, Institute of Automation and Electrometry SB RAS (Address: 2, Dobrovoltcheskaya St., Novosibirsk, 630058, Russia).

> Статья поступила 27 июня 2022 Received June 27, 2022

To Reference:

Yatsenko A.S. Sverkhtyazhelye elementy [Superheavy elements]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 25–30. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-25-30.

 ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

 2022
 июль-сентябрь
 № 3 (56)

— ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.96

ДВУХТОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАСТЕЙ

С.В. Житник, М.А. Степанов

Новосибирский государственный технический университет

В данной работе рассмотрены угловые шумы вращающихся лопастей радиолокационного объекта. Рассмотрена многоточечная геометрическая модель вращающихся лопастей одного винта. На ее основе получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать угловые координаты кажущегося центра излучения винта с вращающимися лопастями. Также на основе многоточечной геометрической модели получены соотношения, позволяющие синтезировать двухточечную геометрическую модель вращающихся лопастей винта. Теоретические результаты подтверждены математическим моделированием для двух конфигураций одновинтового малогабаритного летательного объекта: с одной вращающейся лопастью и с двумя вращающимися лопастями.

Ключевые слова: угловой шум, многоточечная модель, двухточечная модель, лопасть, эхосигнал, кажущийся центр излучения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-31-41

1. Введение

На сегодняшний день радиолокационные станции (РЛС) являются комплексными системами для определения дальности до объекта, углового положения объекта, скорости сближения, размера и формы объекта.

Для разработки таких станций широко используется моделирование. Достоверность моделирования определяется проработанностью математических моделей радиолокационных объектов [1]. Следовательно, задача разработки новых моделей и уточнения и применения существующих моделей радиолокационных объектов является актуальной.

Одним из радиолокационных объектов, моделирование отражений от которого представляет интерес, является летательный аппарат с вращающимися лопастями, например, вертолет, квадрокоптер и т. д. Известно, что отраженный сигнал от таких объектов является нестационарным из-за вращающихся деталей – лопастей и втулки винта. В настоящее время в литературе достаточно подробно рассмотрено моделирование эхосигнала от таких объектов. Формируемые эхосигналы обладают формой допплеровского спектра и временной структурой, соответствующими отражениям от реального радиолокационного объекта. Вместе с тем помимо определенной спектральной и временной структуры эхосигнала реальным радиолокационным объектам присуще такое явление, как угловой шум – флуктуации фазового фронта отраженной электромагнитной волны, вызванные многоточечной структурой радиолокационного объекта [2–4]. Угловой шум является важной характеристикой, позволяющей определить угловое положение и угловые размеры отражающего объекта [5].

Моделирование распределенной геометрической структуры радиолокационных объектов производится с использованием геометрических моделей. При этом объект замещается совокупностью излучающих точек, распределенных в пространстве. Каждая из точек излучает сигнал, соответствующий отражениям от замещаемого фрагмента объекта. Для обеспечения высокой достоверности количество точек геометрической модели должно быть велико. Известно, что для

© 2022 С.В. Житник, М.А. Степанов

формирования отражений от вертолета необходимо использовать десятки точек для фюзеляжа, сотни для втулки и каждой из лопастей [6].

Большое количество точек серьезно ограничивает применение многоточечных моделей при имитации в реальном масштабе времени. Для решения подобных проблем формируют малоточечную модель радиолокационного объекта. Например, в [7] показано, что для адекватного замещения отражений от радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам, достаточно четырех точек модели, размещенных в вершинах прямоугольника, а для объектов, распределенных по одной угловой координате, – двух точек. Однако до настоящего момента рассмотрено замещение отражений с помощью таких моделей от радиолокационных объектов, не содержащих в своем составе подвижных частей. В частности, моделирование отражений малоточечными моделями от лопастей винта летательного аппарата не рассмотрено.

Традиционным подходом к анализу отражений от сложных радиолокационных объектов является декомпозиция этого объекта на составные части, раздельный анализ отражений для каждой из этих частей и последующее обобщение полученных результатов [8, 9]. Для летательных аппаратов с винтами возможна декомпозиция на фюзеляж, втулку винта и лопасти винта. В настоящей работе рассматриваются отражения от лопастей винта.

Таким образом, цель настоящей работы получить выражения, определяющие сигналы, подводимые к излучателям двухточечной геометрической модели, адекватно формирующей отражения от лопастей вращающегося винта.

Для достижения поставленной цели последовательно решены следующие задачи: синтезирована многоточечная геометрическая модель лопастей вращающегося винта, определено угловое положение кажущегося центра излучения для многоточечной модели, осуществлен переход от многоточечной геометрической модели к двухточечной, произведено сравнение углового положения кажущегося центра излучения, сформированного многоточечной и двухточечной моделями.

2. Многоточечная модель лопастей

Для описания координат точек модели введем локальную цилиндрическую систему координат. Ось *OZ* системы координат совпадает с осью вращения, начало системы координат лежит в точке пересечения оси вращения и плоскости распо-



Рис. 1 – Система координат, используемая для задания лопастей

Fig. 1 – Coordinate system used to define the blades

ложения лопастей (рис. 1). Полярный угол θ цилиндрической системы координат отсчитывается от полярной оси. Положительные направления отсчета полярного угла соответствуют движению точки по часовой стрелке при визировании вдоль оси *OZ*.

При моделировании рассматривают геометрию лопастей летательного аппарата в виде совокупности отражателей, расположенных в одной плоскости [10]. Винт представляется как система из N_L лопастей с угловым интервалом $\Delta \theta_L = 2 \cdot \pi / N_L$, вращающихся с частотой F по часовой стрелке в плоскости z = 0. Лопасти нумеруются по часовой стрелке: $n = 1...N_L$, начиная с лопасти, имеющей минимальный положительный угол относительно

полярной оси системы координат в начальный момент времени (обозначим этот угол как $\theta_1(0)$).

Угловое положение *n*-й лопасти $\theta_n(t)$ в произвольный момент времени можно определить по выражению

$$\theta_n(t) = \theta_1(0) + 2\pi F t + (n-1)\Delta\theta$$

Отражатели располагаются на передней и задней кромках лопасти (рис. 2). Так как нормаль к передней и задней кромкам лопасти образует разные углы с направлением визирования, кромки лопасти имеют различный коэффициент отражения. На каждой из кромок отражатели расположены эквидистантно с шагом ΔR в диапазоне от R_{Hub} (радиус втулки) до R_{Blade} (радиус лопасти). В [10] рекомендуют выбирать шаг расположения отражателей не более чем $\lambda/4$, где λ – длина волны зондирующего сигнала РЛС. Количество точек, требуемых для моделирования каждой из кромок одной лопасти, определяется выражением

$$N_p = \operatorname{Round}\left(\frac{\left(R_{\operatorname{Blade}} - R_{\operatorname{Hub}}\right)}{\Delta R}\right),$$

где Round() – функция округления дробного числа до ближайшего целого значения.



Рис. 2 – Расположение отражающих точек на лопасти

Fig. 2 - Location of reflective points on the blade

Так как ширина лопасти значительно меньше ее длины, положим, что угловое положение наступающей и отступающей лопастей совпадает.

Эхосигнал от каждой из точек имеет допплеровский сдвиг, определяемый проекцией на направление визирования вектора скорости сближения точки и РЛС.

Для учета местоположения точки наблюдения введем декартову систему координат (*OXYZ*) (рис. 3), начало которой совпадает с фазовым центром приемной антенны, ось *OY* направлена вверх, *OX* – на север, а *OZ* дополняет систему до правой.

Если принять, что центр вращения имеет координаты (x_{C0}, y_{C0}, z_{C0}) и перемещается со скоростью $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$, то дальность от РЛС до *i*-го отражателя на *k*-й кромке лопасти определяется выражением:

$$r_{i,k}(t) = \sqrt{z_{i,k}^2(t) + y_{i,k}^2(t) + x_{i,k}^2(t)},$$

где

$$x_{i,k}(t) = x_{C0} + v_x t + R_i \cos(\theta_k(t));$$

$$y_{i,k}(t) = y_{C0} + v_y t - R_i \sin(\theta_k(t)); \qquad z_{i,k}(t) = z_{C0} + v_z t$$



В точке наблюдения происходит интерференция электромагнитных волн, отраженных от всех точек лопастей. Тогда комплексная огибающая эхосигнала определяется выражением

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{2N_L} E_{i,k}(t) \exp(j\varphi_{i,k}(t)),$$

где $E_{i,k}(t)$ и $\phi_{i,k}(t)$ – соответственно амплитуда и фаза в точке наблюдения сиг-

нала, отраженного от *i*-й точки k-й кромки лопасти. Напомним, что каждая лопасть имеет две кромки (наступающую и отступающую), различающиеся величиной коэффициента отражения. Наступающей кромке соответствуют нечетные значения k, отступающей – четные.

$$E_{i,k}(t) = \begin{cases} \{0, & \text{при } \theta_k(t) \in [0; \pi]; \\ \sqrt{\sigma_2}, & \text{при } \theta_k(t) \in [-\pi; 0], \end{cases} \text{для четных } k, \\ \{\sqrt{\sigma_1}, & \text{при } \theta_k(t) \in [0; \pi]; \\ 0, & \text{при } \theta_k(t) \in [-\pi; 0], \end{cases} \text{для нечетных } k, \end{cases}$$

где σ_1 , σ_2 – эффективная поверхность рассеяния наступающей и отступающей кромок лопасти соответственно; $\theta(t)$ – угол визирования *k*-й кромки в момент времени *t* (см. рис. 2).

Фаза $\varphi_{i,k}(t)$ определяется выражением $\varphi_{i,k}(t) = 2\beta r_{i,k}(t)$, где $\beta = 2\pi/\lambda$ – коэффициент фазы.

3. Соотношения для расчета положения кажущегося центра излучения

Для многоточечных распределенных объектов с заданной геометрией и определенным положением отражающих точек угловое положение кажущегося центра излучения определяется выражением [11]

$$\alpha(t) = \frac{u_h(t)u_b(t) + v_h(t)v_b(t)}{u_h^2(t) + v_h^2(t)},$$
(1)

где

$$u_{h}(t) = \sum_{i=1}^{N_{p}} \sum_{k=1}^{2N_{L}} E_{i,k}(t) \cos(\varphi_{i,k}(t)),$$

$$v_{h}(t) = \sum_{i=1}^{N_{p}} \sum_{k=1}^{2N_{L}} E_{i,k}(t) \sin(\varphi_{i,k}(t)),$$

$$u_{b}(t) = \sum_{i=1}^{N_{p}} \sum_{k=1}^{2N_{L}} \xi_{i,k}(t)u_{h}(t),$$

$$v_{b}(t) = \sum_{i=1}^{N_{p}} \sum_{k=1}^{2N_{L}} \xi_{i,k}(t)v_{h}(t),$$

 $\xi_{i,k}(t)$ – обобщенная координата *i*-й точки *k*-й кромки лопасти.

Зависимость обобщенной координаты отражающих точек от времени для *k*-й кромки лопасти рассчитывается следующим образом [7]:

$$\xi_{i,k}(t) = \mathbf{r}_{i,k}(t) \cos\left(\theta_{\text{Int}(k/2)}(t)\right),$$

где Int() – операция взятия целой части дробного числа.

4. Двухточечная модель вращающихся лопастей беспилотника

Перейдем к двухточечной геометрической модели лопастей винта. Она представляет собой две неподвижные, не разрешаемые в пространстве излучающие точки (рис. 4). Сигналы, подводимые к точкам модели, жестко связаны между собой, их параметры (отношение амплитуд и разность фаз) определяет положение точки, из которой, как кажется, исходит излучение – кажущегося центра излучения.



Рис. 4 – Многоточечная и двухточечная модель лопасти

Fig. 4 - Multi-point and two-point model of the blade

При переходе к двухточечной модели лопастей винта каждая из точек многоточечной модели замещается кажущимся центром излучения (рис. 4). Его местоположение соответствует угловой координате замещаемой точки и определяется соотношением

$$L = \frac{B}{2} \frac{E_{m1}^2 - E_{m2}^2}{E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2}\cos(\psi) + E_{m1}^2},$$
(2)

где B – база двухточечной модели (расстояние между точками); E_{m1} , E_{m2} – амплитуды сигналов, излучаемых из точек 1 и 2; ψ – разность фаз сигналов, излучаемых из точек модели.

В [1] показано, что наибольшую точность обеспечивают модели, излучающие синфазные сигналы ($\psi = 0$).

Каждая кромка винта состоит из множества отражающих точек. Для каждой из них необходимо сформировать кажущийся центр излучения. Таким образом, сигнал, подводимый к точкам двухточечной геометрической модели, будет представлять собой суперпозицию сигналов, определяющих положение каждой из точек многоточечной модели:

$$\begin{cases} \dot{s}_{1}(t) = \sum_{i=1}^{N_{P}} \sum_{k=1}^{2N_{L}} E_{m1i,k} E_{i,k}(t) \exp(j\varphi_{i,k}(t)); \\ \dot{s}_{2}(t) = \sum_{i=1}^{N_{P}} \sum_{k=1}^{2N_{L}} E_{m2i,k} E_{i,k}(t) \exp(j\varphi_{i,k}(t)), \end{cases}$$
(3)

где $E_{m1i,k}$, $E_{m2i,k}$ – амплитуды сигналов двухточечной модели, замещающей *i*-ю точку *k*-й кромки и рассчитываемые по (2).

В точке наблюдения сигнал представляет собой сумму сигналов, излученных из первой и второй точки:

$$\dot{s}(t) = \dot{s}_1(t) + \dot{s}_2(t)$$
.

5. Апробация полученных соотношений

Для апробации полученных соотношений рассмотрена модель вращающегося винта беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3. Длина лопастей 0,12 м, частота вращения 200 Гц, лопасти расположены эквидистантно по углу 2π

с шагом $\frac{2\pi}{N_L}$. Рассмотрено две конфигурации указанного беспилотного лета-

тельного аппарата: с одной вращающейся лопастью и двумя вращающимися лопастями. Для обоих случаев моделирования полагалось, что координаты центра вращения в ДСК (x, y, z) = (0, 0, 1), а точка наблюдения находится в начале системы координат. Длина волны зондирующего сигнала равна 3,3 см, таким образом, для многоточечной модели одной кромки лопасти потребуется 12 точек.

Для лопастей винта составлена многоточечная геометрическая модель и проведен синтез двухточечной геометрической модели по (3). База (расстояние между излучателями) двухточечной модели составляет 0,24 м и ориентирована по нормали к направлению визирования объекта. Произведена моноимпульсная пеленгация совокупности отраженных сигналов в плоскости азимута с использованием пеленгационного соотношения [7]:

$$\theta(t) = \operatorname{Re}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_p} F_{\Delta i}(\xi_i) \dot{s}_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_p} F_{\Sigma i}(\xi_i) \dot{s}_i(t)}\right),$$

где $\dot{s}_i(t)$ – комплексная огибающая сигнала, отраженного от *i*-й точки; F_{Δ} – разностная диаграмма направленности; F_{Σ} – суммарная диаграмма направленности; ξ_i – обобщенная координата *i*-й точки. Суммарная диаграмма направленности полагается изотропной, а разностная – наклонная линия с углом наклона в 45°.

Кроме того, для многоточечной геометрической модели осуществлен теоретический расчет положения кажущегося центра излучения по (1).

По полученным зависимостям пеленга строилась гистограмма. Гистограммы усреднялись по 100 реализациям, отличающиуся друг от друга значением начальной случайной фазы сигналов, излучаемых точками геометрических моделей. Для каждой реализации значение начальной фазы для всех точек модели полагалась одинаковым и являлось равномерно распределенной в интервале [0; 2*π*] случайной величиной.

Модули временной и спектральной реализаций суммарного эхосигнала, сформированного многоточечной и двухточечной геометрическими моделями, для случая одной лопасти представлены на рис. 5. Видно, что реализации совпадают и качественно соответствуют реализациям, приведенным в [10, 12, 13].



Рис. 5 – Временная (a) и спектральная (б) реализации сигнала в точке наблюдения для многоточечной и двухточечной моделей

Fig. 5 – Temporal (*a*) and spectral (δ) realizations of the signal at the observation point for multipoint and two-point models

Пример временной реализации углового положения КЦИ и его плотность распределения вероятности представлены на рис. 6 для одной лопасти и на рис. 7 для двух лопастей.

Из рис. 6 и 7 видно, что временные реализации углового положения КЦИ, полученные для многоточечной и двухточечной моделей, а также расчетом по выражению (1) совпадают с высокой точностью. Среднеквадратическое отклонение теоретически рассчитанной временной реализации от реализации для многоточечной модели составило 0,1931, реализации для двухточечной модели от многоточечной составило 0,1930. Во всех случаях временная реализация представляет собой периодический процесс с периодом 5 мс, определяемым частотой вращения лопастей винта. На временной реализации можно выделить медленно меняющуюся составляющую и резкие, так называемые игольчатые выбросы.



Рис. 6 – Временная реализация углового положения КЦИ для одной лопасти (a) и ее ПРВ (б)

Fig. 6 – Temporary implementation of the angular position of the ARC for 1 blade (*a*) and its PDV (δ)



Рис. 7 – Временная реализация углового положения КЦИ для двух лопастей (a) и ее ПРВ (б)

Fig. 7 – Temporary implementation of the angular position of the ARC for 2 blades (*a*) and its PDV (δ)

Медленно меняющаяся компонента, фактически, определяется наблюдаемым угловым размером лопасти. Положение центра излучения при этом соответствует центру наблюдаемого углового размера лопасти с учетом его углового положения. Это хорошо видно на рис. 6, *a*, где приведена временная реализация пеленга для винта с одной лопастью. За счет вращения угловой размер изменяется, что влечет за собой перемещение КЦИ. На рис. 7, где приведена временная реализация углового положения КЦИ для двухлопастного винта, видно, что медленно меняющаяся компонента всегда равна нулю. Это объясняется тем, что при любом угловом размере вращающихся лопастей угловое положение их центра остается неизменно равным нулю.

Игольчатые выбросы соответствуют случаю, когда сигналы, излученные из точек модели, приходят в точку наблюдения с разностью фаз, близкой к 180°. Это явление легко наблюдать для двухточечной геометрической модели. Как видно из (2) для случая двухточечной модели, при такой фазировке сигналов наблюдается стремительное перемещение КЦИ даже в случае, когда амплитуды сигналов близки [14]. Аналогичное явление наблюдается и для многоточечной геометрической модели. Изменение фазы сигнала от каждой из точек происходит в силу вращения лопасти. Важно отметить, что различия во временных реализациях, полученных с использованием разных моделей вращающихся лопастей, наиболее сильно проявляются непосредственно в окрестности игольчатых выбросов. Объясняется это очень высокой чувствительностью положения КЦИ к параметрам противофазных сигналов, излучаемых точками модели [14].

6. Заключение

Показано, что в плоскости азимута флуктуации кажущегося центра отражения от вращающихся лопастей представляют собой нестационарный случайный процесс. Получены аналитические выражения, определяющие сигналы, подводимые к излучателям двухточечной геометрической модели, адекватно формирующей отражения от вращающегося винта, содержащего произвольное количество лопастей. Теоретические результаты подтверждены математическим моделированием. Для этого составлены многоточечная и двухточечная геометрические модели вращающихся лопастей реального БПЛА DJI Phantom 3. Моделирование показало совпадение временной реализации углового положения КЦИ, формируемого обеими моделями.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Sayama H. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. Open SUNY Textbooks, 2015. 496 p.
- Dunn J.H., Howard D.D. Phenomena of scintillation noise in radar tracking systems // Proceedings of IRE. – 1959. – Vol. 47. – P. 855–863.
- Gubonin N.S. Fluctuations of the phase front of a wave reflected from a complex target // Radio Engineering and Electronic Physics. – 1965. – Vol. 10 (5). – P. 718–725.
- Delano R.H. A theory of target glint or angular scintillation in radar tracking // Proceedings of IRE. – 1953. – Vol. 41. – P. 1778–1784.
- Dunn J.H., Howard D.D. Radar target amplitude, angle, and Doppler scintillation from analysis of the echo signal propagating in space // *IEEE Transactions on Microwave Theory* and *Techniques.* – 1968. – Vol. 16 (9). – P. 715–728. – DOI: 10.1109/TMTT.1968.1126776.
- Modelling the radar signature of rotorcraft / G. Point, J.-F. Degurse, L. Savy, M. Montécot, J.-L. Milin // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2021. – Vol. 15 (8). – P. 867–883. – DOI: 10.1049/rsn2.12062.
- Степанов М., Киселев А. Моделирование угловых шумов радиолокационных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 246 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-4265-4.
- Huang P., Yin H., Xu X. Characteristics of radar targets. Beijing: Press of Electronic Industry, 2005. – P. 157–162. – In Chinese.
- 9. Knott E., Schaeffer J. Radar cross section. New York: Artech House, 1985. 510 p.
- 10. Гейстер С.Р., Нгуен Т.Т. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу

апертуры // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 74–87. – DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-74-87.

- 11. Островитянов Р., Басалов Ф. Статистическая теория радиолокации проятженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 229 с.
- Плотницкая Е. Модель рассеянного винтами вертолета радиолокационного сигнала // Наука настоящего и будущего: VIII Научно-практическая конференция с международным участием для студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб., 2020. – Т. 2. – С. 29–32.
- Колтышев Е.Е., Соловьев А.Н., Янковский В.Т. Алгоритм измерения дальности до вертолета в когерентно-импульсных бортовых РЛС // Радиотехника. – 2012. – № 1. – С. 91–94.
- 14. Степанов М. Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлекетроники. Серия: Общетехническая. – 2015. – № 5. – С. 57–67.

TWO-POINT MODEL OF ROTATING BLADES

Zhitnik S.V., Stepanov M.A.

Novosibirsk State Technical University

In this paper, the angular noises of the rotating blades of a radar object are considered. A multipoint geometric model of rotating blades of a single propeller is considered. On its basis, analytical expressions are obtained that make it possible to calculate the angular coordinates of the apparent center of radiation of a propeller with rotating blades. Also, on the basis of a multi-point geometric model, relations were obtained that make it possible to synthesize a two-point geometric model of rotating propeller blades. Theoretical results are confirmed by mathematical modeling for two configurations of a single-rotor small-sized aircraft: with one rotating blade and with two rotating blades.

Keywords: angular noise, multipoint model, two-point model, blade, echo signal, apparent radiation center.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-31-41

REFERENCES

- 1. Sayama H. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. Open SUNY Textbooks, 2015. 496 p.
- 2. Dunn J.H., Howard D.D. Phenomena of scintillation noise in radar tracking systems. *Proceedings of IRE*, 1959, vol. 47, pp. 855–863.
- 3. Gubonin N.S. Fluctuations of the phase front of a wave reflected from a complex target. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1965, vol. 10 (5), pp. 718–725.
- 4. Delano R.H. A theory of target glint or angular scintillation in radar tracking. *Proceedings of IRE*, 1953, vol. 41, pp. 1778–1784.
- 5. Dunn J.H., Howard D.D. Radar target amplitude, angle, and Doppler scintillation from analysis of the echo signal propagating in space. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1968, vol. 16 (9), pp. 715–728. DOI: 10.1109/TMTT.1968.1126776.
- Point G., Degurse J.-F., Savy L., Montécot M., Milin J.-L. Modelling the radar signature of rotorcraft. *IET Radar, Sonar Navigation*, 2021, vol. 15 (8), pp. 867–883. DOI: 10.1049/rsn2.12062.
- 7. Stepanov M., Kiselev A. *Modelirovanie uglovykh shumov radiolokatsionnykh ob"ektov* [Modeling of angular noise of radar objects]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2020. 246 p.
- 8. Huang P., Yin H., Xu X. *Characteristics of radar targets*. Beijing, Press of Electronic Industry, 2005, pp. 157–162. (In Chinese).
- 9. Knott E., Schaeffer J. Radar cross section. New York, Artech House, 1985. 510 p.
- 10. Heister S.R., Nguyen T.T. Mathematical models of the radar signal reflected from a helicopter main rotor in application to inverse synthesis of antenna aperture. *Izvestiya*

vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 74–87. DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-74-87.

- 11. Ostrovityanov R., Basalov F. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii proyatzhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 229 p.
- Plotnitskaya E. [Model of a radar signal scattered by propellers of a helicopter]. *Nauka* nastoyashchego i budushchego. T. 2 [Science: Present and Future. Vol. 2]. VIII Scientific and Practical Conference with International Participation for Students, Postgraduates and Young Scientists. St. Petersburg, 2020, pp. 29–32. (In Russian).
- Koltyshev E.E., Soloviev A.N., Jankovskij V.T. Algoritm izmereniya dal'nosti do vertoleta v kogerentno-impul'snykh bortovykh RLS [Algorithm of measurement of range to the helicopter in the coherently-pulse onboard radar]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2012, no. 1, pp. 91–94.
- Stepanov M. Tochnost' pozitsionirovaniya kazhushchegosya tsentra izlucheniya v kogerentnom trekhtochechnom matrichnom imitatore [Positioning accuracy of the apparent center of radiation in the coherent three-point matrix simulator]. Voprosy radioeleketroniki. Seriya: Obshchetekhnicheskaya = Questions of radio electronics. General technical series, 2015, no. 5, pp. 57–67.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Житник Сергей Владимирович – аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано пять научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: serega0207@mail.ru).

Zhitnik Sergey Vladimirovich a post-graduate student at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, His research interests are focused on radio engineering. He has published 5 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: serega0207@mail.ru).



Степанов Максим Андреевич – д-р техн. наук, зав. кафедрой РПиРПУ в Новосибирском государственном техническом университете. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich, D.Sc. (Eng.), associate professor, Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. Research interests: radio engineering. More than 80 scientific papers published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail m.stepanov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 01 июня 2022 г. Received June 01, 2022

To Reference:

Zhitnik S.V., Stepanov M.A. Dvukhtochechnaya model' vrashchayushchikhsya lopastei [Twopoint model of rotating blades]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 31–41. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-31-41.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

июль-сентябрь

№ 3 (56)

УДК 535.8

2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ФОТОННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВНЕОСЕВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А.Г. Паулиш^{1,2,3}, О.В. Минин⁴, И.В. Минин⁴

¹Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «КТИПМ»,

²Новосибирский государственный технический университет ³Новосибирский государственный университет ⁴Сибирский государственный университет геосистем и технологий

В статье приводятся результаты экспериментальной проверки концепции ранее предложенного полностью оптического селективного по длине волны многоканального коммутатора на основе внеосевой зонной пластины Френеля в миллиметровом диапазоне длин волн без применения микромеханических устройств или нелинейных материалов. Рассмотрен лабораторный прототип такого устройства и обсуждаются его основные параметры. На основе проведенных экспериментов показано, что оптическая изоляция коммутируемых каналов для переключателя на базе внеосевой зонной пластины может достигать 15 дБ при разности частот 25 ГГц в диапазоне частот 93 – 136 ГГц.

Ключевые слова: оптический коммутатор, фотонный крючок, внеосевая зонная пластина Френеля.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-42-50

Введение

Оптические переключатели используются в современных сетевых оптических коммуникациях [1], в частности для разделения оптических сигналов с разной частотой, распространяющихся по единому оптическому каналу. В работе [2] нами была предложена новая концепция селективного по длине волны полностью оптического переключателя на основе новых структурированных пространственно-локализованных световых пучков типа «фотонный крючок» [3, 4], относящаяся к классу селективных по длине волны переключателей [5, 6]. Особенностью этой концепции является возможность реализации немеханического и полностью оптического пространственного переключателя, который изменяет направление выходного света без использования нелинейных материалов [2].

В настоящем сообщении мы приводим результаты экспериментальной проверки концепции указанного выше переключателя оптического типа в миллиметровом (MM) диапазоне длин волн.

1. Схема эксперимента

Для реализации функции оптического переключателя зависимость угла искривления сфокусированного излучения от длины волны облучения обеспечивается дифракционным элементом в виде зонной пластины. Поэтому при определенной пространственной конфигурации такой структуры и зон приема можно

© 2022 А.Г. Паулиш, О.В. Минин, И.В. Минин

добиться изменения уровня оптического сигнала в каждом из каналов при изменении длины волны излучения. В данном случае пространственный наклон области ближнепольной фокусировки обеспечивался использованием зонной пластины Френеля, область фокусировки которой находится вне оптической оси системы. Схема экспериментальной установки, ее основных составных частей и принцип работы показаны на рис. 1, 2. ММ излучение, генерируемое источником (1), проходит волновод (2) и с помощью антенные Кассегрена (3) формируется квазиплоская волна (5) диаметром ~100 мм, падающая на фазовую пластину (6). Расстояние от антенны Кассегрена до фазовой пластины *d* много больше рабочей апертуры антенны D = 100 мм, т.е. реализуются условия дальнего поля. После $\Phi\Pi$ излучение (7) фокусируется в плоскости ZX, расположенной вне оптической оси падающего излучения (5). В зависимости от частоты излучения положение фокусировки пучка сдвигается вдоль оси Z в плоскости ZX. Для измерения пространственного распределения интенсивности излучения в плоскости ZX фотоприемник (8, 9, 10) размещался в центре двухкоординатного стола с электромеханическими приводами, управляемыми от компьютера. Сканирование области фокусировки излучения фотоприемником осуществлялось по области размером 100×100 мм с шагом 0,5 мм.



Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:

I – ММ излучатель; 2 – волновод; 3 – антенна Кассегрена; 4 – плата управления; 5 – падающий квазипараллельный пучок ММ излучения; 6 – внеосевая фазовая пластина Френеля; 7 – пучок после фазовой пластины; 8–10 – положения фотодетектора при различных длинах волн излучения

Fig. 1 – Experimental setup scheme:

I – MM emitter; 2 – waveguide; 3 – Cassegrain antenna; 4 – control unit; 5 – incident quasi-parallel MM radiation beam; 6 – Fresnel off-axis phase plate; 7 – the beam after the phase plate; 8–10 – photodetector positions at different radiation wavelengths

В качестве источника излучения (рис. 2, *a*) использовались излучающие модули ММ диапазона (производства АО «НИИПП», г. Томск) монолитной конструкции на основе диодов Ганна с рабочими частотами 93, 118 и 136 ГГц (диапазон перестройки ±0,75 ГГц) и выходной мощностью 3,1 и 0,2 мВт соответственно. ММ модули снабжены волноводом, оканчивающимся антенной Кассегрена с рабочей апертурой D = 100 мм. Антенна обеспечивала квазиплоский волновой фронт с расходимостью пучка излучения менее одного градуса.



Рис. 2 – Внешний вид источника излучения (*a*), состоящего из ММ излучателя (*1*), волновода (*2*), антенны Кассегрена (*3*) и платы управления (*4*); внешний вид пироэлектрического фотоприёмника ММ диапазона (*б*); внешний вид фазовой пластины Френеля (*в*)

Fig. 2 – Overview of the radiation source (*a*), consisting of an MM emitter (1), waveguide (2), Cassegrain antenna (3) and a control unit (4); pyroelectric photodetector (δ); off-axis Fresnel (e)

В качестве детектора ММ излучения использовался пироэлектрический фотоприемник на основе тетрааминодифенила с расширенным диапазоном спектральной чувствительности (0,4–3000 мкм) производства НПО «ВОСТОК», г. Новосибирск, внешний вид которого показан на рис. 2, б. Фотоприемник имеет входное окно из полиэтилентерефталата (лавсан) диаметром 5 мм и фоточувствительную площадку размером 1×1 мм². Характеристики использованного пироэлектрического фотоприемника подробно исследованы в работах [7, 8]. Для получения максимального сигнала с пироприемника осуществлялось модулирование излучения с частотой около 100 Гц при помощи механического обтюратора.

В качестве оптического элемента переключателя была использована асимметричная фотонная структура в виде внеосевой бинарной фазовой пластины (ФП) Френеля [9, 10], представленная на рис. 2, в. ФП диаметром 120 мм изготавливалась методом 3D печати [11] на принтере Cheap3d V300 с областью печати $300 \times 300 \times 300$ мм, точностью 50 мкм. Применяемый материал – ABS пластик REC пруток диаметром 1,75 мм. Коэффициент преломления материала по литературным данным составлял $n \approx 1,59$ [12] и мог корректироваться выбором плотности 3D печати [13]. Заметим, что при таких геометрических параметрах мезоразмерной ФП параметр размера Ми структуры составлял величину $q = \pi D/\lambda = 31\pi$ (D – диаметр ФП), что соответствует условию существования эффекта фотонной струи [14] на границе с пределом геометрической оптики.

2. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 показано двумерное распределение интенсивности плоской волны при дифракции на ФП излучения с частотами 93 (1), 118 (2) и 136 (3) ГГц. Рисунок является синтезом пространственных распределений интенсивности ММ излучения, полученных для каждой частоты в отдельности. Из рисунка видно, что при распространении сфокусированного ФП излучения, вследствие дифракции, пространственный размер области фокусировки, как и ожидалось, меняется, что следует из рис. 3, 4 и таблицы. Также при изменении длины волны излучения область локализации излучения (внеосевого фокуса [9, 10]) изменяет свое пространственное положение. Размещение оптических приемников вдоль оси Z при X = 0 обеспечивает различную амплитуду поля в каждом из каналов при работе на различной частоте, т. е. их пространственную коммутацию по уровню оптического сигнала. Очевидно, что надежность срабатывания такого переключателя будет определяться величиной оптической развязки каналов, которая, в свою очередь, зависит от параметров переключающей ФП и диапазона длин волн облучения. Разность сигналов на соседних приемниках излучения $dS = S_1 - S_2$ служит мерой оптической изоляции (развязки) каналов коммутации. Отметим, что для улучшения оптической развязки переключаемых каналов мы выбрали фотоприемник с входной апертурой заметно меньше размера поперечного сечения области локализации излучения (рис. 4).

Рис. 3 – Распределение интенсивности сигнала в плоскости ZX для частот 93 (1), 118 (2) и 136 (3) ГГц соответственно. Координаты по X и Z нормированы на длину волны излучения. Квадратами показан размер фоточувствительной площадки пироприемника в масштабе рисунка

Fig. 3 – Signal intensity distribution in the *ZX* plane for frequencies 93 (1), 118 (2) and 136 (3) GHz, respectively. The *X* and *Z* coordinates are normalized to the radiation wavelength. The squares show the photosensitive area size of the pyrodetector on the figure scale



На рис. 4 показано распределение интенсивности преломленного излучения вдоль оси Z при координате X = 0 для разных частот излучения. Интенсивность излучения нормирована на максимум, полученный для каждой частоты в отдельности. Значение координаты по Z нормировано на длину волны излучения. На вставке квадратом показан размер фоточувствительной площадки пироэлектрического фотоприемника в соответствующих координатах. В табл. 1 приведены результаты обработки полученных зависимостей. Из рис. 4 видно, что сигнал с соседней частотой 118 ГГц на координате максимума сигнала, соответствующего частоте 93 ГГц, более чем в 15 раз меньше, чем сигнал с частотой 93 ГГц. То есть измеренное взаимное влияние сигналов на соседних частотах составило менее 15 дБ.



Рис. 4 – Зависимости интенсивности сигналов вдоль оптической оси Z, показанной на рис. З светлой сплошной линией, для частот 93, 118 и 136 ГГц. Интенсивности нормированы на максимум, полученный для каждой частоты отдельно. Координата по Z нормирована на длину волны излучения. На выноске в масштабе показан размер фоточувствительной площадки пироприемника для сравнения

Fig. 4 – Signal intensity dependences along the optical Z axis, shown in fig. 3 by a light solid line, for frequencies of 93, 118 and 136 GHz. The intensities are normalized to the maximum for each frequency. The Z coordinate is normalized to the radiation wavelength. The size of the pyrodetector photosensitive area is shown in inset for comparison

Ширина распределения интенсивности поля вдоль оси Z на полувысоте The full width at half height for field intensity distribution along the Z axis

Постото		Положение мак-	Ширина	Относительная шири-
	длина волны,	симума Z / λ ,	на полувысоте	на на полувысоте
пц	MM	отн. ед.	$\Delta Z / \lambda$, отн. ед.	$\Delta Z / Z, \%$
93	3,23	26,9	2,29	8,5
118	2,54	31,8	1,86	5,8
136	2,21	37,1	1,56	4,2

Как видно, оптическая изоляция dS может достигать более 15 дБ, что при условии фактически мгновенной скорости срабатывания переключателя (например, для фотоприемников на основе диодов Шоттки ZBD-F производства Virginia Diodes время «реакции» составляет ~ $3 \cdot 10^{-11}$ с [15]) является хорошим показателем. При этом спектральный диапазон, в котором реализуется переключение состояний, в данном случае составляет около 43 ГГц или примерно 38 % от средней длины волны.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность создания многоканального (в данном случае трехканального) коммутатора оптического типа на основе диэлектрической мезоразмерной структуры с нарушенной симметрией геометрической формы, выполненной в виде внеосевой ФП Френеля. Благодаря уникальному свойству такой структуры изменять пространственное положение дифракционно ограниченной области фокусировки в зависимости от длины волны облучения, данный переключатель является хорошим кандидатом для реализации электронной оптической коммутации в современной оптоэлектронике, не требующего управлением электрическим сигналом. Заметим, что проведение «полномасштабной» оптимизации характеристик оптического переключателя в данной работе не предполагалось, а экспериментально демонстрировалась лишь соответствующая концепция. Более того, учитывая масштабируемость уравнений Максвелла, результаты данной работы могут быть перенесены в другие диапазоны электромагнитного излучения, в частности оптический или ИК.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. El-Bawab T.S. Optical switching. Boston, MA: Springer, 2006. 474 p.
- Geints Yu.E., Minin O.V., Minin I.V. Concept of a miniature photonic spatial swith based on off-axis zone // Quantum Electronics. - 2021. - Vol. 51 (8). - P. 727-729. -DOI: 10.1070/QEL17600.
- Dholakia K., Bruce G.D. Optical hooks // Nature Photonics. 2019. Vol. 13. P. 229– 230.
- 4. Christodoulides D.N. Foreword // Minin O.V., Minin I.V. The Photonic Hook. Cham: Springer, 2021. P. vii–viii. DOI: 10.1007/978-3-030-66945-4.
- Silicon photonic wavelength Cross-connect with Integrated MEMS switching / T.J. Seok, J. Luo, Z. Huang, K. Kwon, J. Henriksson, J. Jacobs, L. Ochikubo, R.S. Muller, M.C. Wu // APL Photonics. – 2019. – Vol. 4 (10). – P. 100803. – DOI: 10.1063/1.5120063.
- Wavelength-selective 2×2 optical switch based on a Ge₂Sb₂Te₅-assisted microring / C. Zhang, M. Zhang, Y. Xie, Y. Shi, R. Kumar, R. Panepucci, D. Dai // Photonics Research. - 2020. - Vol. 8 (7). - P. 1171-1176.
- Characterization of tetraaminediphenyl-based pyroelectric detector from visible to millimeter wave ranges / A.G. Paulish, A.V. Gusachenko, A.O. Morozov, K.V. Dorozhkin, V.I. Suslyaev, V.A. Golyashov, O.V. Minin, I.V. Minin // Optical Engineering. – 2020. – Vol. 59 (6). – P. 061612.
- Sensitivity of the tetraaminodiphenyl based pyroelectric sensor from visible to sub-THz range / A.G. Paulish, A.V. Gusachenko, A.O. Morozov, V.A. Golyashov, K.V. Dorozhkin, V.I. Suslyaev // Sensor Review. – 2020. – Vol. 40 (3). – P. 291–296.
- Guo Y.J., Barton S.K. Offset Fresnel zone plate antennas // International Journal of Satellite Communications. – 1994. – Vol. 12 (4). – P. 381–385.
- Minin I.V., Minin O.V., Golodnikov D.O. Simple free-space method for measurement of dielectric constant by means of diffractive optics with new capabilities // 2006 8th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. – Novosibirsk, Russia, 2006. – P. 13–18. – DOI: 10.1109/APEIE.2006.4292375.
- Monkevich J.M., Le Sage G.P. Design and fabrication of a custom-dielectric Fresnel multizone plate lens antenna using additive manufacturing techniques // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 61452–61460. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916077.
- 3D printed diffractive terahertz lenses / W.D. Furlan, V. Ferrando, J.A. Monsoriu, P. Zagrajek, E. Czerwińska, M. Szustakowski // Optics Letter. – 2016. – Vol. 41 (8). – P. 1748–1751. – DOI: 10.1364/OL.41.001748.
- Poyanco J.M., Pizarro F., Rajo-Iglesias E. Cost-effective wideband dielectric planar lens antenna for millimeter wave applications // Science Reports. – 2022. – Vol. 12. – P. 4204. – DOI: 10.1038/s41598-022-07911-z.
- Minin I.V., Minin O.V., Geints Y.E. Localized EM and photon jets from non-spherical and non-symmetric dielectric mesoscale objects: Brief review // Annalen der Physik. – Berlin, 2015. – Vol. 527 (7–8). – P. 491–497. – DOI: 10.1002/andp.201500132.
- 15. Fast Detectors (ZBD-F). URL: https://vadiodes.com/en/zbd (accessed: 13.09.2022).

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE CONCEPT OF THE PHOTON SPATIAL SWITCH BASED ON OFF-AXIS ZONE PLATE IN THE MILLIMETER RANGE

Paulish A.G.^{1,2,3}, Minin O.V.⁴, Minin I.V.²

¹Novosibirsk Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics "TDIAM", Novosibirsk, Russia ²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia ³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia ⁴State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

The results of an experimental verification of the concept of the previously proposed all-optical wavelength-selective multichannel switch based on an off-axis Fresnel zone plate in the millimeter wavelength range without the use of micromechanical devices or non-linear materials are presented. A laboratory prototype of such a device is considered and its main parameters are discussed. It is shown that the optical isolation of switched channels for a switch based on an off-axis zone plate can reach 15 dB at a frequency difference of 25 GHz in the frequency range of 93–136 GHz.

Keywords: optical switch, photon hook, Fresnel zone plate.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-42-50

REFERENCES

- 1. El-Bawab T.S. Optical Switching. Boston, MA, Springer, 2006. 474 p.
- Geints Yu.E., Minin O.V., Minin I.V. Concept of a miniature photonic spatial swith based on off-axis zone. *Quantum Electronics*, 2021, vol. 51 (8), pp. 727–729. DOI: 10.1070/QEL17600.
- 3. Dholakia K., Bruce G.D. Optical hooks. Nature Photonics, 2019, vol. 13, pp. 229-230.
- 4. Christodoulides D.N. Foreword. Minin O.V., Minin I.V. *The Photonic Hook*. Cham, Springer, 2021, pp. vii–viii. DOI: 10.1007/978-3-030-66945-4.
- Seok T.J., Luo J., Huang Z., Kwon K., Henriksson J., Jacobs J., Ochikubo L., Muller R.S., Wu M.C. Silicon photonic wavelength cross-connect with Integrated MEMS Switching. *APL Photonics*, 2019, vol. 4 (10), p. 100803. DOI: 10.1063/1.5120063.
- Zhang C., Zhang M., Xie Y., Shi Y., Kumar R., Panepucci R., Dai D. Wavelength-selective 2 × 2 optical switch based on a Ge₂Sb₂Te₅-assisted microring. *Photonics Research*, 2020, vol. 8 (7), pp. 1171–1176.
- Paulish A.G., Gusachenko A.V., Morozov A.O., Dorozhkin K.V., Suslyaev V.I., Golyashov V.A., Minin O.V., Minin I.V. Characterization of tetraaminediphenyl-based pyroelectric detector from visible to millimeter wave ranges. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59 (6), p. 061612.
- Paulish A.G., Gusachenko A.V., Morozov A.O., Golyashov V.A., Dorozhkin K.V., Suslyaev V.I. Sensitivity of the tetraaminodiphenyl based pyroelectric sensor from visible to sub-THz range. *Sensor Review*, 2020, vol. 40 (3), pp. 291–296.
- 9. Guo Y.J., Barton S.K. Offset Fresnel zone plate antennas. *International Journal of Satellite Communications*, 1994, vol. 12 (4), pp. 381–385.
- Minin I.V., Minin O.V., Golodnikov D.O. Simple free-space method for measurement of dielectric constant by means of diffractive optics with new capabilities. 2006 8th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, Novosibirsk, Russia, 2006, pp. 13–18. DOI: 10.1109/APEIE.2006.4292375.
- 11. Monkevich J.M., Le Sage G.P. Design and fabrication of a custom-dielectric Fresnel multizone plate lens antenna using additive manufacturing techniques. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 61452–61460. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916077.
- Furlan W.D., Ferrando V., Monsoriu J.A., Zagrajek P., Czerwińska E., Szustakowski M. 3D printed diffractive terahertz lenses. *Optics Letter*, 2016, vol. 41 (8), pp. 1748–1751. DOI: 10.1364/OL.41.001748.

- Poyanco J.M., Pizarro F., Rajo-Iglesias E. Cost-effective wideband dielectric planar lens antenna for millimeter wave applications. *Science Reports*, 2022, vol. 12, p. 4204. DOI: 10.1038/s41598-022-07911-z.
- Minin I.V., Minin O.V., Geints Y.E. Localized EM and photon jets from non-spherical and non-symmetric dielectric mesoscale objects: Brief review. *Annalen der Physik*, Berlin, 2015, vol. 527 (7–8), pp. 491–497. DOI: 10.1002/andp.201500132.
- 15. Fast Detectors (ZBD-F). Available at: https://vadiodes.com/en/zbd (13.09.2022).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Паулиш Андрей Георгиевич – родился в 1963 году, в 1985 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «физик», работает ученым секретарем Филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ», д-р техн. наук, доцент. Автор и соавтор более 150 научных трудов (в том числе двух монографий, изданных за рубежом), более 20 изобретений и патентов РФ и международных патентов. Область научных интересов: физика полупроводников, спектроскопия, оптико-электронные системы и приборы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Е-mail: paulish63@ngs.ru).

Paulish Andrey Georgievich (b. 1963), graduated from Novosibirsk State University with a degree of "Physicist" in 1985, Currently working at the Novosibirsk Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SBRAS, "Technology and Design Institute of Applied Microelectronics" as Scientific Secretary, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Author and co-author of over 150 scientific papers (including 2 monographs published abroad), over 20 inventions and patents of the Russian Federation and international patents. Research interests: semiconductor physics, spectroscopy, optoelectronics systems and devices. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: paulish63@ngs.ru).

Минин Олег Владиленович – родился в 1960 году, в 1982 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «физик», работает главным научным сотрудником в Сибирском государственном университете геосистем и технологий, доктор технических наук, чл.-корр. Метрологической академии России. Автор и соавтор более 300 научных трудов (в том числе 10 монографий, включая изданные за рубежом), более 100 изобретений и патентов РФ. Область научных интересов: компьютерная оптика, нано- и мезоразмернаяфотоника, оптика ближнего поля. (Адрес: 630010, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10. Е-mail: oleg.minin@ngs.ru).

Minin Oleg Vladilenovich (b. 1960), graduated from Novosibirsk State University with a degree of "Physicist" in 1982, works as a Chief Researcher at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member. Metrological Academy of Russia. Author and co-author of over 300 scientific papers (including 10 monographs, including those published abroad), over 100 inventions and patents of the Russian Federation. Research interests: computer optics, nano- and mesoscale photonics, near-field optics. (Address: 10, Plahotnogo St., Novosibirsk, 630010, Russia. E-mail: oleg.minin@ngs.ru).

Минин Игорь Владиленович, 1960 года рождения, в 1982 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физик», работает главным научным сотрудником в Сибирском государственном университете геосистем и технологий, доктор технических наук, чл.корр. Метрологической академии России. Автор и соавтор более 300 научных трудов (в том числе 10 монографий, включая изданные за рубежом), более 100 изобретений и патентов РФ. Область научных интересов: компьютерная оптика, нано- и мезоразмерная фотоника, оптика ближнего поля. (Адрес: 630010, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10. E-mail: prof.minin@gmail.com). **Minin Igor Vladilenovich** (b. 1960), graduated from Novosibirsk State University with a degree of "Physicist" in 1982, works as a Chief Researcher at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member. Metrological Academy of Russia. Author and co-author of over 300 scientific papers (including 10 monographs, including those published abroad), over 100 inventions and patents of the Russian Federation. Research interests: computer optics, nano- and mesoscale photonics, near-field optics. (Address: 10, Plahotnogo St., Novosibirsk, 630010, Russia. E-mail: prof.minin@gmail.com).

Статья поступила 12 августа 2022 г. Received August 12, 2022

To Reference:

Paulish A.G., Minin O.V., Minin I.V. Eksperimental'noe podtverzhdenie kontseptsii fotonnogo prostranstvenno-go pereklyuchatelya na osnove vneosevoi zonnoi plastiny v millimetrovom diapazone [Experimental confirmation of the concept of the photon spatial switch based on off-axis zone plate in the millimeter range]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 42–50. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-42-50.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 3 (56) июль-сентябрь 2022

Выпускающий редактор И.П. Брованова Корректор И.Е. Семенова Компьютерная верстка Н.В. Гаврилова

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 26.09.2022. Выход в свет 29.09.2022. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16 Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 4,55. Печ. л. 3,25. Изд. № 162. Заказ № 252. Цена свободная

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати 82961