МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ» (СГУГиТ)

# ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

# XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

# «СИБОПТИКА-2018»

T. 1

Сборник материалов

Новосибирск СГУГиТ 2018 Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГУГиТ, Новосибирск *А. В. Шабурова* Кандидат технических наук, директор КТИ НП СО РАН, Новосибирск *П. С. Завьялов* Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией лазерных информационных систем ИЛФ СО РАН, Новосибирск *Б. В. Поллер* Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель КТИ НП СО РАН, Новосибирск *Ю. В. Чугуй* Доктор технических наук, зав. лабораторией КТИ НП СО РАН, Новосибирск *И. Г. Пальчикова* 

Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск В. В. Кузнецов

Кандидат технических наук, директор ФГУП «СНИИМ», Новосибирск *Г. В. Шувалов* 

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики СГУГиТ, Новосибирск Ю. Ц. Батомункуев

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 262 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «СибОптика-2018».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

© СГУГиТ, 2018

Сборник включен в систему РИНЦ.

# АДАПТИВНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

### Владимир Николаевич Легкий

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, зав. кафедрой автономных информационных и управляющих систем, тел. (383)346-26-23, e-mail: legkij@corp.nstu.ru

#### Степан Александрович Буднов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант кафедры оптических информационных технологий, тел. (383)346-23-12, e-mail: stepan\_budnov@mail.ru

# Олег Валерьевич Санков

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, ст. преподаватель кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (383)346-26-23, e-mail: sankov@corp.nstu.ru

#### Ирина Валентиновна Борисова

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (383)346-26-23, e-mail: i.v.borisova@corp.nstu.ru

#### Валерий Григорьевич Эдвабник

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор экономических наук, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (383)346-26-23, e-mail: edvabnik@corp.nstu.ru; АО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, доктор экономических наук, заместитель генерального директора по развитию, тел. (383)216-05-52, e-mail: niiep@oaoniiep.ru

Рассматриваются адаптивные бортовые оптоэлектронные трехканальные измерители расстояния для ориентации летательных аппаратов при работе в реальной замутненной атмосфере, в сложной обстановке (гористая местность, лесные массивы, городская высотная застройка) и при горизонтальной посадке. Автоматическая перестройка параметров лазерных датчиков и феррозондовых сенсоров обеспечивает достоверное измерение расстояния до препятствий в нижней полусфере и в боковой области пространства.

Ключевые слова: бортовые оптоэлектронные измерители, лазерный датчик, автоматическая перестройка параметров, феррозондовый сенсор, достоверное измерение расстояния.

# ADAPTIVE OPTOELECTRONIC DEVICES FOR AIRCRAFT

#### Vladimir N. Legkiy

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Head of Department of Autonomous Information and Control Systems, phone: (383)346-26-23, e-mail: legkij@corp.nstu.ru

#### Stepan A. Budnov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, Department of Optical Information Technologies, phone: (383)346-23-12, e-mail: stepan\_budnov@mail.ru

#### Oleg V. Sankov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior lecturer, Department of Autonomous Information and Control Systems, phone: (383)346-26-23, e-mail: sankov@corp.nstu.ru

#### Irina V. Borisova

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Senior Lecturer, Department of Autonomous Information and Control Systems, phone: (383)346-26-23, e-mail: i.v.borisova@corp.nstu.ru

#### Valeriy G. Edvabnik

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Dr. Sc., Professor, Department of Autonomous Information and Control Systems, phone: (383)346-26-23, e-mail: edvabnik@corp.nstu.ru; Research Institute of Electronic Devices Co J-st, 53, Pysareva St., Novosibirsk, 630005, Russia, D. Sc., Deputy Director General for Development, phone: (383)216-05-52, e-mail: niiep@oaoniiep.ru

The three-channel range adaptive optoelectronic vehicle-borne finders for the unmanned aerial vehicles (UAV) orientation at functioning in hazy atmosphere and complex terrains (mountainous terrains, forest tracts, urban high buildings), and during landing are considering. Laser sensors performance automatic variation allows the reliable object distance measurement in a bottom semisphere and side areas.

**Key words:** three-channel range optoelectronic vehicle-borne finders, automatic parameters retuning, laser sensor, flux-gate magnetometer, distance reliable determination.

Разработанная информационная система обзора для летательных аппаратов (носители бортовой аппаратуры) [1-8] включает в себя три лазерных импульсных дальномерных датчиков (рис. 1, размер 25х50х50 мм), феррозондовый сенсор магнитных (металлосодержащих) объектов [9, 10] и блок процессорной обработки и передачи данных. Предложена конструкция отсека (рис. 2), с комплексированными датчиками и процессорной платформой управления при опасном сближении с препятствием. Габаритно-весовые требования к аппаратуре носителя определяют конструкцию лазерных импульсных дальномерных датчиков.

Достоверность измерения расстояния до заданных объектов или до преград, угрожающих носителю столкновением, определяется, во-первых - помехоустойчивостью лазерных дальномерных датчиков, когда дым, осадки, облачность не смогут сформировать помеховый сигнал, подобный отраженному от поверхности импульсу. Помехоустойчивость лазерных дальномерных датчиков требует высокой пространственной разрешающей способности. На наносекундный дальномерный датчик от аэрозольных помех поступает рассеянный «назад» сигнал с амплитудой импульса в 5-10 раз ниже, чем при зондирующих импульсах длительностью 50-100 нс в современных датчиках [2, 4].



Рис. 1. Лазерный дальномерный датчик с длительностью импульса 2 нс



Рис. 2. Конструкция системы с комплексированными датчиками

Второй принцип разработки – адаптация лазерных дальномерных датчиков к случайным свойствам лоцируемых объектов и реальной замутненной атмосферы (дым, осадки, облачность). В результате обеспечиваются максимальная дальность действия измерительной системы с минимальной вероятностью нарушения работоспособности.

Предлагается для плавной посадки носителя и маневрирования между препятствиями измерять текущее расстояние до поверхности в пределах 1-40 м с точностью около 0,1 м. При этом оптимальным является импульсный метод измерения малых расстояний (по задержке принятого импульса относительно излученного) на интервале расстояния R = 1-40 м (наиболее сложный случай для бортовых локационных систем) при излучении сигналов малой длительности ( $\tau_{\mu} = 1-30$  нс).

Схемотехнические решения по созданию наносекундных дальномерных систем с использованием полупроводниковых лазеров описаны в работах [1-5].

Для минимизации вероятности ложных измерений по пассивным помехам и для увеличения дальности действия в замутненной среде вводится автоматическая адаптация к случайным условиям применения (дальность, отражательные свойства поверхности, скорость, прозрачность атмосферы). При смене интервалов расстояния в процессе полета в условиях помех производится согласованное управление основными параметрами лазерного излучателя, фотоприемного устройства (ФПУ), цифрового модуля стробирования и селекции полезных сигналов [3].

Информация о принятых помеховом и полезном сигналах (рис. 3) после процессорной обработки является исходной для адаптации датчиков на следующем цикле зондирования пространства – уже с другими параметрами излучателя и ФПУ.



Рис.3. Форма принятых помехового (1) и полезного (2) сигналов от объекта в аэрозольном облаке: интервал 0-30 нс, коэффициент рассеяния =  $0,4 \text{ m}^{-1}$ ,

расстояние от датчика до отражающей поверхности ( $\rho$ =0,1) 4м

Адаптивно регулируются следующие параметры датчиков:

- мощность и длительность излучаемых импульсов (при необходимости – и частота повторения);

- полоса пропускания, коэффициент передачи ФПУ;

- пороговый уровень, алгоритм цифровой обработки (анализ формы и длительности принимаемых сигналов, многопозиционное стробирование, работа по последнему импульсу в пределах дистанции).

При расстоянии до поверхности единицы метров для точности измерения излучаются короткие импульсы (наносекунды), амплитуда принимаемого сигнала значительно превышает уровень шума и можно применять широкополосные ФПУ. При большем расстоянии до поверхности (десятки метров) излучаются импульсы длительностью десятки наносекунд. Сужается полоса пропускания ФПУ, снижается уровень шума, увеличивается усиление, обеспечивается дальность действия датчика при приемлемой точности.

При создании адаптивных датчиков с широким интервалом  $R_{min} - R_{max}$  предлагается задать вектор-варианты для нескольких (например, шести) ступеней (уровней) адаптации по дальности действия и точности, (Табл. 1). Так же вектор-варианты параметров могут быть приняты для разработки унифицированных приемо-передающих модулей, предназначенных для измерений в относительно узких интервалах дальностей, например: R= 3-6 м, R= 6-12 м, R=12-20 м и т. д. Параметры унифицированных модулей на основе полупроводниковых

лазеров определяются требованиями защищенности от пассивных помех, вероятности пропуска цели в помехах даны в (Табл. 2) [3].

Для погрешности измерения  $\Delta R < 0,2R$  берется фронт излучаемого импульса  $\tau_{\phi p} = 2 \frac{\Delta R}{c}$ . Для гауссова импульса  $\tau_{\phi p} = \tau_u$ , с – скорость света.

#### Таблица 1

Вектор-варианты для шести уровней адаптации по дальности и точности

	Интервал	Погреш-	Импульсная	Длитель-	Полоса	$U_{ ext{III}\Sigma}$	Сопротив-	V
	высоты	ность,	мощность	ность	пропуска-	на входе	ление	преобр ФП
	среднее зна-	$\Delta R/R$ ,	излучателя,	импульса,	ния ФПУ,	усилите-	нагрузки	$\Psi^{\Pi}$ , $B/B_{T}$
	чение <i>R<sub>i</sub></i> ), м	%	Вт	нс	ΜΓц	ля, мкВ	ФП R <sub>э</sub> , кОм	D/DI
B1	3-6(4)	15-20	25	3	100	12	2	1200
B2	6-12 (8)	15-20	40	5	80	16	3	1800
B3	12-20(16)	10-15	60	10	60	38	10	6000
B4	20-26(25)	10-15	80	20	20	80	30	18000
B5	26-32(32)	8-10	100	40	10	114	60	36000
B6	32-40(36)	8-10	150	50	8	130	60	36000

# Таблица 2

Вероятность пропуска объекта в помехах

	Мощность сигнала <i>Р</i> <sub>вх</sub> на входе ФПУ, мкВт	Амплитуда сигнала U <sub>c</sub> , на входе усилителя, мВ	Напряже- ние шума U <sub>шΣ</sub> , мкВ	Отно- шение сигнал/ шум	Отно- шение сигнал/ порог	Предельный коэффициент о <sub>предОСЛ,</sub> 1/м	Предельный коэффициент о <sub>предЛТ,</sub> 1/м
B1	9,3-2,3	11,2-2,8	27,7	400-100	40,0-10,0	0,617-0,192	0,45
B2	2,1	3,75	25,6	146,5	14,65	0,168	0,3
B3	0,78	4,68	39,3	119,1	11,91	0,0774	~0,2
B4	0,43	7,71	80,0	96,4	9,64	0,045	~0,1
B5	0,33	11,76	114,0	103,2	10,32	0,0365	~0,05
B6	0,39	13,93	100,0	139,3	13,93	0,0366	≤0,05

Достаточная импульсная мощность излучения  $P_{\rm изл}$  определяется расстоянием, с учетом параметров генератора накачки: с увеличением длительности импульса по сравнению с  $\tau_{\rm u}$ =1-3 нс повышается мощность импульса излучения. Для измерения расстояния (высоты) сотни метров инжекционные полупроводниковые лазеры следует заменить на волоконные лазеры или на твердотельные лазеры со светодиодной накачкой.

Полоса пропускания ФПУ задается для каждого значения длительности импульса из компромиссных соображений – обеспечение приемлемого уровня шума при допустимых потерях амплитуды и искажениях принимаемого сигна-

ла (затягивание фронта импульса). На выходе ФПУ длительность фронта импульса равна  $\tau_{\phi p B_{blx} \Phi \Pi Y} = \sqrt{(\tau_{\phi p u s \pi}^2 + t_{Hap \Pi X}^2)}$ , где  $t_{Hap \Pi X} = \frac{0.35}{\Delta f}$ .

Для расчета энергетических параметров модулей высотомера используется формула светолокации [2,4], Высотомер, содержащий излучатель и фотоприемник, расположен на расстоянии R от диффузно – отражающей поверхности с коэффициентом отражения  $\rho$ . При работе дальномерного датчика в замутненной среде с коэффициентом рассеяния  $\sigma$  необходимо учитывать коэффициент ослабления сигнала по закону Бугера:  $K_{ocn} = e^{-2\sigma R}$ .

Мощность импульса на входе фотоприемника *P*<sub>вх</sub> равна:

$$P_{\rm ex} = P_{\rm usn} \frac{k_0 d^2 \rho}{4R^2} e^{-2\sigma R},$$

где  $P_{\rm изл}$  – импульсная мощность излучателя,

*k*<sub>0</sub> – коэффициент пропускания оптических систем высотомера,

 $\rho$  – коэффициент отражения, f( $\beta$ ) – индикатриса рассеяния поверхности,

 β – угол между нормалью к плоскости отражающей поверхности и оптической осью приемника,

*R* – расстояние до отражающей поверхности.

Значение индикатрисы рассеяния для направлений измерения, близких к нормали относительно поверхности, принимается в ближней светолокации, как равное двум: f(β≅180°)=2.

При расчете приняты значения: диаметр входного окна оптической системы  $\Phi \Pi Y d=0,02$ м, отношение порог/шум = 10.

Предельный коэффициент рассеяния  $\sigma_{\text{предОСЛ}}$  [1/м] по ослаблению излучения в атмосфере, приводящему к невозможности принять сигнал от поверхности (измерение не состоялось), рассчитывается при условии  $P_{\text{вх}}=P_{\text{пор}}$ , как:

$$\sigma_{npedOCЛ} = \frac{ln(P_{ex}/P_{nop})}{2R}$$

Для датчиков с узкими диаграммами направленности при изменении угла наблюдения  $\varphi$  относительно нормали к поверхности проявляется погрешность измерения, пропорциональная значению  $(1 - cos^{-1}\varphi)$ . Без введения поправки на угол  $\varphi$  возможна погрешность  $\Delta R/R = 6,4\%$  при угле подхода к поверхности  $\varphi=\pm 20^{\circ}$  и  $\Delta R/R = 10,4\%$  при угле  $\varphi=\pm 25^{\circ}$ . При  $\varphi=\pm 30^{\circ}$  погрешность  $\Delta R/R = 15,5\%$ .

Помехоустойчивость датчиков с различными параметрами описана в таблице 2. Отношение сигнал-порог превышает единицу в 9,6-40,0 раз. Этот энергетический запас позволяет обеспечить работоспособность датчика в замутненной атмосфере при коэффициенте рассеяния  $\sigma_{\rm предОСЛ}$ , который для первых трех вектор-вариантов составляет 0,0774-0,192м<sup>-1</sup>.

Уровень помехового сигнала на входе  $\Phi\Pi У$ , приводящий к ложным измерениям расстояния по помехе, рассчитывается из условия  $P_{\text{пом}}=P_{\text{пор}}$ , по экспе-

риментальным графикам, измеренным в условиях полунатурных испытаний в камере искусственных туманов (коэффициент пересчета  $K_{nep}=0,125$  мкВт/мВ/Вт получен в расчете на единицу излучаемой импульсной мощности через амплитуду сигнала тестового фотоприемника) [2]. До значения коэффициента рассеяния помехи  $\sigma < \sigma_{npedЛT}$  (свойственных вероятным по плотности облачности, осадкам, туманам, пылевым и дымовым облакам) ложные измерения и срабатывания предотвращаются путем типовой пороговой обработки сигналов без анализа их формы.

Адаптация лазерных датчиков расстояния для носителя позволяет на интервале до 40 м автоматически обеспечивать оптимальное сочетание основных параметров бортовой оптоэлектронной аппаратуры при работе в реальной замутненной атмосфере по поверхностям со случайными отражающими свойствами. В итоге может быть получена информация о расстоянии от носителя до объектов в пределах нижней полусферы и в боковой области пространства. Применение адаптивных наносекундных дальномерных датчиков также перспективно в высокоинформативных оптико-локационных системах с распознаванием трехмерных изображений [6-8].

Применение феррозондового датчика (ФЗД) в комплексированной аппаратуре позволяет повысить ее информативность, например, при облете надводного корабля (объект) или посадке на него. Исследование работы ФЗД в реальной обстановке иллюстрируются на рисунке 4 [9, 10].



Рис. 4. Схема эксперимента по определению изменения сигнала ФЗД: а) вид сверху, б) вид спереди: 1 – цель, 2 – палубная надстройка, 3 – направление движения носителя, 4 – носитель, *R* – расстояние (в метрах) до цели

Носитель (4) подлетает по направлению (3) к надводному объекту – кораблю (1) длиной 50 м с надстройкой (2). Расстояние между носителем и кораблем меняется от 10 м до 0 м. При облете корабля носитель пролетает над надстройкой на высоте 2 м. При этом измеряется выходной сигнал феррозондового датчика в зависимости от его расстояния до объекта. Показано, что созданный ФЗД обладает достаточной чувствительностью для обнаружения надводных магнитных объектов указанного размера и безопасного движения носителя в их окрестностях. Адаптация ФЗД к естественным и искусственным магнитным полям обеспечивается автоматической регулировкой тока подмагничивания сердечника.

Измеренная полярная диаграмма направленности предложенного U-образного феррозонда в условиях воздействия геомагнитного поля и при наличии близкорасположенных конструктивных магнитных элементов носителя подтверждает возможность его применения на борту носителя.

Разработанная конструкция дискретного лазерного дальномерного датчика (Рис. 2) может служить основой при разработке моноблочного трехканального лазерного измерителя расстояния для различных летательных аппаратов.

Моноблок должен иметь единый корпус, отсутствие корпусных деталей дискретных устройств (в отличие от Рис. 1) позволит минимизировать габариты и вес бортовой аппаратуры. Интегрированный моноблок с оптоэлектронными и другими датчиками (магнитный, радиолокационный) на базе бортовой процессорной платформы и телеметрической системы позволит создать малогабаритную унифицированную информационную систему обзора в пределах нижней полусферы и в боковой области пространства. Аппаратура обеспечит возможность измерения расстояния от носителя до поверхности естественных или искусственных преград (природный рельеф, здания, мачты ЛЭП и сотовой связи, железнодорожные сооружения и мосты).

Применение адаптивных наносекундных дальномерных датчиков также перспективно в высокоинформативных оптико-локационных системах с распознаванием трехмерных изображений [6-8] и в системах автосопровождения подвижных объектов [11].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Легкий В. Н. Анализ энергетических параметров наносекундных оптоэлектронных систем // Автометрия. – 2002. – №6. – С. 115–120.

2. Легкий В. Н., Топорков В. Д., под ред. В.Н. Легкого. Лазерные системы ближней локации. Оптоэлектронные датчики : учеб. пособие – Новосибирск : НГТУ, 2002. – 179 с.

3. Легкий В. Н., Галун Б. В., Литвиненко С. А., Санков О. В., Шумейко В. А., Баласов И. Ю., Башмаков А. О. Принципы построения помехоустойчивых миниатюрных лазерных импульсных дальномеров, высотомеров и датчиков для бортовых и транспортных систем // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 5. – С. 64–69.

4. Легкий В. Н., Галун Б. В., Санков О. В. Оптоэлектронные элементы и устройства систем специального назначения. – Новосибирск : НГТУ, 2011. – 455 с.

5. Сероштанов К. В., Батурин А. Г., Буднов С. А., Андреев С. А., Легкий В. Н. Перспективы применения лавинных фотодиодов в режиме Гейгера в системах двойного назначения // Труды XVII всероссийской научно-технической конф. «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск : НГТУ, 2016. – С. 241–245.

6. Легкий В. Н., Шумейко В. А., Баласов И. Ю. и др. Моделирование алгоритма измерения профиля рельефа и распознавания объектов в бортовых сканирующих импульсных лазерных дальномерах // Международная конференция-семинар по микро/нанотехнологиям

и электронным приборам EDM'2010. Секция 5. «Оптико-электронные приборы и системы: физика, электроника, применения». – Новосибирск : НГТУ, 2010. – С. 390–392.

7. Легкий В. Н., Плешакова Е. В. Патент РФ № 22545457 от 20.06.05 г. Высокоинформативный распознающий дальномер.

8. Легкий В. Н., Ющенко В. П., Шумейко В. А., Санков О. В., Эдвабник В. Г., Буднов С. А. Высокоинформативные оптико-локационные системы с обработкой трехмерных изображений // «Доклады АН ВШ РФ». – Новосибирск: НГТУ, 2017. – № 3 (36). – С. 64–73.

9. Санков О. В. Частотный градиентометр на основе феррозондов : сборник трудов: Международная научно-техническая конференция «Четвертые Уткинские чтения», Т. 2, Секция «Информационные технологии в ракетостроении» (21–22 мая 2009 г. – Санкт-Петербург : БГТУ, 2009. – С. 134–136.

10. Санков О. В., Легкий В. Н. Исследование феррозондовых датчиков магнитных объектов для систем ближней локации // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана, сер. Машиностроение. – 2009. – № 2 (75). – С. 90–102.

11. Борисова И. В., Легкий В. Н., Кравец С. А. Применение ориентации градиента яркости для систем автосопровождения объектов // Компьютерная оптика (Computer Optics). – 2017. – № 4. – С. 931–937.

© В. Н. Легкий, С. А. Буднов, О. В. Санков, И. В. Борисова, В. Г. Эдвабник, 2018

# ВОПРОС УЧАСТИЯ ОПТОМЕТРИИ В СОХРАНЕНИИ ЗРЕНИЯ

#### Елена Викторовна Иванова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры фотоники и приборостроения, e-mail: eivanovamvfd2@ngs.ru

#### Аэлита Владимировна Шабурова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор экономических наук, профессор, директор Института оптики и оптических технологий, тел. (383)344-40-58, e-mail: aelita\_shaburova@mail.ru

Дается краткий анализ данных о числе специалистов по оптометрии в России и зарубежных странах; по всемирной проблеме обнаружения глаукомы: группа заболеваний, ведущих к слепоте; необходимости сотрудничества между офтальмологами и оптометристами.

Ключевые слова: глаукома, эпидемиология, оптометрия, медицинский оптикоптометрист.

#### PARTICIPATION OF OPTOMETRY IN PRESERVATION OF VISION

#### Elena V. Ivanova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Assistant, Department of Photonics and Device Engineering, e-mail: eivanovamvfd2@ngs.ru

#### Aelita V. Shaburova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Director of the Institute of Optics and Optical Technologies, Territorial Planning, phone: (383)344-40-58, e-mail: aelita\_shaburova@mail.ru

The brief analysis of data on the number of specialists in optometry in Russia and foreign countries is given; on the worldwide problem of glaucoma detection: a group of diseases leading to blindness; The need for cooperation between ophthalmologists and optometrists.

Key words: glaucoma, epidemiology, optometry, medical optometrist.

Когда дело касается зрения и здоровья глаз, основным поставщиком медицинских услуг в нашей стране является врач-офтальмолог. В зарубежных странах это ещё и врач-оптометрист и оптометрист, которые имеют образование, клиническую подготовку и лицензирование для предоставления наилучшего стандарта комплексного первичного ухода за глазами.

Так в Великобритании оптометристы всё чаще участвуют в совместном лечении пациентов с глаукомой. Оптометристы стали частью команды во многих клиниках. Между оптометристами и офтальмологами заключено соглашение о клинических решениях для пациентов с глаукомой [7]. Термин «оптометрия» (от греч. optos – видимый, metreo – измерять) буквально означает «измерение зрения».

В России под оптометрией понимают раздел офтальмологии, разрабатывающий методы определения оптических дефектов глаза и их коррекции с помощью оптических средств.

В странах Европы, США, Австралии оптометрия давно выделилась в самостоятельную и престижную профессию, у обладателей которой есть свои объединения, издания, система профессионального и научного общения.

Число оптометристов в США примерно вдвое превосходит число офтальмологов. В Соединенных Штатах практикуется около 40 000 оптометристов, ежегодно около 1350 выпускников школ и колледжей оптометрии. В Англии на 15 тысяч оптометристов приходится 5 тысяч офтальмологов. В Российской Федерации ежегодно с дневных отделений колледжей (г. Москвы, г. Санкт-Петербурга, г. Новосибирска) выпускается 175 медицинских оптиковоптометристов. По данным Государственной статистики на 2015г. в РФ численность врачей-офтальмологов составила 17104 специалиста. [6]

Профессиональные услуги оптометристов значительно дешевле и постоянно расширяется спектр оказываемых ими услуг. Выпускники школ и колледжей оптометрии хорошо обучены во всех терапевтических областях, включая глаукому. [1]

Глаукома – это группа заболеваний, в которых происходит прогрессирующее повреждение зрительного нерва. По данным ВОЗ, в среднем 3 % всего населения земного шара (около 70 млн. человек) страдают глаукомой. Девять из десяти слепых живёт в развивающихся странах, и две трети из них могли бы быть вылечены. Глаукома является второй после катаракты причиной слепоты. От 16% до 20% всех случаев заболевания заканчиваются слепотой. [2]

По данным Европейского глаукомного общества, 50% больных с глаукомой не знают о том, что они больны. В России эта цифра не меньше. В нашем регионе на учёте стоит порядка 16 тыс. пациентов, но на самом деле эта цифра в два раза меньше реальной. Кто-то не доходит до офтальмолога, кто-то наблюдается там, где невозможно произвести учёт. В общей сложности, в Новосибирской области таких пациентов не менее 30 тыс. Больше всего больных среди людей старше 80-ти лет – таких пациентов в области около 14% от числа представителей своей возрастной группы. Однако и среди молодых эту болезнь нельзя назвать большой редкостью – 1-2% новосибирцев до 40 лет страдают этим недугом, и количество больных глаукомой увеличивается с возрастом. [3]

Решить проблему распространения этого недуга и тех неутешительных последствий, которые болезнь приносит миллионам людей по всему миру – а именно, неуклонное снижение зрения до полной его потери, по словам врачей, сегодня пока не удаётся. Сохраняется значительный дефицит врачейофтальмологов при оказании первичной медико-санитарной помощи. Необходимо рассмотреть вопрос о делегировании части полномочий врачаофтальмолога по выявлению глаукомы медицинскому оптику-оптометристу. По этому пути пошли США, Западная Европа. Так, в Соединенном Королевстве, оптометристы, обученные глаукоме, являются ценным ресурсом для обнаружения и лечения глаукомы. Доступ к оптометристам является простым, и они помогают снизить спрос на амбулаторно-поликлинические услуги. [1]

В 1999г. ВОЗ и другие агентства ООН, министерства здравоохранения отдельных стран с целью устранения преодолимой слепоты разработали программу «Зрение 2020 – право видеть» (Vision 2020 – The right to sight). В рамках реализации Глобальной программы ежегодно во второй четверг октября отмечается Всемирный день зрения (World Sight Day).

В России с 2009 г. 6 марта объявлен «Всемирным днём борьбы с глаукомой», на котором обсуждаются меры по борьбе с глаукомой и слепотой. Однако значимых результатов нет. Россия участвует в международной программе ВОЗ «Ликвидация устранимой слепоты 2020», основные направления которой предусматривают разработку и реализацию мер, направленных на сохранение зрения населения с условием, что офтальмологическая помощь должна быть доступнее, дешевле и качественнее.

Главный офтальмолог Российской федерации профессор В.В. Нероев ещё в 2011 году говорил о том, что в подготовлена Федеральная программа по борьбе со слепотой и слабовидением в РФ.[5] В рамках целевой программы предполагается, что будут открыты 500 офтальмологических центров. Не останавливаясь на сложных вопросах финансирования такого проекта, важно уточнить, где найти профессионалов для такого важного проекта.

Многолетний опыт зарубежных стран показывает, что оптометристы благодаря своему клиническому образованию, обучению, опыту и широкому географическому распределению, часто являются первыми специалистами в области здравоохранения для диагностики глаукомы. Их роль в лечении заболеваний глаз, в частности глаукомы, доказана с 80-х годов прошлого века.

Необходимо формировать оптометрическую службу, разработать стандарты оказания медицинской помощи и порядка оказания медицинской помощи по медицинской оптике, ввести в квалификационный справочник должность: врач-оптометрист. В квалификационном справочнике есть специалист среднего медицинского звена: медицинский оптик-оптометрист, в должностных обязанностях которого присутствует диагностика основных признаков заболеваний органа зрения [4], но силу организационных причин они не вовлечены в первичную медико-санитарную помощь.

Мы можем предложить разработку программ в рамках непрерывного образования (дополнительное образование, повышение квалификации) с использованием, в том числе, дистанционных технологий, при поддержке и сотрудничестве с Новосибирским авиационным техническим колледжом, Новосибирским институтом повышения квалификации работников здравоохранения. В области подготовки специалистов по оптометрии наш университет располагает значительным интеллектуальным потенциалом, имеет учебную базу и опыт подготовки. В Сибирском государственном университете геосистем и технологий готовят специалистов высшего профессионального образования по направлению «Медицинские приборы и оптометрия», что является большим вкладом в высшее профессиональное развитие кадров по оптометрии, закрепленных нормативными документами.

Миссия профессии оптометрии заключается в том, чтобы удовлетворить потребности зрения и ухода за глазами посредством клинической помощи, исследований и просвещения, которые повышают качество жизни. Что приведет к своевременной выявляемости и лечению глаукомы, и, в конечном счете, к снижению инвалидизации по зрению и слепоты.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аугусто Азуара-Бланко, Дженнифер Берр, Рут Томас, Грэм Макленнан и Стивен Макферсон. Точность аккредитованных окулистов глаукомы в диагностике и рекомендации по лечению глаукомы // Британский журнал офтальмологии. – 2007. – № 91 (12). – С. 1639–1643 [Электронный ресурс] Официальный сайт : British Journal of Ophthalmology. – Режим доступа : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2095552/

2. Дронов М. М., Коровенков Р. И., Алексанин С. С. Медицинская, социальная и экономическая значимость заболевания с названием глаукома // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2011. – № 1. – С. 42–49.

3. Кулешова О. Н. Всемирный день борьбы с глаукомой [Электронный ресурс] : Официальный сайт : Новосибирский филиал МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Фёдорова, 2016. – Режим доступа : http://mntk.nsk.ru/o-klinike/news/31-borby-sglaukomoy.

4. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 23 июля 2010 г. № 541н "Об утверждении Единого квалификационного справочника должностей руководителей, специалистов и служащих, раздел "Квалификационные характеристики должностей работников в сфере здравоохранения"

5. Национальное руководство по глаукоме для практикующих врачей / Под ред. Е. А. Егорова, Ю. С. Астахова А. Г. Щуко. – М. : ГЭОТАР-Медиа. 2011. – 280 с.

6. Численность врачей всех специальностей (физических лиц) в организациях, оказывающих медицинские услуги населению, на конец отчетного года. [Электронный ресурс] : Официальный сайт Государственной статистики ЕМИСС. 2015. – Режим доступа: http ://www.fedstat.ru/indicator/31547.

7. Marks J. R., Harding A. K., Harper R. A., Williams E., Хак S., Spenser F., Fenerty C. Соглашение между специально обученными и аккредитованными оптометристами и специалистами-офтальмологами, являющихся специалистами по глаукоме, в лечении пациентов с глаукомой // Глаз. – Лондон : 2012. №26 (6) [Электронный ресурс] Официальный сайт : NCBI. – Режим доступа : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22498794.

© Е. В. Иванова, А. В. Шабурова, 2018

# УДК 623.5

# КОНТРОЛЬ ПАРАЛЛАКСА В ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

#### Олег Кузьмич Ушаков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (903)931-08-52, e-mail: ushakovo@bk.ru

### Павел Вадимович Петров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (905)958-50-92, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

# Валерия Александровна Павленко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат экономических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (906)996-32-89, e-mail: lera-pavlenko1@yandex.ru

# Елизавета Геннадьевна Бобылева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры фотоники и приборостроения, тел. (952)900-67-13, e-mail: elizaveta.bobileva@yandex.ru

В статье рассматривается параллакс, как нежелательное оптическое явление с точки зрения погрешности измерения. Излагаются способы задания величины параллакса в телескопических системах, а также определены условия его уменьшения.

Ключевые слова: параллакс, допустимый параллакс, остаточный угловой параллакс, контроль параллакса, телескопические системы, погрешность измерения, зрачок глаза, зрачок прибора, допуск на параллакс, пучок лучей.

# CONTROL PARALLAX IN TELESCOPIC SYSTEMS

#### Oleg K. Ushakov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (903)931-08-52, e-mail: ushakovo@bk.ru

#### Pavel V. Petrov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (905)958-50-92, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

#### Valery A. Pavlenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (906)996-32-89, e-mail: lera-pavlenkol@yandex.ru

#### Elizabeth G. Bobyleva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (952)900-67-13, e-mail: elizaveta.bobileva@yandex.ru

The article considers parallax as an undesirable optical phenomenon from the point of view of measurement error. The ways of setting the parallax value in telescopic systems are described, as well as the conditions for its reduction are determined.

**Key words:** parallax, the parallax allowable residual of angular parallax, parallax control, telescopic system, the error of the measurement, the pupil of the eye, the pupil of the instrument, the tolerance of the parallax of the beam.

Телескопической системой называется оптическая система, которая преобразует параллельный пучок лучей, идущих из осевой точки предмета в параллельный пучок за окуляром и попадающий в глаз наблюдателя [5]. Обычно такие системы применяются для наблюдения бесконечно удалённых объектов (наблюдательные приборы) или визирования и измерения угловых величин (визирные приборы). Если для наблюдательных приборов основным требованием является получение резкого изображения предмета, то для визирных приборов при отсутствии нерезкости необходимо выполнить требования устранения параллакса [1-4,7]. Параллаксом визирных приборов называется видимый сдвиг изображений бесконечно удалённого предмета и сетки относительно друг друга, наблюдаемый при смещении зрачка глаза в плоскости в плоскости перпендикулярной оптической оси в пределах выходного зрачка прибора [5]. Надо заметить, что рабочий пучок лучей, которые полностью попадают в глаз наблюдателя, определяется либо диаметром зрачка глаза (d<sub>гл.</sub>), либо диаметром выходного зрачка прибора  $(d_{p})$ . В первом случае,  $d_{p} > d_{rn}$ , во втором,  $d_{p} < d_{rn}$ . Следует отметить, что наиболее неблагоприятным является первый случай, дающий максимальную величину параллакса. Во втором случае параллакс практически не возникает, потому что как только зрачок глаза начинает срезаться выходным зрачком прибора, наступает резкое падение освещённости плоскости изображения. Таким образом, для приборов, работающих при пониженной освещённости (например, военных приборов и т.п., у которых выходной зрачок имеет диаметр от 2 до 8 мм), необходимо устранять параллакс, определяющий погрешность измерений.

Рассмотрим способы задания величины параллакса в телескопических системах.

Положение сетки относительно плоскости изображения предмета должно соответствовать двум требованиям:

1. Сетка и изображение предмета, которое на неё проецируется, должны быть видны одновременно резко. В этом случае величина параллакса задаётся величиной А<sub>резк.</sub> Это отрезок между изображением бесконечно удалённого предмета за окуляром прибора и точкой заднего фокуса окуляра, выраженный в диоптрийной мере, при условии, что плоскость сетки совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра.

2. Второе требование должно обеспечивать при выполнении резкости условие устранения параллакса до величины, регламентированной погрешностью измерений. Это величина допустимого параллакса в пространстве предметов Q<sub>лоп</sub>

На рис. 1 показана визирная телескопическая система, имеющая параллакс.



Рис. 1. Телескопическая система: 1 – объектив, 2 – сетка, 3 – окуляр, 4 – выходной зрачок, 5 – зрачок глаза наблюдателя

Параллельный пучок лучей, идущий из осевой точки предмета, проходит объектив 1 и попадает в задний фокус объектива. Пройдя окуляр, пучок строит изображение в точке A', удалённой от заднего фокуса окуляра на величину Z' (мм)или A(резк) в диоптрийной мере. Если луч, идущий из предметной точки A, удалённой от переднего фокуса объектива на величину  $-Z\infty$  (практическая бесконечность), проходит через точку переднего фокуса окуляра F<sub>ок</sub>, то он выйдет параллельно оптической оси. Поскольку плоскость сетки не совпадает с плоскостью изображений, то возникает параллакс, величине которого соответствуют отрезки  $\Delta Z, Z', Z\infty$ , P, выраженные в линейной мере, либо угловые величины Q'<sub>ок</sub>и Q<sub>доп</sub>.

На практике величина параллакса задаётся следующими величинами:

1. Исходя из условий резкости, величиной А<sub>резк</sub>, выраженной в диоптрийной мере в пространстве изображений за окуляром прибора.

2. В линейной мере, величиной ∆Z – расстоянием между сеткой и плоскостью изображения бесконечно удалённого предмета.

3. Допустимым угловым параллаксом –  $Q_{\text{доп}}$  в пространстве предметов в угловой мере.

Известно, что чувствительность продольных наводок определяется формулой (1) А.Н. Захарьевского [6]:

$$\Delta \mathbf{Z} = \frac{0.2}{\mathbf{H}^2},\tag{1}$$

где И – задняя апертура объектива, которая вычисляется по формуле (2):

$$\mathcal{H} = \frac{\mathcal{A}_{\mathrm{BX}}}{2f^{2}o\delta},\tag{2}$$

где  $Д_{вx}$  – диаметр входного зрачка объектива;  $f_{ob}$  – фокусное расстояние объектива.

Отсюда можно легко получить значение  $A_{\text{резк}}$  за окуляром прибора в диоптрийной мере:

$$A \operatorname{pesk} = \frac{0.8}{(\mathrm{dp}')^2},\tag{3}$$

где d<sup>'</sup><sub>p</sub> – диаметр выходного зрачка прибора в мм.

Учитывая, что для большинства телескопических систем  $d_p>d_{rn}$  и что рабочий пучок определяется диаметром зрачка глаза, который при нормальных условиях принимают равным 2 мм, определяем по формуле (3) допуск на параллакс, исходя из условия наблюдения одновременной резкости:

Арезк 
$$\leq \frac{0.8}{(dp')^2} \leq \frac{0.8}{4} \leq 0.2$$
 дптр

Если у телескопической системы  $d_p < d_{rn}$ , то рабочий пучок определяется диаметром выходного зрачка прибора и будет меньше 2 мм, а допуск  $A_{pesk}$  будет больше 0,2 дптр. Таким образом, допуск на взаимное положение сетки и изображения предмета назначат из условия, что  $A_{pesk} \le 0,2$  дптр – это величина постоянная (const).

Зная величину А<sub>резк</sub>, легко определить величину параллакса в линейной мере ( $\Delta Z$ , мм):

$$\Delta Z = \frac{f^{\prime 2} \sigma \kappa A \, \text{pesk}}{1000} \tag{4}$$

Далее можно определить величину углового остаточного параллакса (Q'ок):

$$Q' \circ \kappa = 3.4 \frac{dp'}{2} A \text{ резк}$$
(5)

Полученную величину сравнивают с величиной допустимого параллакса в пространстве предметов, заданного в техническом задании на разработку телескопической системы, исходя из общей погрешности измерений. Должно выполняться неравенство (6):

$$Q'_{o\kappa} \leq Q_{\text{don}} \Gamma, \tag{6}$$

где Г – видимое увеличение телескопической системы,

Q<sub>доп</sub> – допустимый параллакс между изображениями центрального знака сетки и осевой точки в пространстве предметов,

Q'<sub>ок</sub> – остаточный угловой параллакс за окуляром телескопической системы.

Если условие (6) не выполняется, то уточняют установку сетки относительно плоскости изображения, т.е. уменьшают величину  $\Delta Z$  на  $\Delta Z_{vточн}$  (мм):

$$\Delta Z$$
уточн  $\leq \frac{f^{\prime 2} O \kappa Q \text{доп } \Gamma}{1720 \text{ dp}^{\prime}}$ , (7)

где $\dot{f}_{ok}$  – фокусное расстояние окуляра.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутримов И. С., Айрапетян В. С. Оптико-электронный комплекс для контроля положения линии визирования прицельных устройств в ходе стендовых испытаний // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 124–138.

2. Хацевич Т. Н., Волкова К. Д., Дружкин Е. В. Моделирование юстировки телескопических панкратических систем // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 156–172.

3. Берник Г. К., Хацевич Т. Н. Современные тенденции в развитии оптических прицелов для охотников // Вестник СГУГиТ. – 2010. – Вып. 2 (13). – С. 83–85.

4. Попов Г. Н. Систематизация оптико-электронных приборов прицеливания, наведения, разведки и наблюдения для сухопутных войск РФ (на примере изделий ЦКБ «Точприбор») // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 4, ч. 1. – С. 176–181.

5. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. – Ленинград : Машиностроение, 1968. – 292 с.

6. Погарев Г. В. Краткие сведения из теории точных измерений / Под ред. А. Н. Захарьевского. – Л. : ЛИТМО, 1962. – 31 с.

7. Афанасьев В. В., Ушаков О. К. Проектирование телескопических систем. Труба Кеплера: метод разработки. – Новосибирск : СГГА, 1996. – 27 с.

© О. К. Ушаков, П. В. Петров, В. А. Павленко, Е. Г. Бобылева, 2018

# СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ЧАСТИЦЫ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРОФОРЕЗА

### Константин Владимирович Генералов

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630559, Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово, ведущий инженер-программист отдела информационных технологий, тел. (383)363-47-00 (доб. 26 30), e-mail: gkv@vector.nsr.ru

#### Владимир Михайлович Генералов

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630559, Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 25 22), e-mail: general@vector.nsr.ru

# Маргарита Витальевна Кручинина

Научно-исследовательский институт терапии и профилактической медицины – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», 630089, Россия, Новосибирск, ул. Б. Богаткова, 175/1, доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гастроэнтерологии, тел. (913)728-17-02, e-mail: kruchmargo@yandex.ru

#### Геннадий Владимирович Шувалов

Федеральное государственное унитарное предприятие Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, директор, тел. (383)210-09-38, e-mail: gvshuvalov@mail.ru

#### Галина Алексеевна Буряк

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630559, Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово, научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 25 77), e-mail: buryak@vector.nsc.ru

#### Александр Сергеевич Сафатов

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 630559, Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово, доктор технических наук, зав. отделом биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 26 20), e-mail: safatov@vector.nsc.ru

#### Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

#### Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com Приводится способ определения величины массы отдельно наблюдаемой клетки, а также латексной частицы в неоднородном переменном электрическом поле. Экспериментально измеренная методом диэлектрофореза и рассчитанная величины массы частиц с известным удельным весом совпадают между собой.

Ключевые слова: диэлектрофорез, масса, клетка, частица.

# PARTICLES MASSES MEASUREMENT METHOD USING DIELECTROPHORESIS

#### Konstantin V. Generalov

Federal Budgetary Research Institution "State Research Center of Virology and Biotechnology «Vector», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Koltsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia, Leading Programmer-Engineer, Department of Information Technologies, phone: (383)363-47-00 (add. 26 30), e-mail: gkv@vector.nsr.ru

#### Vladimir M. Generalov

Federal Budgetary Research Institution "State Research Center of Virology and Biotechnology «Vector», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Koltsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia, D. Sc., Leading Scientist, Department of Biophysics and Ecological, phone: (383)363-47-00 (add. 25 22), e-mail: general@vector.nsr.ru

#### Margarita V. Kruchinina

Research Institute of Internal and Preventive Medicine-Branch of the Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 175/1, B. Bogatkova St., Novosibirsk, 630089, Russia, Dr. Sc., Leading Scientist, Gastroenterology Laboratory, phone: (913)728-17-02, e-mail: kruchmargo@yandex.ru

#### Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise «Siberian State Red Banner of Labor Research Institute of Metrology», 4, Dimitrova Pr., Novosibirsk, 630004, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)210-09-38, e-mail: gvshuvalov@mail.ru

#### Galina A. Buryak

Federal Budgetary Research Institution "State Research Center of Virology and Biotechnology «Vector», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Koltsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia, Staff Scientist, Department of Biophysics and Ecological, phone: (383)363-47-00 (add. 25 77), e-mail: buryak@vector.nsc.ru

#### Alexander S. Safatov

Federal Budgetary Research Institution "State Research Center of Virology and Biotechnology «Vector», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Russia, 630559, Koltsovo, Novosibirsk Region, D. Sc., Head of department of Biophysics and Ecological, phone: (383)363-47-00 (add. 26 20), e-mail: safatov@vector.nsc.ru

#### Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, phone: (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

#### Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, phone: (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

The experimental methodology and results of measurements of latex particle masses by a nonuniform electric field are described. The results showed that experimentally measured and theoretical calculated masses of the latex particle are agreed.

Key words: dielectrophoresis, mass, cell, particle.

Масса является одной из важнейших характеристик клетки. Поддерживать ее в пределах определенных физиологических норм является для клетки жизненно важной необходимостью. В настоящее время врачи, исследователи оперируют такими характеристиками клетки как диаметр, объем, экстраполируя эти величины на массу. Подобная практика связана с тем, что в их распоряжении отсутствует простой, недорогой и доступный метод измерения массы для каждой отдельно наблюдаемой клетки [1, 2].

Цель работы – создание способа измерения массы клетки переменным электрическим полем на примере латексных частиц микронного размера с известной плотностью.

На частицу, помещенную в неоднородное переменное электрическое поле (НПЭП), действуют силы, которые зависят от времени и ее местоположения в пространстве между измерительными электродами. В зависимости от амплитудно-частотных характеристик электрического поля частица совершает вынужденные возвратно-поступательные колебания как единое целое [3]. В большинстве случаев реакцию частицы в ответ на действие линейной внешней вынуждающей силы можно проанализировать с помощью дифференциального уравнения колебания механической системы с одной степенью свободы [4]

$$m_{\kappa\pi} \ddot{x}_{\kappa\pi} + b_{(cp + \kappa\pi)} \dot{x}_{\kappa\pi} + c_{\kappa\pi} x_{\kappa\pi} = \vec{F}_{\kappa\pi}$$
(1)

где  $m_{\kappa n}$  – масса клетки;  $\ddot{x}_{\kappa n}$  – ускорение движения произвольной материальной точки на поверхности клетки;  $b_{(cp + \kappa n)}$  – суммарный обобщенный коэффициент вязкости среды и клетки;  $\dot{x}_{\kappa n}$  – скорость движения произвольной материальной точки на поверхности клетки;  $c_{\kappa n}$  – жесткость клетки;  $x_{\kappa n}$  – амплитуда деформации материальной точки на поверхности клетки;  $\vec{F}_{\kappa n}$  – вектор вынуждающей силы, действующий на клетку.

Если на клетку действует внешняя вынуждающая сила электрического поля согласно гармоническому закону, то амплитуда возвратно-поступательного движения  $x_{\kappa_n}$ , скорость  $\dot{x}_{\kappa_n}$  и ускорение  $\ddot{x}_{\kappa_n}$  строго следуют за полем и, в значительной степени, определяются его характеристиками [4]

$$x_{\kappa\pi} = x_{m} \sin \omega t$$
  

$$\dot{x}_{\kappa\pi} = \omega x_{m} \cos \omega t$$
  

$$\ddot{x}_{\kappa\pi} = -\omega^{2} x_{m} \sin \omega t$$
  

$$\omega = 2\pi f$$
(2)

где  $\omega$  – круговая частота переменного электрического поля [paд/c]; *f* – циклическая частота электрического поля [Гц].

Амплитудно-фазовая зависимость амплитуды колебания x, скорости  $\dot{x}_{\kappa\pi}$ , ускорения  $\ddot{x}_{\kappa\pi}$  материальной точки представлены на рисунке.

Под действием силы электрического поля клетка сдвигает еще и присоединенную массу клеточной суспензии. В результате происходит движение некоторой единой суммарной массы  $M_{\kappa_{n}}$  которая объединяет массу клетки и присоединенную массу клеточной суспензии

$$M_{\kappa n} = m_{\kappa n} + m_{n \mu}$$

где  $m_{\kappa n}$  – масса клетки [кг];  $m_{np}$  – присоединенная масса прилегающей суспензии [кг].



Амплитудно-фазовая зависимость амплитуды колебания *x*, скорости  $\dot{x}_{\kappa_{7}}$ , ускорения  $\ddot{x}_{\kappa_{7}}$  материальной точки

Присоединенная масса для шара устанавливается половиной от массы окружающей суспензии, помещенной в его объём [5]

$$m_{\kappa\pi}=\frac{2}{3}\pi r_{\kappa\pi}\rho_{\kappa\pi},$$

где  $\rho_{\kappa \pi}$  – плотность клетки.

В случае, если жесткость клетки велика, то в уравнении (1) слагаемым  $c_{\kappa n}$  $x_{\kappa n}$  можно пренебречь, так как  $x_{\kappa n} \rightarrow 0$ . Суммируя сказанное, уравнение (1) принимает вид

$$M_{\kappa n} \frac{\partial v_{\kappa n}}{\partial t} + 6 \pi \eta_{cp} v_{\kappa n} r_{\kappa n} = \vec{F}_{\kappa n}.$$

После преобразования

$$M_{\kappa \pi} \partial v_{\kappa \pi} = (\vec{F}_{\kappa \pi} - 6\pi \eta_{cp} v_{\kappa \pi} r_{\kappa \pi}) \partial t.$$

На равновесной частоте  $f_p = l/t_p F_{_{\mathfrak{I}\!\mathcal{I}}} = 0$ , в результате в правой части уравнения опускаем слагаемое силы  $\vec{F}_{_{\mathcal{K}\!\mathcal{I}}}$ .

После интегрирования правой и левой части имеем уравнения для равновесной частоты

$$M_{\kappa\pi} v_{\kappa\pi} = 6 \pi \eta_{cp} v_{\kappa\pi} r_{\kappa\pi} t_p.$$
(3)

Из решения уравнения (3) находится искомая масса клетки  $m_{\kappa_{l}}$ .

$$m_{\kappa \pi} = \frac{6\pi \eta_{cp} r_{\kappa \pi}}{f_p} - \frac{2}{3}\pi r_{\kappa \pi} \rho_{\kappa \pi}.$$
 (4)

Относительная погрешность измерения массы клетки  $\frac{\partial m_{\kappa \pi}}{m_{\kappa \pi}}$  определялась

на основании уравнения (4). Она находится через частное дифференцирование функции по каждой переменной и не превышает суммы отдельных взятых от-

носительных погрешностей: вязкости суспензии  $\left| \frac{\partial \eta_{cp}}{\eta_{cp}} \right|$ , радиуса клетки  $\left| \frac{\partial r_{\kappa \eta}}{r_{\kappa \eta}} \right|$ 

и равновесной частоты клетки  $\frac{\left| \hat{\partial}(f_p) \right|}{\left| f_p^{2} \right|}$ 

$$\delta(m_{\kappa_{n}}) \leq \left|\frac{\partial \eta_{cp}}{\eta_{cp}}\right| + \left|\frac{\partial r_{\kappa_{n}}}{r_{\kappa_{n}}}\right| + \left|\frac{\partial f_{p}}{f_{p}^{2}}\right|$$

здесь  $\partial \eta_{\kappa n}$  – абсолютная погрешность измерений вязкости среды [Па с];  $\partial r_{\kappa n}$  – абсолютная погрешность измерений радиуса клетки [м];  $\partial f_p$  – абсолютная погрешность измерений равновесной частоты клетки 5.10<sup>-7</sup> Гц с помощью частотомера Ч3-63/1.

Относительной погрешностью измерения частоты можно пренебречь, так как она много меньше единицы

$$\delta(m_{\kappa n}) \leq 3,4 \% + 1 \% \leq 4,4 \%.$$

В таблице приведены результаты расчетной по формуле (4) и экспериментально измеренной массы отдельно наблюдаемых мелкодисперсных латексных частиц, изготовленных из полистирола.

Таблица

# Результаты измерения и сравнения массы латексных частиц микронного размера, изготовленных из полистирола производства Dow Chemical, США, с использованием переменного электрического поля

Ожи- даемый радиус частицы <i>r</i> <sub>4</sub> , м	Расчетная масса частицы М <sub>ч</sub> , кг	Экспериментально измеренная масса частицы с учетом присоединенной М <sub>ч</sub> , кг	Присое- диненная масса частицы <i>m<sub>np</sub></i> , кг	Эксперимен- тально измеренная, искомая масса частицы <i>m<sub>u</sub></i> , кг	Равно- весная частота клетки <i>f</i> , Гц	Относительная погрешность между расчетной и измеренной массами частицы
2,9E-06	1,0E-13	1,6E-13	5,1E-14	1,1E-13	3,5E+05	3%
2,8E-06	9,2E-14	1,4E-13	4,6E-14	9,5E-14	3,8E+05	3%
2,7E-06	8,2E-14	1,3E-13	4,1E-14	8,6E-14	4,0E+05	4%
2,6E-06	7,4E-14	1,1E-13	3,7E-14	7,5E-14	4,4E+05	1%

Примечание. 1. Паспортная плотность латексных частиц  $\rho_{\rm v} = 1050 \, [{\rm kr/m}^3]$  [6], температура  $T = 300 \, [{\rm K}]$ . 2. Измерение массы осуществлялось выборочно для частиц, не слипшихся между собой.

Работа выполнена при частичной поддержке государственной подпрограммы «Развитие системы технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений» ГК № 120-108 от 13 мая 2015 г.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Генералов В. М., Кручинина М. В., Дурыманов А. Г., Медведев А. А., Сафатов А. С., Сергеев А. Н., Буряк Г. А., Курилович С. А., Громов А. А. Диэлектрофорез в диагностике инфекционных и неинфекционных заболеваний. – Новосибирск : Церис, 2011. – 172 с.

2. Hughes M. P. Nanoelectromechanics in Engineering and biology. – London: CRC PRESS Boca Raton, 2003. – 320 p.

3. Минин И. В., Минин О. В. Устройство для анализа параметров живых клеток. Патент РФ 177745, Заявл. 07.06.2017, опубл. 07.03.2018. Бюл. № 7.

4. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний. – М. : Наука, 1987. – 352 с.

5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

6. Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

© К. В. Генералов, В. М. Генералов, М. В. Кручинина, Г. В. Шувалов, Г. А. Буряк, А. С. Сафатов, О. В. Минин, И. В. Минин, 2018

# РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

#### Геннадий Владимирович Шувалов

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, директор, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

В статье рассмотрены вопросы создания и применения средств измерений для проверки и мониторинга качества нефтяного топлива.

Ключевые слова: мониторинг, нефтепродукты, приборы.

# DEVELOPMENT, CREATION AND USE OF DEVICES OF CONTROL AND MONITORING OF QUALITY OF OIL PRODUCTS

#### Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise «SNIIM», 4, Prospect Dimitrov St., Novosibirsk, 630004, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

In article In article questions of creation and use of measuring instruments for check and monitoring of quality of oil fuel are considered.

Key words: monitoring, oil products, devices.

Показатели качества топлива могут значительно ухудшиться в процессе его хранения или применения. Это приводит к частым поломкам, выходу из строя дорогостоящих узлов и агрегатов, простоям автотракторной техники, снижению эффективности ее применения.

Поэтому необходим широкий и оперативный контроль основных показателей качества топлива, разработка и создание средств измерений для оперативного контроля качества нефтепродуктов при эксплуатации техники.

Во ФГУП «СНИИМ» в течение длительного времени проводятся разработки, направленные на создание приборов и измерительных систем для анализа параметров нефтепродуктов (см. таблицу).

Структурная схема прибора СИМ-6 включает в себя следующие основные элементы (рис. 1):

- измерительные датчики 8 и 9 с электродами 10, 11;
- микрогорелка для подачи и горения топлива 14;
- насос 12 для подачи сернистого ангидрида;
- электролитическое устройство для дозирования нефтепродукта 15;
- озонатор 7 с воздухокомпрессором 6;
- измерительное устройство 2 с устройством управления 3;
- устройство для питания схемы 4.

# Приборы для анализа нефтепродуктов

Наименование анализатора	Определяемый параметр	Конструктивное исполнение
Прибор контроля СИМ-5	Контроль температуры вспышки	
Прибор контроля СИМ-6	Определение содержания серы	
Прибор контроля СИМ-8	Определение вязкости	
Прибор контроля СИМ-11	Определение температуры замерзания	



Рис. 1. Структурная схема анализатора СИМ-6

Принципиальная схема прибора для контроля температуры вспышки СИМ-5 [2] показана на рис. 2.



Рис. 2. Схема электрическая функциональная СИМ-5

В состав функциональной схемы входят нагревательный блок 1, блок электроники и управления 2.

Работа прибора для определения кинематической вязкости нефтепродуктов СИМ-8 основана истечении нефтепродукта через вискозиметр, измерении времени протекания нефтепродукта и расчете значения вязкости.

Принципиальная схема прибора СИМ-8 приведена на рис. 3.

Стеклянный вискозиметр ВПЖ-4-0,62, наполненный прозрачной жидкостью с температурой кипения выше 100 °С и температурой вспышки не менее 145 °С (трансформаторное масло), размещается в термостате.

Нагрев жидкости в термостате осуществляется с помощью электронагревателя (ЭлН).

Для перемешивания нагреваемой жидкости и получения равномерного градиента температур по всему объему термостата используется компрессор (Комп). Воздух через шланг (Шл) поступает непосредственно в зону нагрева.

Регулирование и поддержание температуры термостата осуществляется с помощью микропроцессорного измерителя-регулятора ТРМ-10, который совместно с входным датчиком температуры (ДТ) позволяет осуществлять следующие функции:

 измерение температуры и отображение ее текущего значения на светодиодном цифровом индикаторе; - регулирование температуры по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону;

- выдача информации об обрыве температурного датчика.



Рис. 3. Принципиальная схема прибора СИМ-8

Параметры измерения и регулирования задаются при отключении питания в энергонезависимой памяти TPM-10.

Как указывалось выше, одним из недостатков стандартного метода определения температуры замерзания нефтепродукта является визуальная регистрация температуры застывания. Поэтому нами в приборе СИМ-11 был предложен другой метод определения температуры замерзания, основанный на зависимости между диэлектрической проницаемостью и температурой нефтепродукта.

Физическое обоснование метода. Диэлектрическая проницаемость определяется через поляризацию

$$\varepsilon = 1 + \kappa$$

где к – диэлектрическая восприимчивость.

С другой стороны, диэлектрическая восприимчивость для изотропных жидких диэлектриков определяет связь между поляризацией среды и внешним электрическим полем

$$P = \kappa E$$

где *P* – поляризация диэлектрика (суммарный дипольный электрический момент единицы объема диэлектрика);

Е – напряженность электрического поля.

Для жидких неполярных диэлектриков ориентационная поляризация и зависит от температуры. При относительно высоких температурах, близких к температуре кипения, ориентационная поляризация диэлектриков зависит от температуры. Чем больше температура, тем меньше поляризация из-за теплового движения. При понижении температуры фактор деполяризации уменьшается. Однако, существует фактор, связанный с вращательной вязкостью органических молекул, который увеличивается при понижении температуры. Поэтому температурная зависимость поляризации жидких диэлектриков должна быть немонотонной. При замерзании вымораживаются вращательные степени свободы, поэтому поляризация становится независимой от температуры при кристаллизации. Соответственно, диэлектрическая проницаемость становится независимой от температуры ниже точки замерзания.

Данный метод измерения основан на экспериментальном определении зависимости диэлектрической проницаемости от температуры нефтепродукта.

Суть состоит в том, что в охлаждаемую среду (этиловый спирт) помещается нефтепродукт с известной температурой замерзания, охлаждается до температуры среды, и измеряется электрическая емкость данного нефтепродукта между обкладками плоского конденсатора. Среда охлаждается с помощью блока регулирования М11, который обеспечивает равномерное распределение температуры по среде, с помощью циркуляционного насоса. Емкость нефтепродукта измеряется при помещении в нефтепродукт измерительного конденсатора, емкость которого, в свою очередь измеряется мостом переменного тока Р5083. На основе полученных данных можно определить диэлектрическую проницаемость нефтепродукта. Необходимо будет провести повторные измерения, используя другую марку нефтепродукта, для анализа зависимости для разных типов нефтепродукта. Далее строится зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и анализируется ее характер. В том случае, если точка замерзания определяется изменением характером температурной зависимости электрической емкости, которая позволяет судить о наступлении фазового перехода (замерзания), то можно использовать такой метод определения температуры замерзания.

Для оперативного контроля качества нефтепродуктов многие предприятия приобретают передвижные лаборатории. В настоящее время выпускаются лаборатории контроля качества «КЛАН-1», в состав которых включены приборы, разработанные во ФГУП «СНИИМ» (рис. 4). Подобными лабораториями были оснащены организации в городах: Новосибирск, Кемерово, Красноярск, Курган, Астана, Атырау, Алма-Аты (Республика Казахстан), Навои (Республика Узбекистан).





Рис. 4. Вид внутреннего устройства передвижной лаборатории «КЛАН-1» с приборами

Таким образом, разработка и создание во ФГУП «СНИИМ» новых анализаторов качества нефтепродуктов способствовали созданию передвижных мобильных лабораторий мониторинга и контроля качества топлива.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Шувалов Г. В. Метрологическое обеспечение измерений температуры вспышки нефтепродуктов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 155–159.

2 Шувалов Г. В. Методическое и техническое обеспечение экспресс-анализа параметров нефтепродуктов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 152–155.

© Г.В.Шувалов, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ СНИЖЕНИЯ ВРЕМЕНИ НА ПРЕДПРОИЗВОДСТВЕННУЮ СТАДИЮ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### Ольга Владимировна Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)210-95-87, e-mail: grickevich ov@ngs.ru

#### Елена Олеговна Ушакова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики недвижимости, тел. (383)210-95-87, e-mail: eo\_ushakova@mail.ru

Сокращение времени на реализацию проекта по созданию и внедрению в производство технических систем является актуальной задачей для любого предприятия. В статье предлагаются направления, использование которых поможет менеджерам снизить время решения проектных задач и получить полезный эффект за весь жизненный цикл технической системы.

**Ключевые слова:** жизненный цикл, техническая система, предпроизводственная стадия, время, эффективность, виртуальная структура управления, персонал, пакет программного обеспечения, сетевое планирование.

# RESEARCH OF TIME DECREASE METHODS FOR THE PRE-PRODUCTION LIFE CYCLE OF TECHNICAL SYSTEMS

#### Olga V. Gritskevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)210-95-87, e-mail: grickevich\_ov@ngs.ru

#### Elena O. Ushakova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Real Estate Economy, phone: (383)210-95-87, e-mail: eo\_ushakova@mail.ru

Reduction of time forrealization project on creation and implementation of technical systems into industrial process is an actual task for any enterprise. The article offers several methods which are to help managers to decrease time for project tasks solution and get a useful effect for all life cycle of a technical system.

**Key words:** life cycle, technical system, pre-productive stage, time efficiency, virtual structure of management, personnel, software package, network planning.

При высоких темпах ускорения НТП сокращается продолжительность жизненного цикла технических систем. Инновации способствуют более быстрой смене еще не старой, но морально устаревающей техники, на новую. В связи с этим большое значение имеет время, затрачиваемое на предпроизводствен-

ную стадию ее жизненного цикла. Сокращая это время, можно добиться существенного увеличения полезного эффекта за весь жизненный цикл технической системы.

Целью данного исследования является поиск возможностей сокращения времени на прохождение этапов, предшествующих производству, в жизненном цикле технических систем.

Решение проблемы сокращения времени должно начинаться с описания предпроизводственной стадии. Данная стадия включает в себя следующие этапы:

- исследование рыночного спроса на конкретные технические системы;

– генерация идей создания новых технических систем и их отбор по критериям конкурентоспособности;

 исследование технической и экономической составляющих инновационного проекта создания новой технической системы;

- научно-исследовательские разработки по созданию технической системы;

- опытно-конструкторские разработки для ее создания;

– пробный маркетинг;

– подготовка к производству новой технической системы на заводеизготовителе серийной продукции.

Для сокращения времени на предпроизводственную стадию жизненного цикла технических систем в целях их быстрого внедрения в производство, необходимо решить большое количество задач организационно-управленческого характера. Для этого нужно выбрать те направления, реализация которых даст возможности снижения времени на всех этапах предпроизводственной стадии [1, 4, 6, 7].

Одним из важнейших первоочередных направлений является персонал, то есть выбор тех специалистов, которые способны эффективно планировать, организовывать и координировать все работы по разработке и внедрению новых технических систем. В данном случае речь идет о профессионалах в области инноватики и управления проектами.

Следующим направлением и задачей, которая должна быть решена, является оптимизация количества членов проектной группы, занимающейся внедрением новых технических систем. Это позволит снизить затраты ресурсов на предпроизводственную стадию. Структура проектной группы должна отражать структуру тех задач, которые она решает. Если рассматривать профессионально-квалификационные характеристики специалистов в данной группе, то предпочтение должно быть отдано людям с широкой специализацией и высокой квалификацией. Такая группа обязательно должна включать в себя профессиональных менеджеров [2, 3, 5].

Для всех членов проектной группы должны быть разработаны должностные инструкции, содержащие функции, права и обязанности персонала. Основным разделом инструкций является раздел «Функции». Он содержит всестороннюю характеристику тех задач, которые решает конкретный специалист, занимающий определенную должность. Функции специалиста должны быть четко сформулированы. Разработка должностных инструкций для членов этой группы является еще одним направлением, которое нужно рассматривать для ускорения процесса внедрения новых технических систем. Четко сформулированная, не содержащая лишних данных и слов должностная инструкция, помогает специалистам правильно понимать свои обязанности и ответственность за решение поставленной задачи.

Следующее направление – создание эффективной организационной структуры. В данной работе предлагается использовать виртуальную структуру управления, которая, на наш взгляд, лучше соответствует результативному решению проблемы реализации проекта. Виртуальная организация представляет собой объединение бизнес-партнеров, координирующих проектирование, производство и реализацию новых технических систем. Она основана на использовании современных информационных технологий и совокупности договоров между независимыми организациями, каждая из которых выполняет определенный контрактом участок работ. Виртуальные структуры создаются на временной основе и соединяют в единую организацию заказчиков, поставщиков, исполнителей и руководителей проектных работ лишь на время их выполнения. При такой организации управления проектами каждый ее член старается занять соответствующее место в долгосрочной перспективе и поэтому вынужден соответствовать всем требованиям конкурентоспособности выполняемых работ.

Одним из важных направлений решения проблемы сокращения времени является планирование работ по разработке и реализации проекта. Учитывая специфику планирования проектных работ, лучше всего использовать разработку сетевого плана с применением специального программного обеспечения. Графическое представление совокупности реализуемых действий, выполняемых в их логической взаимосвязи в соответствии с планируемым временем и ресурсами, определяется как сетевой план. Такое представление плана как нельзя лучше соответствует всем требованиям реализации проектных задач.

В настоящее время известны ряд программ, использующих сетевое планирование, в качестве метода управления жизненным циклом технических систем. В практической реализации управления проектами могут использоваться различные программные комплексы, которые носят как универсальный, так и специализированный характер. Наиболее приемлемой с точки зрения сочетания характеристик: цена, качество, простота использования, доступность является программа «Microsoft Project».

Данный пакет имеет широкие возможности, которые являются удобными для большей части пользователей знакомых с графическим интерфейсом. «Microsoft Project» делает возможным эффективное решение проблемы управления проектами и временем реализации проектов на всех этапах жизненного цикла технических систем. Пакет позволяет осуществить структуризацию реализуемого проекта на этапы и задачи, выявить критический путь, получить график реализации проекта, распределить ресурсы и решитьдругие задачи управления проектами. Таким образом, в результате проведенного исследования можно выделить те направления, решая которые возможно снижение времени на предпроизводственную стадию жизненного цикла технических систем. К этим направлениям относятся: подбор и обеспечение персонала необходимыми документами для решения поставленных задач, создание виртуальной структуры управления для реализации проектных задач, создание виртуальной структуры управления для реализации проектных задач и использование программного обеспечения типа «Microsoft Project» для планирования и управления проектами. Совместное использование предложенных направлений позволит существенно повысить эффективность управления проектами. А также, решая задачи управления проектами, необходимо использовать те методики менеджмента, которые позволят улучшить координацию работ и усовершенствовать методы управления ими.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астахов С. А., Ширяев А. Н., Воробьёв А. А. Организация управления процессами жизненного цикла изделий узкоспециализированных предприятий // Тренды и управление. – 2015. – № 4. – С. 423–432.

2. Будяга С. На пути к единой среде проектирования // Открытые системы. – СУБД. – 2011. – № 5. – С. 32.

3. Грицкевич О. В., Чуйко А. Н. Разработка методики осуществления координации при внедрении новых технических систем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 63–66.

4. Михеев Ю. В., Морев А. С., Алистарова Н. В. Управление жизненным циклом оборудования. Снижение стоимости эксплуатации и повышение надежности компрессорных станций // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2018. – № 2. – С. 74–79.

5. Парфентьева Г. С., Шабурова А. В. Модели и алгоритмы управления обучением персонала на приборостроительном предприятии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 108–111.

6. Фунг Б. В., Данг М. Х., Гаврюшин С. С. Разработка математической модели для процесса управления жизненным циклом многопильного станка нового типа // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – № 2. – С. 87–109.

7. Яковлев К. А. Анализ основных задач управления на всех этапах жизненного цикла комплекса транспортно-технологических машин // Системы управления и информационные технологии. – 34 (2008). – № 4. – С. 99–103.

© О. В. Грицкевич, Е. О. Ушакова, 2018
## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

## Геннадий Владимирович Шувалов

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, директор, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

## Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Мария Геннадьевна Клековкина

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер, тел. (383)210-12-65

## Татьяна Владимировна Васильева

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер, тел. (383)210-12-65

### Ольга Александровна Ясырова

Омский институт водного транспорта ФГБОУ ВПО «НГАВТ», 644099, Россия, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 2, доцент кафедры физики, тел. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

В статье приведены результаты анализа методического и технического обеспечения экспресс-анализа некоторых параметров нефтепродуктов.

Ключевые слова: нефтепродукты, экспресс-анализ, национальный стандарт.

## METROLOGICAL SUPPORT OF THE EXPRESS ANALYSIS OF PARAMETERS OF OIL PRODUCTS

### Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise «SNIIM», 4, Prospect Dimitrov St., Novosibirsk, 630004, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

## Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Maria G. Klekovkina

Federal State Unitary Enterprise «SNIIM», 4, Prospect Dimitrov St., Novosibirsk, 630004, Russia, Engineer, phone: (383)210-12-65

## Tatjana V. Vasyljva

Federal State Unitary Enterprise «SNIIM», 4, Prospect Dimitrov St., Novosibirsk, 630004, Russia, Engineer, phone: (383)210-12-65

## Olga A. Yasyrova

Omsk Institute FGBOU VPO «NGAVT's» Water Transport, 2, Ivan Alekseev St., Omsk, 644099, Russia, Associate Professor, Department of Physics, phone: (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Results of the analysis of methodical and technical providing the express analysis of some parameters of oil products are given in article.

Key words: oil products, express analysis, national standard.

В 2015-2017 гг. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (далее – Росстандарт) была проведена работа по недопущению в оборот фальсифицированного топлива, поставляемого нефтеперерабатывающими и нефтеснабжающими организациями.

Была создана межведомственная отраслевая рабочая группа по противодействию незаконному обороту продукции нефтяной промышленности под руководством руководителя Росстандарта А.В. Абрамовым.

Одной из задач, поставленных перед этой рабочей группой, является подготовка необходимой нормативно-правовой базы в области производства и реализации продукции нефтяной промышленности, направленной на обеспечение внутреннего российского рынка качественным и соответствующим установленным требованиям сырьем и продукцией.

Для выявления масштабов фальсификации топлива было проверено около 30 тысяч автозаправочных станций, более 2 тысяч нефтебаз, около 240 мининефтеперерабатывающих заводов и 33 крупных нефтеперерабатывающих заводов.

По результатам проверок в таблице представлен уровень нарушений среди A3C в 2015-2017 гг.

Год	2015	2016	2017 январь-май
Проверено АЗС, шт.	3702	1536	103
Выявлены нарушения на АЗС, шт.	1573	274	41
	(42,5 %)	(18 %)	(40 %)
Количество выявленных нарушений по физико-химическим показателям топлива, шт.	717	184	22
	(20 %)	(12 %)	(21 %)

# Нарушения качества топлива среди АЗС

Как видно из таблицы, количество выявленных нарушений значительно, особенно по отклонению физико-химических показателей топлива от установленных норм технического регламента «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту».

В связи с вышеуказанным видно, что актуальным является подготовка необходимой нормативной и технической базы в области контроля качества сырья и продукции нефтяной промышленности.

В этой связи в области совершенствования нормативной базы в 2016 году были разработаны и приняты для применения следующие предварительные национальные стандарты (ПНСТ) Российской Федерации:

- ПНСТ 154-2016 «Нефтепродукты. Восстановление показателей качества»;

- ПНСТ 155-2016 «Нефтепродукты. Применение методов испытаний для подтверждения качества»;

- ПНСТ 156-2016 «Нефтепродукты. Контроль качества при приемке на хранение».

Основным отличием этих стандартов следует считать то, что в них впервые в практику контроля качества нефтепродуктов введено понятие экспрессметодов испытаний и условия применения этих методов для подтверждения качества нефтепродуктов.

Так в ПНСТ 155-2016 экспресс-метод испытаний определен как метод, не регламентированный документом по стандартизации, но позволяющий в короткие сроки провести измерение значений показателя нефтепродукта с установленным уровнем точности с использованием стационарной и/или мобильной (передвижной) лаборатории.

Теперь допускается применять экспресс-методы для получения оперативной информации о качестве нефтепродуктов при приемо-сдаточных испытаниях, при этом применение экспресс-методов должно быть согласовано между поставщиком и потребителем.

Испытания с использованием экспресс-методов для подтверждения качества нефтепродукта проводят в соответствии с требованиями ПНСТ 155-2016.

В испытательных лабораториях, использующих экспресс-методы, должна быть разработана и внедрена система подтверждения (верификации) результатов испытаний, получаемых экспресс-методами. Кроме того, должны быть разработаны документы по стандартизации на экспресс-методы, в которых должны быть установлены: периодичность поверки аппаратуры, порядок подтверждения достоверности результатов, получаемых экспресс-методами, порядок действий при выявлении несоответствующей работы оборудования или получения недостоверных результатов испытаний.

Результаты испытаний экспресс-методами оформляют в виде протокола испытаний.

Результаты испытаний нефтепродуктов, полученные экспресс-методами, можно использовать только для принятия оперативного решения о дальнейшем применении нефтепродукта.

При выявлении экспресс-методом некондиционности нефтепродукта, следует провести повторные испытания по проверяемому показателю с применением стандартизованных методов испытаний.

Не допускается использовать экспресс-методы для подтверждения качества продукции, паспортизации и при разногласиях в оценке качества нефтепродукта.

Экспресс-анализаторы, используемые для проведения испытаний, должны обеспечивать необходимую погрешность (точность) измерения определяемого показателя, а также должны быть поверены или метрологически аттестованы.

Для решения задач экспресс-контроля нефтепродуктов в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (ФГУП «СНИИМ») были разработаны экспресс-анализаторы качества нефтепродуктов для определения механических примесей и содержания воды [1].

Для определения содержания механических примесей в анализаторе СИМ-12 использован оптический метод. Принцип действия прибора основан на регистрации рассеянного оптического излучения инфракрасного диапазона на механических примесях, находящихся в нефтепродукте.



Конструкция анализатора СИМ-12 приведена на рис. 1.

Рис. 1. Экспресс-анализатор механических примесей в нефтепродуктах СИМ-12

Контролируемый нефтепродукт наливают в кювету и помещают ее в первичный преобразователь (ПП), конструкция которого приведена на рис. 2.

Для определения содержания воды в нефтепродуктах разработан экспрессанализатор СИМ-4, предназначенный для измерения массовой доли воды в дизельном топливе, моторных и автотракторных маслах при оперативном контроле их качества.

Метод определения массовой доли воды в нефтепродуктах соответствует ГОСТ 14203-69 «Нефть и нефтепродукты. Диэлькометрический метод определения влажности».



Рис. 2 – Конструкция первичного преобразователя:

1 – основание; 2 – кожух; 3 – кювета; 4 – крышка; 5 – светофильтр; 6 – держатель; 7 – втулка; 8 – светоизлучающий диод; 9 – направляющая; 10 – жгут

Принцип действия экспресс-анализатора основан на емкостном методе измерения относительной диэлектрической проницаемости нефтепродуктов.

Диапазон измерений массовой доли воды в нефтепродуктах от 0,01 до 2,00 %, пределы допускаемой относительной погрешности измерения массовой доли воды в нефтепродуктах  $\pm 10$  %.

Масса анализатора составляет не более 1,8 кг, габаритные размеры измерительного прибора – 210х200х65 мм, что позволяет эффективно использовать экспресс-анализатор в проверочных мероприятиях на АЗС.

Расчет процентного содержания воды в контролируемых нефтепродуктах в зависимости от диэлектрической проницаемости экспресс-анализатор выполняет автоматически и результат измерения индицируется на индикаторе в процентах и граммах на тонну.

Внешний вид анализатора СИМ-4 представлен на рис. 3.

Таким образом, принятые в 2016 году предварительные национальные стандарты (ПНСТ) Российской Федерации для получения оперативной информации о качестве нефтепродуктов допускают применение экспресс-методов. Это позволяет оперативно определять качество нефтепродуктов непосредственно в местах реализации или применения нефтепродуктов.

Для практического применения экспресс-методов могут быть использованы созданные во ФГУП «СНИИМ» приборы для экспресс-анализа некоторых параметров нефтепродуктов.



Рис. 3. Экспресс-анализатор содержания воды в нефтепродуктах СИМ-4

Использование экспресс-методик испытаний приведет к повышению эффективности проверочных мероприятий качества нефтепродуктов и сокращение времени проведения проверок.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экспресс – анализ некоторых параметров нефтепродуктов при их использовании / Г. В. Шувалов, В. Г. Селятицкий, М. Г. Клековкина, Т. В. Васильева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 114–116.

© Г. В. Шувалов, О. В. Минин, И. В. Минин, М. Г. Клековкина, Т. В. Васильева, О. А. Ясырова, 2018

#### УДК 681.7

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ВИДЕОКАМЕР НАНОДРОНОВ

#### Марина Петровна Егоренко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: e\_m\_p@mail.ru

#### Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Для получения комбинированного изображения, рассчитана оптическая система, работающая в трех диапазонах спектра одновременно: ультрафиолетовый, визуальный, ближний инфракрасный. Для повышения коррекционных возможностей оптической системы использованы оптические жидкости между линзовыми и зеркально-линзовыми компонентами.

Ключевые слова: ультрафиолетовый, визуальный и ближний инфракрасный диапазоны спектра, комбинированное изображение, многодиапазонная оптическая система, решение задач наблюдения и разведки, оптические жидкости.

# THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF LIQUIDS IN OPTICAL SYSTEMS FOR CAMERAS ANDRONOV

### Marina P. Egorenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior lecturer, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-91-11,e-mail: e\_m\_@mail.ru

### Viktor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail

To obtain a combined image, an optical system is calculated, operating in three spectral ranges simultaneously: ultraviolet, visual, near infrared. Optical liquids between lens and mirror-lens components were used to improve the correction capabilities of the optical system.

**Key words:** ultraviolet, visual and near infrared spectral ranges, combined image, multi-band optical system, solution of observation and reconnaissance tasks, optical liquids.

Нанодроны – беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для решения разных задач в интересах военных и гражданских пользователей – для оперативного проведения аэрофотосъемки, радиовещания, поисковоспасательных работ, разведки и наблюдения, поддержания правопорядка и т. д. БПЛА отличаются большим разнообразием, их конструкция и размеры зависят от задач, для которых они предназначаются. В процессе разработки и модернизации сверхлегких беспилотных летательных аппаратов произошло функциональное разделение видеокамер на FPV – камеры, выполняющие задачи управления полетом (навигации), и наблюдательные, выполняющие задачи мониторинга и разведки.

Разработка оптической системы видеокамеры нанодрона проводилась для задач тактической разведки, поэтому важным было получить максимальное разрешение на дистанциях до 100 м при минимальных габаритах видеокамеры.

Масса сверхлегких беспилотных летательных аппаратов не превышает 50-100 г. Исходя из этого, масса объектива не должна превышать более 1/4 массы всего БПЛА, т.е. быть не более 10–20 гг. Поэтому, для изготовления оптических деталей необходимо выбирать оптические материалы с наименьшей удельной плотностью.

Одним из таких оптических материалов является полистирол (ПС) – это один из легких полимеров (плотность –от 0,902 до 1,04 г/см<sup>3</sup>). Он прозрачен в ультрафиолете, видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Его показатель преломления1,59 – 1,60[1].

Основная цель работы состояла в увеличении угла поля зрения оптической системы. Для этого требовалось увеличение коррекционных параметров объектива. Увеличение коррекционных параметров обеспечило заполнение пространства между линзовыми и зеркально-линзовыми компонентами оптической жидкостью с разными показателями преломления (таблица) [2].

Пространство между компонентами	Шифр жидкости	n <sub>D</sub>	$v_D$
1-2, 2-3, 3-4	Gargille S1050 67%	1,4000	52
4 - 5	GargilleS1050 73%	1,4250	54

Некоторые свойства оптических жидкостей

Для моделирования в пакете оптических программ «Zemax» была выбрана многодиапазонная зеркально-линзовая оптическая система (МЗЛО), выполненная из одного оптического материала [3]. Методика расчета приведена в работах [4, 5].

Исходная оптическая система имела следующие характеристики: f = 10 мм, D/f' = 1:1,5, угол поля зрения 5°, размер пиксела матрицы 4×4 мкм.

После компьютерного моделирования была получена оптическая система, представленная на рис. 1.

Качество изображения, характеризуемое концентрацией энергии в пикселе ПЗС матрицы размером 4×4 мкм для ультрафиолетового и видимого диапазонов спектра ( $\Delta\lambda$ =0,365-0,656 мкм) и для ближнего инфракрасного диапазона спектра ( $\Delta\lambda$ =0,589-0,9 мкм) приведено на рис. 2.



Рис. 1. Многодиапазонный зеркально-линзовый объектив:

1 – положительная линза, выполненная в виде мениска; 2 – отрицательный мениск (зеркало Манжена); 3 – зеркало с наружным отражением, совмещенное со второй поверхностью положительной линзы 1; 4 – компенсатор полевых аберраций – линза Пиацци-Смита



Рис. 2. Графики концентрации энергии в пикселе 4×4 мкм: *а*) ультрафиолетовый и видимый диапазон спектра; *б*) ближний инфракрасный диапазон спектра

Рассчитанный объектив имеет следующие характеристики: f = 10 мм, D/f' = 1:1,5, угол поля зрения 24°,в пикселе матричного фотоприемного устройства 4×4 мкм концентрируется до 80 % энергии.

В результате компьютерного моделирования объектива для ультрафиолетового, визуального и ближнего ИК-диапазонов спектра с заполнением пространства между линзами оптическими жидкостями удалось увеличить угол поля зрения до 24 градусов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bäumer Stefan, Handbook of Plastic Optics, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2005, s.189.

2. Marvin J. W., Handbook of Optical Materials / Marvin J. Weber - CRC PRESS - 2003.

3. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Пат. № 98072 Российской Федерации на полезную модель МПК<sup>4</sup>G02B 17/00; Двухспектральная зеркально-линзовая система; заявитель и патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. - № 2010108755/22(012273); заявл. 09.03.10; опубл.27.09.10.

4. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркальнолинзового объектива // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 65–69.

5. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – № 6. – С. 53–58.

© М. П. Егоренко, В. С. Ефремов, 2018

# МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БИО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

## Геннадий Владимирович Шувалов

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, директор, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

## Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Владимир Михайлович Генералов

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор», 630559, Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 25-22), e-mail: general@vector.nsr.ru

## Маргарита Витальевна Кручинина

Научно-исследовательский институт терапии и профилактической медицины СО РАН. 630089, Россия, Новосибирск, ул. Б. Богаткова, 175/1, доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гастроэнтерологии, тел. (913)728-17-02, e-mail: kruchmargo@yandex.ru

### Александр Сергеевич Сафатов

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор», 630559, Россия, Новосибирская область, р.п. Кольцово, доктор технических наук, зав. отделом биофизики и экологических исследований, тел. (383)363-47-00 (доб. 26-20), e-mail: safatov@vector.nsc.ru

В статье рассмотрены вопросы метрологического обеспечения био- и нанотехнологий.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, биотехнологии, нанотехнологии.

# METROLOGICAL SUPPORT OF BIOT- AND NANOTECHNOLOGIES

### Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise «SNIIM», 4, Prospect Dimitrov St., Novosibirsk, 630004, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

## Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

## Vladimir M. Generalov

Federal Budgetary Research Institution "State Research Center of Virology and Biotechnology «Vector», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Koltsovo, Novosibirsk region, 630559, Russia, D. Sc., Leading Scientist, Department of Biophysics and Ecological, phone: (383)363-47-00 (add. 25-22), e-mail: general@vector.nsr.ru

## Margarita V. Kruchinina

Research Institute of Internal and Preventive Medicine – Branch of the Institute of Cytology and Genetics SB RAS, 175/1, B. Bogatkova St., Novosibirsk, 630089, Russia, D. Sc., Leading Scientist, Gastroenterology Laboratory, phone: (913)728-17-02, e-mail: kruchmargo@yandex.ru

### Alexander S. Safatov

Federal Budgetary Research Institution "State Research Center of Virology and Biotechnology «Vector», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Koltsovo, Novosibirsk region, 630559, Russia, D. Sc., Head of Department of Biophysics and Ecological, phone: (383)363-47-00 (add. 26-20), e-mail: safatov@vector.nsc.ru

In article questions of metrological support bio – and nanotechnologies are considered.

Key words: metrological support, biotechnologies, nanotechnologies.

Успешное освоение био- и нанотехнологий невозможно без подготовленной измерительной инфраструктурной и нормативно-методической базы.

В этой связи на базе Сибирского государственного научно-исследовательского института метрологии (ФГУП «СНИИМ») был создан Центр метрологического обеспечения нанотехнологий в Сибирском федеральном округе и проводятся работы по решению этих задач совместно с рядом учреждений СО РАН, Росстандарта и Роспотребнадзора.

Одно из направлений Центра - разработка эталонной установки для измерения электрической поляризуемости биологических частиц и клеток крови (эритроцитов) для метрологического обеспечения биотехнологий.

Цель этой работы – обеспечение единства измерений электрической поляризуемости биологических частиц и клеток крови (эритроцитов).

Актуальность данной работы заключается в том, что клетки крови (эритроциты) обеспечивают транспорт кислорода в организме. Различные вирусные и другие заболевания сказываются на способности эритроцита проникать в капилляры и, как следствие, приводят к нарушению кислородного обмена в органах и тканях. В итоге возникают условия для таких серьезных заболеваний как инфаркт миокарда, ишемия, инсульт, некроз, атеросклероз, тромбоз и др. Наличие вирусных и других заболеваний можно определить по изменению электрической поляризуемости эритроцитов [1-13]. Для измерения электрической поляризуемости клеток крови в клинической практике Федеральным государственным учреждением науки «Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» (ФГУН ГНЦ ВБ «ВЕКТОР») используются измерительные комплексы для измерения электрической поляризуемости эритроцитов, которые метрологически не обеспечены, в связи с тем, что до настоящего времени не разработаны эталонные средства измерений электрической поляризуемости биологических частиц и клеток, в том числе эритроцитов крови (рис. 1).



Рис. 1. Проведение измерений электрической поляризуемости эритроцитов

В этой связи была разработана эталонная установка для измерения электрической поляризуемости биологических частиц и клеток крови (эритроцитов) для метрологического обеспечения биотехнологий (рис. 2).

Оценка составляющих стандартной неопределенности эталонного измерительного комплекса для определения поляризуемости биологических частиц (эритроцитов) по типу В приведена в табл. 1.

Таким образом, стандартная неопределенность по типу B, uB, % отн. составляет 14 %.

Стандартную неопределенность результата единичного измерения по типу А оценивают по формуле

$$UA = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{cp})^2}$$
(1)

Метрологические характеристики разработанного опытного образца эталона для измерения величины поляризуемости биологических частиц приведены в табл. 2.







Рис. 2. Эталонный измерительный комплекс для определения поляризуемости биологических частиц (эритроцитов):

а) конструкция измерительной ячейки установки для измерения электрической поляризуемости биологических частиц и клеток крови: 1 – основание; 2 – электрод 2; 3 – прижим; 4 – электрод; 5 – шайба электрода 3; 6 – предметное стекло; 7 – электрод 3; 9 – винт; б) эталонная установка «БИОЭЛ» на основе микроскопа Olympus CX41RF и видеокамеры EE5100M

Таблица 1

Входная величина	Значение	Погрешность	Станд. отн. неопреде- леность, %	Коэф- фициент влияния	Станд. неопреде- ленность с коэфф. влиян., %	Вклад станд. неопред. в суммарную, %
Радиус	(2-10) мкм	0,5 мкм	3 - 12	1	12	75
Вязкость	1 мПа∙с	0,003 мПа·с	0,17	1	3	5
Скорость	(0,5-25) мкм/с	(0,015- 0,075) мкм/с	1,7	1	1,7	2
Градиент квадрата напряженности электрического поля	(105-106) В/м	(2·103 - 2·104) В/м	1,1	3	3,3	7
Температура	(20-24) °C	4°C	12	0,4	4,8	11

Составляющие стандартной неопределенности по типу В

# Метрологические характеристики разработанного опытного образца эталона

Наименование характеристик	Значение
Диапазон измерения объемной поляризуемости, м <sup>3</sup>	от 10-14 до 10-16
Стандартная неопределенность по типу A, uA, % отн.	3
Стандартная неопределенность по типу B, uB, % отн.	14
Суммарная стандартная неопределенность, ис, % отн.	15
Расширенная неопределенность, Uo, % отн. (k=2)	30

Кроме того, на базе Сибирского государственного научно-исследовательского института метрологии был создан Центр метрологического обеспечения нанотехнологий в Сибирском федеральном округе, основной целью которого является обеспечения единства измерений (включая информационнотехническое) на предприятиях в регионе. Создание и практическая деятельность Центра метрологического обеспечения нанотехнологий в Сибирском федеральном округе показало высокую эффективность такой организационной формы развития инфраструктуры при решении задач метрологического обеспечения био- и нанотехнологий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Verpoorte E. Microfluidic chips for clinical and forensic analysis // Electrophoresis. 2002. V. 23, № 5. P. 677-712.

2. Landers J. P. Molecular Diagnostic Analysis Using Electrophoretic Microchips. // Anal. Chem. 2003. v. 75, № 12. p. 2919-2927.

3. Morkoç H., Özgür Ü. Zinc oxide fundamentals. Materials and device technology. – Weinheim: Wiley-VCH, 2009. 488 p.

4. Серхачева Н. С. Синтез композитных микросфер на основе полистирола и наночастиц оксида цинка: магистр. дис. – М. : МИТХТ, 2011. – 110 с.

5. Dazhi S., Minhao W., Luyi S., Yuntao L., Nobuo M., Hung-Jue S. Purification and stabilization of colloidal ZnO nanoparticles in methanol //J. Sol-Gel Technol. 2007. V. 43. P.237-243.

6. Matei A., Cernica I., Cadar O., Roman C., Schiopu V. Synthesis and characterization of ZnO - polymer nanocomposites //Int. J. Mater Form. 2008. V. 1. P. 767-770.

7. Hong R., Pan T., Qian J., Li H. Synthesis and surface modification of ZnO nanoparticles // Chem. Eng. J. 2006. V. 119. P. 71-81.

© Г. В. Шувалов, И. В. Минин, О. В. Минин, В. М. Генералов, М. В. Кручинина, А. С. Сафатов, 2018

## ДВУХСПЕКТРАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВИДЕОКАМЕР НАНОДРОНОВ-КВАДРОКОПТЕРОВ

#### Марина Петровна Егоренко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: e\_m\_p@mail.ru

#### Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Рассчитана оптическая система, которая работает в двух диапазонах спектра (ультрафиолетовом и визуальном) для получения комбинированного изображенияодновременно в этих двух диапазонах.

Ключевые слова: нанодрон-квадрокоптер, ультрафиолетовый и визуальный диапазоны спектра, комбинированное изображение, двухдиапазонная оптическая система, решение задач тактической разведки.

## TWO-SPECTRAL OPTICAL SYSTEM FOR VIDEO CAMERAS NANODRONS-QUADCOPTERS

#### Marina P. Egorenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior lecturer, Department of Photonics and Instrumentation, phone: (383)343-91-11, e-mail: e\_m\_p@mail.ru

### Viktor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor of the Department of Photonics and Instrumentation, phone: (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail

An optical system that operates in two spectral bands (ultra violet and visual) to produce a combined image simultaneously in these two bands is calculated.

Key words: nanodron-quadcopter, ultraviolet and visible spectral ranges, combined image, dual band optical system, solution of tasks of tactical intelligence.

Нанодроны – квадрокоптеры используют сотрудники военных и гражданских организаций для мониторинга оперативной аэрофотосъемки, радиовещания, поисково-спасательных работ, тактической разведки, поддержания правопорядка и других задач.

В последние годы уделяется большое внимание модернизации сверхлегких квадрокоптеров, используемых в интересах тактической разведки (рис. 1) [1–3].



Рис.1. Нанодрон PD-100 BlackHornet

Масса сверхлегких квадрокоптеров не превышает 50–100 г. Исходя из этого, масса объектива не должна составлять более 1/4 массы всего нанодрона, т.е. быть не более 15–25 г. Поэтому, для изготовления оптических деталей объектива необходимо использовать оптические материалы с наименьшей удельной плотностью.

Рассчитанная оптическая система выполнена из пластика марки ПС – это сверхлегкий полимер (плотность – от 0,902 до 1,04 г/см<sup>3</sup>). Пластик прозрачен в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра. Показатель преломления материала  $n = 1,59 \div 1,60[4]$ .

Для моделирования оптической системы в пакете прикладных программ «Zemax» была выбрана оптическая схема двух спектральной зеркальнолинзовой системы [5]. В этой системе происходит частичная взаимная компенсация хроматических аберраций между положительной линзой 1 и зеркалом Манжена 2. Для более полной компенсации аберраций в схему объектива после системы зеркал вводится дополнительный компенсатор 4–6 (или 4–7) из того же оптического материала (рис. 2).



Рис. 2. Двухдиапазонная зеркально-линзовая система:

1 – положительная линза, выполненная в виде мениска; 2 - отрицательный мениск (зеркало Манжена); 3 - зеркало с наружным отражением, совмещенное со второй поверхностью положительной линзы 1; 4 - компенсатор аберраций, выполненный расклеенным из отрицательной линзы, являющейся центральной частью отрицательного мениска 2; 5 – спектроделительное зеркало; 6 и 7 – линзы Пиацци-Смита

Методика расчета приведена в работах [6, 7]. Качество изображения оптической системы в двух спектральных диапазонах может характеризовать концентрация энергии в пикселе ФПУ размером 4×4 мкм для ультрафиолетового диапазона спектра ( $\Delta\lambda$ =0,3-0,486 мкм) и для визуального диапазона спектра ( $\Delta\lambda$ =0,486-0,555 мкм) приведены на рис. 3.



Рис. 3. Графики концентрации энергии в пикселе 4×4 мкм: *а*) ультрафиолетовый диапазон спектра; *б*) визуальный диапазон спектра

Разработанная система имеет следующие оптические характеристики: f = 10 мм, D/f' = 1:1,5, угол поля зрения 10°, размер пиксела ПЗС матрицы 4×4 мкм.

Дальнейшая оптимизация электронной обработки изображений позволит получить комбинированное изображение двух диапазонов спектра: ультрафиолетового и визуального.

В заключении следует отметить, что результаты моделирования единой оптической системы для ультрафиолетового и визуального диапазонов спектра показывают принципиальную возможность разработки объективов видеокамер нанодронов для систем мониторинга.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. PD-100 BlackHornet [Электронный ресурс] / Режим доступа : http://www.popmech.ru/images/upload/article/hornet\_1360070424\_full.jpg

2. Zano [Электронный ресурс] / Режим доступа : https://appstudio.org/accessories/zano-megapopulyarnyj-nano-dron.html

3. [Электронный ресурс] / Режим доступа : https://rc-like.ru/kvadrokopter-hubsan-h111d-fpv.

4. MoriakiWakaki, KeieiKudo, TakehisaThibuya. Physical Properties and Data of Optical Materials [Электронная книга] : CRC Press, 2007. – 576 с.

5. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Пат. № 98072 Российской Федерации на полезную модель МПК<sup>4</sup>G02B 17/00; Двухспектральная зеркально-линзовая система; заявитель и патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – № 2010108755/22(012273); заявл. 09.03.10; опубл.27.09.10.

6. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркальнолинзового объектива // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 65–69.

7. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – № 6. – С. 53–58.

© М. П. Егоренко, В. С. Ефремов, 2018

## КОМПЕНСАЦИЯ ЭФФЕКТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДРЕЙФОВ АНТЕННОГО ПОЛЯ ФГУП СНИИМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

#### Александр Сергеевич Толстиков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

#### Анна Вадимовна Блукке

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, тел. (952)947-48-79, e-mail: anyablukke@yandex.ru

В статье показана актуальность повышения точности ГНСС измерений при решении штатных задач ГСВЧ ФГУП «СНИИМ». Повышение точности решения этих задач обеспечивается путем контроля дрейфа антенного поля и применения поправок, компенсирующих этот дрейф.

Ключевые слова: ГНСС, повышение точности, RTKPOST, дрейф сооружений, режим кинематики в относительном методе, метод PPP, компенсирующая поправка.

## COMPENSATION OF EFFECTS OF TEMPERATURE GRAFOV ANTENNA FIELD OF THE FSUE SNIIM BASED ON THE USE OF SATELLITE NAVIGATION TECHNOLOGIES

### Alexander S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)210-11-85, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

### Anna V. Blukke

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, phone: (952)947-48-79, e-mail: anyablukke@yandex.ru

The article shows the relevance of improving the accuracy of GNSS measurements in the solution of standard tasks SSTF FGUP «SNIIM». Improving the accuracy of these tasks is provided by controlling the drift of the antenna field and the use of amendments, compensating this drift.

**Key words:** GNSS, improving the accuracy, RTKPOST, drift of the structures, mode of kinematics in the relative method, method PPP, a compensating amendment.

В метрологическом пункте ГСВЧ ФГУП «СНИИМ» выполняется ряд штатных задач Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли, использующих результаты ГНСС измерений. Это:

- высокоточные координатно-временные измерения для целей определения параметров вращения Земли;

- сравнения шкал времени пространственно-разнесенных эталонов единиц времени и частоты на основе спутниковых навигационных технологий;

- контроль параметров навигационного поля ГЛОНАСС и GPS;

- координатно-временные измерения для широкозонных систем дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ).

Исходными данными для решения перечисленных задач являются результаты траекторных измерений, выполняемых в ФГУП «СНИИМ» по орбитальным группировкам навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS.

Важным условием обеспечения высокой точности и достоверности решений перечисленных задач ГСВЧ является знание с высокой точностью координат антенных модулей и используемых приемников навигационных сигналов.

Исследования показали, что антенное поле ФГУП «СНИИМ» испытывает дрейфы в пределах 2-3 см в плане по причине температурных деформаций корпуса №1 СНИИМ, на крыше которого размещено антенное поле приемников ГНСС сигналов.

Это обстоятельство делает актуальным задачу оценивания величины этих деформаций и применения определенных таким образом поправок для компенсации дрейфов антенного поля СНИИМ.

Ранее был проведен эксперимент с обработкой суточных данных для определения деформаций антенного поля ФГУП «СНИИМ». Были использованы следующие станции: базовая – НАП «NOVM» (ФГУП «СНИИМ»), «роверная» - НАП «NVSK» (Академгородок). На пункте NOVM используется приемник JPS LEGACY 2.6.0, антенна - JPSREGANT\_SD\_E1 NONE. На пункте NVSK приемник - TRIMBLE 4700, антенна - TRM33429.00+GP. Расстояние между пунктами составляет около 27 км, оба приёмника – двухчастотные.

На рис. 1 представлен анализ полученных данных, который показал дрейф контролируемого пункта с погрешностью 2-3 см.



Рис. 1. Оценка перемещений форового центра антенны в режиме кинематики

Полученные данные стали отправной точкой для дальнейших экспериментов по установлению величины дрейфа здания «СНИИМ», а также введения в расчеты полученной величины в качестве компенсирующей поправки. Для оценки чувствительности технологии RTK на антенном поле СНИИМ был проведен эксперимент по смещению антенны TPSCR3\_GGD на заданное расстояние. Для реализации данного эксперимента была изготовлена пластина толщиной 0,5 см и желобом длиной в 10 см, что позволило сместить антенну на данное расстояние.

Цель – подтвердить точность полученных результатов в ходе обработки суточных данных в ПО RTKPOST.

Условия эксперимента:

- Смещение антенны составило 10 см в плане и 0,5 по высоте;
- Скорость ветра 2 м/с;
- Видимость спутников от 2 до 7;
- В обработке использованы быстрые эфемериды;
- Взяты данные за 17, 18, 19 сентября;
- Обработка выполнена в ПО RTKPOST.

На рис. 2 показаны результаты совместной обработки суточных данных за 18.09 – 19.09.



Рис. 2. Результаты обработки суточных данных за 18.09 – 19.09 с принудительным смещением фазового центра антенны

Зафиксировано смещение антенны на 9,5 см на Восток и 4 см на Юг.

$$D_{AB} = \sqrt{9,5^2 + 4^2 + 0,5^2} \sim 10,32$$
 см.

Модуль вектора составил 10,32 см, что полностью соответствует условиям задачи.

При обработке был использован метод PPP (PrecisePointPositioning) – это метод получения высокоточных координат в плане и по высоте местности сантиметровой точности, с помощью глобальных навигационных систем. Для устранения основных ошибок, которые происходят при фазовых GPS-измерениях, используются истинные значения эфемерид и поправок часовых спутников. Результаты, полученные данным методом, также соответствуют условиям эксперимента и заявленной точности, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Направление	Смещение
Восток (Е)	9,5 см
Юг (S)	3,5 см
Высота	0,5 см

$$D_{AB} = \sqrt{9,5^2 + 3,5^2 + 0,5^2} \sim 10,13$$
 см.

Модуль вектора смещения фазового центра составил 10,13 см.

Был проведен эксперимент с использованием метода относительного позиционирования в режиме кинематики. Целью эксперимента было установить факт и саму величину деформации антенного поля СНИИМ, вызванной неоднородным нагревом западной стены первого корпуса СНИИМ, на котором развернуто антенное поле. Постобработка проводилась при помощи программы «RTKpost».

В качестве «ровера» использовался НАП «NOVM» (ФГУП «СНИИМ»), а в качестве базы НАП «NSKW» («СГУГИТ»). Расстояние между пунктами составляет 5,6 км, оба приёмника – двухчастотные. Использовались суточные данные за 17.06.2017 – 18.06.2017. Приведены результаты обработки на разных временных интервалах, учитывалось время восхода и захода Солнца, а также его время нахождения в зените.

На пункте NOVM используется приемник JPS LEGACY 2.6.0, антенна - JPSREGANT\_SD\_E1 NONE. На пункте NSKW приемник - LEICA GRX1200GGPRO 8.71/3.822, антенна - LEIAX1202GG. На рис. 3 представлена схема расположения пункта NOVM.



Рис. 3. Расположение пункта NOVM

Обработка проведена в относительном методе в режиме «Кинематика» на основе фазовых измерений на частотах L1, L2.

Использовалась высокоточная ЭВИ в виде файлов в формате SP3, которую вычисляет и публикует «Информационно Международная служба ГНСС

(IGS)». В обработку включены Final – ЭВИ (Файлы SP3 из IGS содержат ЭВИ только для GPS).

Все решения выполнялись с отсечкой в 15° в двухсистемном режиме (GPS + ГЛОНАСС). Установлено, что обработка без ГЛОНАСС не дает видимых отличий.

В качестве интервалов испытания были выбраны следующие временные отрезки: 00:00:00 - 05:00:00, 05:00:00 - 13:00:00, 13:00:00 - 14:00:00, 14:00:00 - 22:00:00, а также проведена суточная обработка.

Ниже представлены скриншоты обработки в программе «RTKpost» (рис. 4).



Рис. 4. Суточные данные за 17.06 (слева) и 18.06 (справа)

В табл. 2 представлены результаты обработки данных на каждом временном интервале.

Таблица 2

	Модуль вен	стора (мм)
Интервал:	17.06	18.06
00:00-05:00	1 CB	4↓Ю
05:00-13:00	2,2 ЮЗ	4.1IOB
13:00-14:00	4 CB	8.5←3
14:00-22:00	2,2→B	1 CB

В результате эксперимента установлено, что наибольшие смещения всего антенного поля СНИИМ наблюдаются в период с 5:00 до 14:00 в пределах 8,5 мм. Эти результаты оценивания деформации и следует применять в виде поправки для компенсации дрейфа антенного поля СНИИМ.

На основе результатов проведенных исследований в ФГУП «СНИИМ» разрабатывается методика компенсации дрейфов антенного поля на крыше корпуса № 1 для целей повышения точности решения основных задач ГСВЧ.

Эта методика в полной мере может быть применена для мониторинга деформаций ответственных инженерных объектов для предотвращения техногенных катастроф.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применения в геодезии, 2004. – 355 с.

2. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том I, II, 2006. – 334 – 360 с.

3. Проблемы обеспечения точности координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС/технологий / А. С. Толстиков, Ю. В. Сурнин, В. А. Ащеулов, К. М. Антонович // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 3–11.

© А. С. Толстиков, А. В. Блукке, 2018

# ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ АПЕРТУРЫЙ СИНТЕЗ В ТОМОГРАФИИ

### Валерий Павлович Ющенко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (903)939-82-12, e-mail: jwp@aport2000.ru

### Владимир Андреевич Блинов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, студент кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (983)133-50-47, e-mail: vladimir.b.a.95@yandex.ru

### Владимир Николаевич Легкий

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, зав. кафедрой автономных информационных и управляющих систем, тел. (383)346-26-23, e-mail: legkij@corp.nstu.ru

### Сергей Алексеевич Литвиненко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, инженер кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (913)906-90-24, e-mail: litvinenko@corp.nstu.ru

### Любовь Васильевна Шебалкова

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, ст. преподаватель кафедры автономных информационных и управляющих систем, тел. (903)997-67-18, e-mail: sniios@mail.ru

Рассмотрена возможность использования апертурного синтеза в томографии. Рассматривается реконструкция изображения предметов на акустических ультразвуковых волнах при зондировании объектов монохроматическим сигналом в водной среде. Для реконструкции изображения используется фокусировка синтезированной апертуры при перемещении объекта относительно локационного датчика (локатора) в воде по прямолинейной траектории. Показано влияние поверхностной волны на результаты реконструкции изображения. Отмечены достоинства и недостатки метода. Показаны результаты эксперимента и моделирования, подтверждающие работоспособность метода. Предлагается применять предложенный подход в системах ближней локации в оптическом и радиодиапазоне для обнаружения, селекции и распознавания объектов на фоне реальной поверхности.

Ключевые слова: прямолинейный апертурный синтез, реконструкция изображения, ультразвук, монохроматический зондирующий сигнал, траекторный сигнал, томография.

# **RECTILINEAR APERTURY SYNTHESIS IN TOMOGRAPHY**

### Valery P. Yushchenko

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, Department of Autonomous Information and Operating Systems, phone: (903)939-82-12, e-mail: jwp@aport2000.ru

#### Vladimir A. Blinov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student, Department of Autonomous Information and Operating Systems, phone: (983)133-50-47, e-mail: vladimir.b.a.95@yandex.ru

#### Vladimir N. Legky

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Head of Department of Autonomous Information and Control Systems, phone: (383)346-26-23, e-mail: legkij@corp.nstu.ru

#### Sergey A. Litvinenko

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Research Engineer, Department of Autonomous Information and Operating Systems, phone: (913)906-90-24, e-mail: litvinenko@corp.nstu.ru

#### Lyubov V. Chebelkova

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior Lecturer, Department of Autonomous Information and Control Systems, phone: (903)997-67-18, e-mail: sniios@mail.ru

The possibility of use of aperture synthesis in a tomography is considered. Reconstruction of the image of objects on acoustic ultrasonic waves when sounding objects is considered by a monochromatic signal in the water environment. For reconstruction of the image focusing of the synthesized aperture when moving object of rather locational sensor (locator) in water on a rectilinear trajectory is used. Influence of a superficial wave on results of reconstruction of the image is shown. Method merits and demerits are noted. The results of experiment and modeling confirming operability of a method are shown. It is proposed to apply the proposed approach in near-location systems in the optical and radio bands for the detection, selection and recognition of objects on the background of the real surface.

**Key words:** rectilinear aperture synthesis, ultrasound, the monochromatic probing signal, reconstruction of the image, a trajectory signal, tomography.

Апертурный синтез широко используется в науке и технике [1-4]. На данный момент он применяется в таких областях, как: картографирование земной поверхности, картографирование поверхности океанов, определение мест зарождения волн, ветров и течений, картографирование дна морей и океанов, томография ионосферных слоев, определение геодинамических эффектов, создание систем радиовидения, обнаружение, селекция и распознавание объектов на фоне морской или земной поверхности (системы ближней локации с многоэлементными антеннами) [5-7], контроль над разливами нефти. Это показывает популярность применения метода синтезированной апертуры и его большие возможности.

С 1983 года предпринимаются попытки использовать апертурный синтез в томографии [1]. Не стоит забывать, что томография – это очень специфическая область апертурного синтеза, особенность заключается в том, что синтез апертуры осуществляется на малой дальности от исследуемого объекта. В этом случае можно очень эффективно использовать фокусировку синтезированной апертуры для получения радиального разрешения, что невозможно в задачах дальней локации.

Предполагается отказ от импульсного зондирующего сигнала, несмотря на то, что импульсные сигналы обладают радиальным разрешением. Их недостаток в том, что при распространении в дисперсионной среде, к которой относятся ткани человека, возникают дисперсионные искажения, не дающие построить чёткого изображения объекта. Сущность дисперсионных искажений в том, спектральные компоненты импульса распространяются в дисперсионной среде с разными скоростями. Следствием этого является не одинаковая задержка спектральных компонент, что приводит к размыванию отражённого импульса.

Реализовать радиальное разрешение при монохроматическом зондировании возможно как при синтезе апертуры антенны при движении локатора вблизи объекта по прямолинейной траектории с постоянной известной скоростью, так и при движении локатора по круговой траектории вокруг объекта. В обоих случаях возможна фокусировка синтезированной апертуры на заданную дальность. Фокусировка позволяет локализовать отдельные точки (области объекта) и измерить интенсивность отражения зондирующей волны от локализованных областей. При этом зондирование осуществляется монохроматической волной, не дающей дисперсионных искажений.

Суть сбора данных для реконструкции состоит в том, что нужно реализовать перемещения антенны локатора и объекта относительно друг друга. При этом нет принципиальной разницы, что конкретно будет перемещаться – локатор или объект. В результате этого перемещения регистрируется траекторный доплеровский сигнал. Этот траекторный сигнал несёт полную информацию об объекте, а если волна проникает вовнутрь объекта, то тогда она содержит информацию о внутренней структуре объекта.

Реконструкция изображения объекта по траекторному доплеровскому сигналу осуществляется следующим методом. Чтобы восстановить изображение внутренней структуры объекта, сначала требуется зарегистрировать траекторный сигнал от томографируемого объекта (рис. 1).



Рис. 1

Чтобы осуществить обработку объектного траекторного сигала, нужно организовать управление фокусным расстоянием синтезированной апертуры. Это делается с помощью опорных траекторных сигналов от точечных объектов, которые рассчитываются компьютером в реальном масштабе времени или заранее, согласно выражения (1). Смысл символов, входящих в выражение (1), можно понять из рис. 2, поясняющего геометрию сбора данных, то есть регистрацию траекторного сигнала.

$$f_o(t) = \frac{1}{(vt - C_a/2)^2 + y_i^2} \exp(j\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{(vt - C_a/2)^2 + y_i^2}).$$
 (1)



Рис. 2

Обозначения: t – время, v – скорость движения локатора (приёмника с излучателем),  $f_0(t)$  – траекторный сигнал от опорной точки,  $C_a$  – длина синтезированной апертуры,  $y_i$  – конкретный промах опорной точки.  $x_i$  – положение конкретной опорной точки на траектории.

Опорные точки, с помощью которых рассчитываются опорные траекторные сигналы, располагаются на разном промахе  $y_i$  по отношению к прямолинейной траектории движения локатора с антеннами с некоторым шагом, перекрывая всё томографируемое пространство. Опорный траекторный сигнал представлен на рис. 3.



Рис. 3

Затем находятся корреляционные функции объектного траекторного сигнала с каждым опорным сигналом. Полученный набор корреляционных функций располагают в координатах промаха и расстояния вдоль траектории. Расположение каждой корреляционной функции на координатной плоскости должно строго соответствовать промаху, для которого был сформирован опорный сигнал. Каждая корреляционная функция является функцией времени. Чтобы перейти от корреляционной функции времени к пространственной координате, то есть к расстоянию вдоль траектории достаточно время умножить на скорость перемещения локатора.

Выбор среды и типа зондирующей волны.

При выборе типа волны надо исходить из формулы, известной в литературе как предел Релея.

#### $\Delta l = \lambda / 5$

Она устанавливает связь пространственного разрешения  $\Delta l$  с длиной волны  $\lambda$ . Оптическая волна не подходит для томографии с применением апертурного синтеза. Она позволяет получить высокую разрешающую способность без апертурного синтеза, но главный недостаток её в том, что она не проникает в тело человека. Электромагнитные волны также мало подходят для томографии. Причина отказа от них в том, что волны короче 3 см. практически не проникают в ткани человека. Кроме того, из-за большой разности диэлектрических проницаемостей на границе воздуха и ткани будут сильные отражения и значительные преломления электромагнитного луча. Существует возможность использования апертурного синтеза при реконструкции изображения предметов на акустических ультразвуковых волнах при зондировании объектов монохроматическим сигналом в водной среде. В этом случае для реконструкции изображения объекта используется фокусировка синтезированной апертуры при перемещении локатора в воде относительно объекта.

Использование ультразвукового диапазона обусловлено возможностью выполнить противоречивые требования – глубина зондирования в реальной среде и разрешающая способность системы, к тому же возможностью исключить вредные воздействия на живой организм, присущее СВЧ излучению.

Синтез апертуры связан с перемещением объекта относительно локатора. При микроскопических размерах объекта, его перемещение относительно неподвижного локатора можно оправдать, но если объект имеет достаточно значительные габариты, то его перемещение в воде вызовет поверхностные волны, что впоследствии скажется на результатах реконструкции изображения.

Чтобы продемонстрировать, как отражения от поверхностной волны повлияют на конечный результат реконструкции изображения, возьмем в качестве томографируемого объекта тонкую металлическую проволочку, диаметр которой равен 1 мм. В этом случае сигнал, который будет отражен от поверхностной волны, будует преобладать над сигналом, отраженным от проволочки (рис. 4, *a* и рис. 4, *c*). На рис. 4, *b* и 4, *c* показаны поверхности, построенные из наборов корреляционных функций. Рис. 4, *b* – это вид корреляционной поверхности построенной для траекторного сигнала рис. 4, *a*, который соответствует движущейся проволочки, образующей поверхностную волну. Рис. 4, *d* показывает корреляционную поверхность, построенную по результатам корреляционной обработки смоделированного траекторного сигнала от проволочки без воздействия поверхностной волны (рис. 4, *c*).



Рис. 4

Чтобы перейти к изображению проволочки в сечении нужно рассечь полученные корреляционные поверхности горизонтальными плоскостями на разной высоте и совместить образовавшиеся картины сечений (рис. 5).



Рис. 5

На рис. 5, *а* показан результат реконструкции изображения проволочки в сечении при преобладающем сигнале от поверхностной волны. Рис. 5, *b* – изображение проволочки в сечении при исключённой волны на поверхности воды.

Выводы:

1. При томографировании в водной среде с применением апертурного синтеза не избежать перемещения объекта или антенн локатора.

2. Перемещение будет сопровождаться поверхностной волной, которая может помешать реконструкции изображения объекта в сечении.

3. Поверхностная волна быстро затухает по мере увеличения глубины, поэтому для ослабления влияния поверхностной волны необходимо при сборе данных (при регистрации траекторного сигнала) нужно проводить томографирование на глубине 1,5 см и более.

4. Предложено применять предложенный подход в системах ближней локации в оптическом и радиодиапазоне для обнаружения, селекции и распознавания объектов на фоне реальной поверхности. Возможно создание систем радиовидения, обнаружение, селекция и распознавание объектов на фоне морской или земной поверхности (системы ближней локации с многоэлементными антеннами).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Менса Д. Л., Халеви Ш., Уэйд, Г. Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображений на СВЧ // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71. – № 2. – С. 76–84.

2. Ющенко В. П. Доплеровское сканирование структуры объекта с помощью синтезированной апертуры // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 2. – С. 41–45.

3. Ющенко В. П. Круговой апертурный синтез для целей томографии // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 28–33.

4. Ющенко В. П. Сопоставление двух методов когерентной томографии // Радиотехника и электроника. – 2004. – № 2. – С. 196–205.

5. Орлова М. В., Легкий В. Н. Синтез систем ближней локации : учеб. пособие // Новосибирск : НГТУ. – 2005. – 182 с.

6. Денисова Е. В., Легкий В. Н. Автономные информационные системы обнаружения скрытых объектов : учеб. пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2012. – 128 с.

7. Шебалкова Л. В., Легкий В. Н., Ромодин В. Б. Микроволновые и ультразвуковые сенсоры : учеб. пособие / под ред. Легкого В. Н. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – 172 с.

© В. П. Ющенко, В. А. Блинов, В. Н. Легкий, С. А. Литвиненко, Л. В. Шебалкова, 2018

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

#### Галина Вячеславна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

#### Светлана Арсеньевна Степанова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

#### Елена Павловна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: kaf.fotogram@ssga.ru

В статье рассматривается корреляционная зависимость между интегральными и локальными характеристиками керамических материалов на основе анализа цифрового изображения отражённого от поверхности светового сигнала. Показана возможность использования статистической модели отражательных свойств поверхности керамических материалов для контроля их качества. Предложенная методика позволяет снизить трудоёмкость и повысить достоверность контрольных операций.

**Ключевые слова:** керамические материалы, цифровые изображения, автоматизированная классификация, структура, отражение света.

## DEVELOPMENT THE METHOD OF DIGITAL MEASUREMENT STANDARDS FOR THE CONTROL MICROSTRUCTURE OF FUNCTIONAL CERAMIC MATERIALS

#### Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

#### Svetlana A. Stepanova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

#### Elena P. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: kaf.fotogram@ssga.ru

The article deals with the correlation between the integral and local characteristics of ceramic materials based on the analysis of the digital image of the light signal reflected from the surface. The possibility of using the statistical model of the reflective properties of the surface of ceramic materials to control their quality is shown. The proposed methodology makes it possible to reduce labor input and improve the reliability the control operationmaterials.

Key words: ceramic materials, digital images, automated classification, structure, light reflection.

Керамика (глина) – один из древнейших материалов, изобретённых человеком. Материалы этого класса изготавливаются из оксидов различных металлов методом спекания при различных температурах обжига. Функциональная керамика широко используются во многих отраслях современной техники. В большинстве случаев, к техническим характеристикам материалов такого вида предъявляются высокие требования, что обусловлено их последующим использованием. Структура и микроструктура керамики, как и интегральные свойства образцов обусловлены не только качеством исходного сырья, но и технологией изготовления.

Свойства керамических материалов всех видов определяются в основном их структурой. Под структурой подразумевается сочетание и распределение разных фаз (кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой), которые формируются в процессе спекания. Количественное распределение этих компонентов и их размеры определяют свойства полученного материала.

Функциональные особенности строения керамики выявляют путем исследования её текстуры и микроструктуры. Исследование микроструктуры позволяет определить форму, количество и природу кристаллической фазы, размеры фрагментов каждой фазы и их сочетание с газовой фазой (порами) и стекловидной фазой. Текстура определяет количественное сочетание фаз, объем пор, их размеры, строение, форму и взаимное расположение в образце. Многочисленные эксперименты по исследованию свойств функциональной керамики приводит к выводам, что именно особенности структуры определяют её технические характеристики.

Контроль микроструктуры керамики осуществляется в основном визуально при помощи микроскопов типа МИМ-7, ММР-2Р, оснащённых окулярмикрометром МОВ-1-15Х. Поскольку основными компонентами керамических материалов являются три вида образований: стеклофаза, пустоты (поры) и кристаллическая фаза, то на основе разницы их отражательных способностей при одинаковом спектральном составе зондирующего излучения происходит визуализация структуры поверхности. Поскольку структура поверхности (шлифа) отображает распределение компонент керамики, то следует предположить распространение эти особенностей на всю внутреннюю структуру [1].

Огромным достоинством метода визуального контроля является его наглядность. Однако, такой метод нельзя назвать объективным, т.к. проведение визуальных измерений требует высокой квалификации оператора, достаточно трудоёмко, а результаты исследования носят субъективный характер. На рис. 1 представлена микроструктура образцов керамики, обожжённой при разных температурах.





Ранее было показано, что для получения достоверной и оперативной информации оценки соответствия параметров керамических образцов заданным требованиям целесообразно использовать методы автоматизированного дешифрирования [2]. В этом случае, при обоснованном выборе контролируемой количественной характеристики можно устранить субъективную компоненту и добиться однозначности при сравнении эксплуатационных характеристик керамических материалов.

Для сравнительной оценки микроструктуры образцов использовались относительные характеристики яркости света, отражённого от поверхности керамического материала. Поскольку каждая фаза обладает собственным коэффициентом отражения, то на цифровых изображениях поверхности этих материалах будут наблюдаться участки с разной степенью почернения.

При проведении экспериментов был использован микроскоп МИА ЛабМет-И1 при увеличении 360 х и цифровая фотокамера Olympus 3-420.

Обработка результатов проводилась с помощью программного продукта ERDAS Imagine методом контролируемой классификации. Для выделения участка с заданной фазой необходимо определить уровень градаций яркости, соответствующих этому материалу. Такие требования к выделению фрагмента поверхности называются «обучающая выборка». В данном случае обучающая выборка для каждого компонента структуры создавалась при помощи эталона, сформированного на основе визуального анализа изображения, сделанного экспертом. Термин обучающая выборка предполагает формирование набора и статистического распределения величины отражённого сигнала, соответствующего заданным свойствам керамики. В набор сигнатур включались следующие определяемые классы: «поры (газовая фаза)», «закрытые поры», «керамическая фаза» и «стекловидная фаза». Для создания выборки использовались два возможных варианта – выбор эталона вручную и выращивание из затравки.

В данной работе использовался редактор эталонов, полученный методом «выращивания из затравки». Использовались следующие обозначения:

- class1 - «поры (газовая фаза)»;

- class2 «закрытые поры»;
- class3 «стекловидная фаза»;

- class4 - «керамическая фаза».

Большой практический интерес при автоматизированном дешифрировании снимков представляет возможность проведения контролируемой классификации различных изображений по заранее созданным статистическим характеристикам объектов, принятых как эталонные. В этом случае значительно сокращается время обработки информации, особенно при большом количестве снимков. В качестве измерительной информации используется статистическая характеристика относительного распределения яркости отражённого от образца светового потока.

На рис. 2 приведены статистические характеристики одинаковых объектов на разных образцах. Полученный результат подтверждает возможность использовать одну и ту же обучающую выборку для обнаружения и классификации аналогичных объектов



Viewer #11 : 48.img (:Layer_3)(:Layer_2)(:Layer_1)
<u>File Utility View AQI Raster Vector Annotation TerraModel Help</u>
☞ 🗈 🖬 🖉 🖉 💥 🖾 🔤 + 🔨 날 🔍  옷 🤊
🔄 Viewer #11: 48.img
▼ Viewer #11: 48.img    Map  X.    1775.4246  Y:  -1188.6746  other  C
Viewer #11: 48.img    Map  X:  1775.4246  Y:  -1188.6746  other  C    Projection:  Unknown
Wiewer #11: 48.img  Image: State
Map  X  1775.4246  Y:  -1188.6746  other  C    Projection:  Unknown    Layer  Band  FILE PIXEL  LUT VALUE  HISTOGRAM  ^    1  102.000  146.000  9216.000  ^
Viewer #11:  48.img  Image: State S
Viewer #11:  48.img  Image: State S
Viewer #11: 48.img  □  ×    Map  ×  1775.4246  Y:  -1188.6746  other  C    Projection:  Unknown

Рис. 2. Значения яркостей объекта «Пора» на двух разных снимках

Для проверки достоверности дешифрирования второго снимка было сделано визуальное дешифрирование. По нему так же создалась обучающая выборка и проведена классификация методом минимальных дистанций. В таблице
приведены результаты статистической обработки одного типа объектов на разных снимках.

Визуальное сопоставление результатов показывает практически полное совпадение полученных тематических растров. Численные показатели расхождения отнесения пикселей к классам в процентах приведены в таблице.

Тип объекта	Эталон тестового объекта		Эталон собственного образца		Расхождение
	Пиксели	Проценты	Пиксели	Проценты	
Поры	104810	5,443%	101675	5,280%	0,163%
Закрытые поры	138617	7,198%	135611	7,042%	0,156%
Стекловидная фаза	5743	0,298%	3329	0,173%	0,125%
Кристаллическая фаза	1676593	87,061%	1685148	87,505%	0.444%
Всего	1925763	100,000%	1925763	100,000%	

#### Результат отнесения пикселей к классам

Полученные в результате экспериментов результаты показали практически полное совпадение результатов статистической обработки одних и тех же фазовых компонентов на разных образцах.

Это показывает, что статистические характеристики распределения яркости являются более устойчивым признаком объекта, чем просто визуализация поверхности, а также позволяют производить количественную оценку результата контроля качества образца. Полученный результат показывает возможность использования методов автоматизированного контроля изображений для определения количественных и качественных характеристик керамических материалов. Создание новой методики контроля на основе создания обучающей выборки с последующим её использованием как тестового объекта позволит значительно сократить время на контрольные операции и повысить достоверность результатов контроля.

Полученные результаты показывают возможность создания электронного тестового объекта для заданного строения поверхности, а также ее фрагментов. Сравнение цифрового изображения поверхности исследуемого керамического материала и тестового объекта позволит определить не только процентное содержание каждого компонента микроструктуры, их форму и расположение, но и технические характеристики исследуемого керамического материала. Создание такой методики позволит оптимизировать процедуру исследования микроструктуры керамики, повысит достоверность контрольных оценок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оценка погрешности измерений параметров микроструктуры керамики / Л. Б. Воробъёва, А. Д. Зонова, С. А. Степанова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. Х Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 59–64.

2. Оптимизация методов контроля качества функциональной керамики / П. М. Плетнёв, Г. В. Симонова, Д. П. Симонов, С.А. Степанова // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 211–214.

3. Разработка оптического метода контроля качества функциональной керамики // П. М. Плетнёв, Г. В. Симонова, С. А. Степанова // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 5, ч. 2. – С. 147–150.

© Г. В. Симонова, С. А. Степанова, Е. П. Хлебникова, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ЧЕРНОТЫ

#### Надежда Анатольевна Вихарева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (923)196-32-49, e-mail: milana-maria@mail.ru

Экспериментальные исследования установки по определению коэффициента черноты, основано на использовании датчиков теплового потока. Рассмотрены её особенности и приведены основные результаты исследований.

Ключевые слова: коэффициент черноты покрытия, радиационный теплообмен, плотность теплового потока, датчик теплового потока, измерительная установка, стандартный образец.

# INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF A THERMOMETRIC INSTALLATION AS MEASURED BY COEFFICIENT OF BLACKNESS

### Nadezda A. Vikhareva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10, Plakhotnogo St., Ph. D., Assistant Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (923)196-32-49, e-mail: milana-maria@mail.ru

Experimental studies of the black coefficient determination unit are based on the use of heat flux sensors. Its features are considered and the main results of researches are resulted.

**Key words:** the coefficient emissivity of a covering, radiation heat transfer, heat flux density, heat-flow sensor, measuring installation, standard sample, the measurement error.

Для решения многих задач энергосбережения становятся все более востребованными надежные данные по коэффициенту черноты поверхности теплоэнергетических объектов. От значений этого коэффициента зависит интенсивность радиационного теплообмена объектов с окружающей средой, доля которого от суммарного теплообмена, даже вблизи комнатных температур, может достигать десятков процентов и становится преобладающей при высоких температурах и при теплообмене в условиях вакуума.

Единственным надёжным способом определения значений коэффициента черноты являются его измерения на образцах конкретных материалов и покрытий.

Измерения интегрального полусферического коэффициента черноты поверхности различных материалов обычно основаны на законах теплообмена двух тел, имеющих разные температуры.

Надежность расчетов и результатов исследований тепловых режимов объектов, находящихся в условиях преобладающего теплообмена излучением, зависит от достоверности и точности данных, прежде всего, по интегральному

полусферическому коэффициенту черноты поверхности этих объектов. Интенсивность теплообмена (плотность теплового потока) в этом случае зависит от коэффициентов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  черноты их поверхности и разности четвертой степени значений  $m_1$  и  $m_2$  абсолютной температуры этих тел [1]. При этом приведённый (эффективный) коэффициент  $\varepsilon_{12}$  черноты системы тел, который в результате и определяет интенсивность теплообмена между телами, обычно является сложной комбинацией коэффициентов  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  черноты, зависящей от формы и взаимного расположения тел. Единственной возможностью точного определения этой характеристики являются измерения. Однако результаты измерений, полученные различными исследователями и положенные путём усреднения в основу многочисленных справочных данных, могут не соответствовать фактическому коэффициенту черноты реальной поверхности объекта. Поэтому обеспечение точности и единства измерений этого важнейшего параметра теплообмена является актуальной задачей метрологии в области тепловых измерений.

Наиболее распространён калориметрический метод измерений коэффициента черноты [2, 3], использующий систему двух тел, в которой одно тело находится внутри другого тела (оболочки). Недостатком такого метода является сложность и громоздкость реализующих его измерительных установок. Поэтому такие установки не предназначены для широкого применения в испытательных и измерительных лабораториях в качестве мобильных измерительных приборов. В связи с этим актуальна задача создания более простых методов и средств оперативных и точных измерений этого востребованного свойства материалов и покрытий.

В ФГУП «СНИИМ» была разработана установка по определению коэффициента черноты (рисунок).



Схема теплометрической установки:

1 – воздушный зазор, 2 – нижний ДТП, 3 – нижняя пластина с датчиком температуры, 4 – нижняя батарея Пельтье, 5 – измеритель сигналов ДТП датчиков, 6 – теплоизоляция, 7 – верхняя батарея Пельтье, 8 – верхний ДТП, 9 –верхняя пластина с температуры, 10 – фиксатор зазора, 11 – регулятор температуры верхней пластины, 12 – регулятор температуры нижней пластины Установка работает следующим образом. С помощью регуляторов задают и поддерживают постоянными значения температуры нижней и верхней пластин, соответственно,  $T_2$  излучателя и  $T_1$  теплостока [5, 6]. Эти данные должны находиться в интересующем диапазоне температур, для которого требуется найти значения коэффициента черноты исследуемого покрытия. При этом их разность выбирают достаточной для уверенных измерений датчиками теплового потока интенсивности радиационного теплообмена в зазоре между пластинами. Плотность теплового потока в зазоре в этом случае определяется известным из теории теплообмена соотношением

$$q_{12} = q_{\lambda} + q_{\varepsilon} = q_{\lambda} + \varepsilon_{12} \cdot \sigma (T_2^4 - T_1^4), \tag{1}$$

где  $q_{\lambda} = \lambda (T_2 - T_1)/h$  – плотность кондуктивного теплового потока, зависящая от теплопроводности  $\lambda$  воздушного слоя толщиной h в зазоре;  $q_{\varepsilon}$  – плотность радиационного теплового потока в зазоре;  $\varepsilon_{12} = (q_{12} - q_{\lambda})/\sigma (T_2^4 - T_1^4)$  – приведенный коэффициент черноты, который для такой системы равен

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2).$$

Если пластины имеют одинаковое покрытие ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ), то искомый коэффициент  $\varepsilon_x$  черноты равен

$$\varepsilon_x = 2/(1+1/\varepsilon_{12}),$$

а уравнение измерений для получения значений  $\varepsilon_x$  имеет с учётом (1) вид

$$\varepsilon_x = 2/\{1 + A/(q_{12} - q_{\lambda})\}.$$
 (2)

Здесь  $A = \sigma(T_2^4 - T_1^4)$  – постоянная, которая задаётся и поддерживается постоянной в процессе измерений с помощью регуляторов температуры,  $q_{12}$  – плотность теплового потока в зазоре;  $q_{\lambda}$  – постоянная, соответствующая  $q_{12}$  при отсутствии радиационного теплового потока в зазоре (для  $q_{\varepsilon} = 0$ ).

Постоянную *q*<sub>λ</sub> можно определить путём измерений покрытий с близким к нулю коэффициентом черноты.

Наличие ДТП и идентичность нижней и верхней частей теплового блока позволяют точно определить значения  $q_{12}$  плотности теплового потока в зазоре путём исключения влияние остаточного теплообмена между боковыми поверхностями пластин и теплоизоляцией. При условии кососимметричного распределения температурного поля на боковой поверхности теплоизоляции относительно средней температуры зазора плотность  $q_{12}$  равна среднему арифметическому значению плотности тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$ , полученных с ДТП:

$$q_{12} = (q_1 + q_2)/2. \tag{3}$$

Также имеется возможность дополнительного уточнения значений  $q_{12}$ , используя среднее арифметическое значений, полученных при двух противопо-

ложных направлениях теплового потока. Смена направлений достигается, если поменять ролями излучатель и теплосток.

Необходимо отметить, что с помощью данной установки возможны измерения, основанные на уравнении (2), а также измерения, основанные на известной зависимости измеренных значений плотности теплового потока от коэффициента черноты, установленной путём калибровки прибора по стандартным образцам, например, после его изготовления.

Повышенная точность измерений на данной установки достигается: вопервых, использованием в устройстве идентичных конструкций излучателя и теплостока с двумя датчиками теплового потока, позволяющих исключить влияние бокового теплообмена; во-вторых, использованием одинакового покрытия теплообменных поверхностей излучателя и теплостока исследуемым материалом, позволяющим повысить чувствительность благодаря удвоению площади теплообмена, а также исключить погрешность из-за неопределённости коэффициента черноты покрытия излучателя или теплостока, обычно являющегося неотъемлемым атрибутом аналогичных устройств.

Расширение температурного диапазона достигается использованием батарей Пельтье, которые могут работать как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения, в том числе, ниже комнатной температуры. Использование регуляторов температуры обеспечивает постоянство и воспроизводимость температурного режима в тепловом блоке устройства. Это также способствует повышению точности и исключает необходимость обязательного применения стандартных образцов перед каждым измерением.

Измерения осуществляются на основе заранее установленной зависимости плотности  $q_{12}$  теплового потока от коэффициента  $\varepsilon_1$  черноты, которую можно определить с помощью стандартных образцов (СО) с известными коэффициентами черноты [7]. Данная зависимость строиться по точкам, приведенным в таблице.

3	0,02	0,2	0,45	0,62	0,92
СО	алюминий	25% копирки 75% алюминия	50% копирки 50% алюминия	25% алюминия 75% копирки	копирка
q, Вт/м <sup>2</sup>	800,0	850,0	920,0	970,0	1100,0

Установка представляет собой компактное мобильное устройство, позволяющего проводить точные измерения коэффициента черноты покрытий в широком диапазоне температур.

Измерения проводились при температуре  $T_1 = 20$  С и  $T_2 = 30$  С, для которой были известны коэффициенты черноты используемых СО. Полученные данные показывают, что погрешности измерений проведенным методом составляют

от 4 до 6%. Для большинства работ это является вполне приемлемой точностью измерений коэффициента черноты покрытий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие. – М. : Энергоатомиздат. – 1990. – 367 с.

2. Излучательные свойства твердых материалов / справочник под ред. А. Е. Шейндлина. – М. : Энергия. – 1974. – 472 с.

3. Мисяченко И. И., Черепанов В. Я. Измерительная установка для исследования и аттестации стандартных образцов излучательных свойств / Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Оптико-физические свойства материалов // Науч.-тех. сб. – М. : ВИАМ, 1989. – С. 44–49.

4. Вихарева Н. А., Черепанов В. Я. Метод измерений коэффициента черноты поверхностей в системе двух параллельных плоскостей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 13–17.

5. Вихарева Н. А., Черепанов В. Я. Исследование теплометрического метода измерений коэффициента черноты поверхностей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 5. – С. 234–239.

6. Вихарева Н. А., Черепанов В. Я., Ямшанов В. А. Устройство для измерений коэффициента черноты покрытий // Патент на изобретение А.с. 2578730, Бюл. № 9, 01 марта 2016.

7. Черепанов В. Я. Относительные измерения интегральной излучательной способности материалов модуляционным методом // Измерительная техника. – 1981. – № 5. – С. 36–38.

© Н. А. Вихарева, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР С РАЗЛИЧНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

## Александр Дмитриевич Безпалый

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, аспирант кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, тел. (382)270-15-18, e-mail: id\_alex@list.ru

# Антон Сергеевич Перин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, кандидат технических наук, доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, тел. (382)270-15-18, e-mail: perinas@bk.ru

# Аркадий Евсеевич Мандель

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, доктор физико-математических наук, профессор кафедры сверхвысо-кочастотной и квантовой радиотехники, тел. (382)270-15-18, e-mail: mandelae@svch.tusur.ru

# Владимир Михайлович Шандаров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, доктор физико-математических наук, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, тел. (382)270-15-18

Представлены экспериментальные результаты возможности формирования канальных волноводных структур с различной топологией лазерным излучением в образцах ниобата лития, поверхностно легированных ионами меди, железа и их комбинациями. Полученные структуры индуцировались поточно на длинах волн света  $\lambda = 532$  нм и  $\lambda = 450$  нм при низких мощностях в непрерывном режиме.

**Ключевые слова:** канальные волноводы, ниобат лития, экспонирование, оптическое зондирование фоторефрактивный эффект.

# INVESTIGATION OF FORMATION OF CHANNEL WAVEGUIDE STRUCTURES WITH DIFFERENT TOPOLOGY IN SURFACE AREA OF ELECTRO-OPTICAL CRYSTALS

### Alexander D. Bezpaly

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D. Student, Department of Quantum Radioengineering, phone: (382)270-15-18, e-mail: id\_alex@list.ru

### Anton S. Perin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Quantum Radioengineering, phone: (382)270-15-18, e-mail: perinas@bk.ru

#### Arkady E. Mandel

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Dr. Sc., Professor, Department of Quantum Radioengineering, phone: (382)270-15-18, e-mail: mandelae@svch.tusur.ru

#### Vladimir M. Shandarov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, D. Sc., Professor, Department of Quantum Radioengineering, phone: (382)270-15-18

The experimental results of possibilities of formation of channel waveguide structures with different topologies by laser radiation in lithium niobate samples, surface-doped by copper (Cu) and iron (Fe) ions, or their combinations, are demonstrated. The obtained structures are point-by-point induced at light wavelengths  $\lambda = 532$  nm and  $\lambda = 450$  nm with low powers in continuous mode.

Key words: channel waveguides, lithium niobate, exposure, optical probing, photorefractive effect.

В последнее время интерес к способам преобразования световых полей и управления оптическим излучением растет с большой интенсивностью [1]. Это напрямую связано с развитием волноводной фотоники и интегральной оптики, что способствует совершенствованию оптических приборов и устройств передачи, обработки и приема информации [2, 3]. В качестве элементов, способствующих осуществлению контроля над световыми потоками, могут выступать канальные оптические волноводы и дифракционные решетки на основе электрооптических кристаллов [3, 4]. Одним из таких материалов является ниолития. обладающий уникальным набором физических, нелинейнобат оптических и фоторефрактивных свойств, благодаря которым внутри кристалла возможно формирование различных голографических структур под действием света [5]. Топология таких структур зависит от способа оптического индуцирования, которое можно осуществлять при помощи фокусировки лазерного излучения цилиндрической линзой с использованием амплитудной маски или, фокусируя световой пучок сферической линзой, производить последовательное поточечное экспонирование [6, 7].

Основной целью данной работы является исследование формирования и характеристик канальных волноводных структур с различной топологией, индуцированных в поверхностных фоторефрактивных областях ниобата лития.

Канальные волноводы индуцировались путем последовательного поточечного экспонирования поверхности кристаллических образцов LiNbO<sub>3</sub> Y-среза с размерами  $30 \times 3 \times 15$  мм<sup>3</sup> по осям X, Y, Z фокусированным лазерным пучком. Приповерхностная область пластины легирована различными участками ионами меди, железа и их комбинациями. Источниками света являлись YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  нм и полупроводниковый лазер с  $\lambda = 450$  нм. Процесс экспонирования LiNbO<sub>3</sub> в разных экспериментах осуществлялся при смещении образца вдоль осей Y и Z. Время экспонирования каждой точки составляло от 4 до 10 при мощности 5-10 мВт. Результатом последовательно пе-

рекрывающихся точек с расстоянием между их центрами равным 20-60 мкм стали области с пониженным показателем преломления. Они представляют собой прямые линии с различной однородностью, либо полосы со сложной кривизной. Таким образом, промежуток, заключенный между двумя экспонированными полосками, оказывался эквивалентным канальному оптическому волноводу. Расстояние между их центрами в различных экспериментах варьировалось от 20 мкм до 40 мкм.

Полученные оптические неоднородности визуально оценивались путем оптического зондирования при помощи излучения He-Ne лазера с длиной волны  $\lambda = 633$  нм и выходной мощностью P = 1 мВт. Результаты зондирования экспонированных областей представлены в виде световых картин на выходной грани образца на рисунке. На рисунке (*a* и б) показан результат структур, сформированных из двух прямолинейных полос, состоящих из точек с различным расстоянием между их центрами. Рисунок (*в*) демонстрирует результат зондирования волноводной структуры, имеющей сложную топологию.



Световые картины, полученные при оптическом зондировании канальных волноводных структур:

а) прямолинейной формы; б) с неоднородностью в продольном направлении;

в) с поперечно изогнутой топологией

Таким образом, продемонстрированы результаты поточечного индуцирования волноводных структур с различным однородностями и топологией. Отметим, что при ориентации световой полоски вдоль оптической оси, формирование фоторефрактивных фазовых элементов считается запрещенным, но при поточечном экспонировании поверхности кристалла узким световым пучком такая возможность появляется.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ на 2017–2019 годы (проект по заявке 3.1110.2017/ПЧ).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kivshar Y. S. Optical solitons: from fibers to photonic crystals. – Academic Press, 2003. – 540 p.

2. Hongliang Liu, Javier R. Vázquez de Aldana, Minghui Hong, and Chen F. Femtosecond laser inscribed Y-branch waveguide in Nd:YAG crystal: fabrication and continuous-wave lasing // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2015. – Vol. 22 (2). – 5 p.

3. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // Appl. Phys. B. – 1998. – Vol. 67. – P. 131-150.

4. Vittadello L., Zaltron A., Argiolas N., Bazzan M., Rossetto N. and Signorini R. Photore-fractive direct laser writing // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol. 49, (125103). – 9 p.

5. Петров М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб. : Наука, 1992. – 315 с.

6. Davydov S. A., Trenikhin P. A., Shandarov V. M., Shandarova K. V., Kip D., Rueter Ch., and Chen F. Quasi-one-dimensional photonic lattices and superlattices in lithium niobate: linear and nonlinear discrete diffraction of light // Phys. of wave phen. -2010. - Vol. 18 (1). - P. 1-6.

7. Vittadello L., Zaltron A., Argiolas N., Bazzan M., Rossetto N. and Signorini R. Photore-fractive direct laser writing // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol. 49. – 9 p.

© А. Д. Безпалый, А. С. Перин, А. Е. Мандель, В. М. Шандаров, 2018

# РАЗРАБОТКА ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### Руслан Камильевич Насыров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-31, e-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru

Работа посвящена разработке методов настройки сложных оптических систем при помощи дифракционных оптических элементов. В докладе будут представлены схемы контроля асферических зеркал и схем, состоящих из нескольких оптических компонентов. Приведены экспериментальные результаты.

Ключевые слова: дифракционная оптика, оптический контроль.

# DEVELOPMENT OF DIFFRACTIVE OPTICS FOR ALIGNMENT OF OPTICAL SYSTEMS

#### Ruslan K. Nasyrov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-79-31, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

The work is devoted to the development of methods for tuning complex optical systems using diffractive optical elements. The report will present control schemes for aspherical mirrors and lay-outs consisting of several optical components. Experimental results are presented.

Key words: diffractive optics, optical testing.

## Введение

В настоящее время актуальной проблемой оптической промышленности является изготовление, а также сборка и юстировка сложных многокомпонентных линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем, в том числе с асферическими и децентированными поверхностями. При этом для оптических систем, используемых в аэрокосмической отрасли, необходимо обеспечить очень высокое качество контроля. В последние годы достигнут существенный прогресс в области изготовления и контроля оптических поверхностей с нанометрической точностью, где для контроля используется интерферометрический метод. Однако стандартный интерферометр обеспечивает контроль только плоских или сферических поверхностей, для контроля поверхностей сложной формы, таких как: асферические, цилиндрические, конические, торические, а в общем случае произвольной (или нетипичной) формы, необходимо использовать корректоры волнового фронта [1]. В качестве таких корректоров наиболее часто используют дифракционные элементы – компьютерно-синтезированные голограммы (СГ).

Возможны несколько вариантов применения СГ:

 – СГ выполняет роль корректора, преобразуя волновой фронт интерферометра в асферический,

- СГ выполняет роль имитатора контролируемой поверхности [2],

– СГ обеспечивает точную юстировку измерительной схемы.

В ИАиЭ СО РАН рассмотрены и исследованы методы изготовления прецизионных СГ с использованием круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) типа CLWS-300IAE [3].

# 1. Контроль асферических зеркал

Для контроля асферических поверхностей применяются как осевые, так и внеосевые СГ. Осевые СГ проще в расчете, юстировке и могут быть изготовлены с высокой точностью с помощью КЛЗС. На рис. 1 приведен пример контроля 3-м асферического зеркала для телескопа Алтайского оптико-лазерного центра с помощью изготовленной в ИАиЭ СО РАН осевого СГ – дифракционного корректора. На этом же рисунке показана увеличенная часть схемы с имитатором зеркала, который используется для аттестации корректора.



Рис. 1. Схема контроля 3-м зеркала для Алтайского оптико-лазерного центра и аттестация корректора при помощи имитатора

# 2. Контроль внеосевых сегментов асферических поверхностей

При контроле таких зеркал имеются две основные особенности:

1. Расчет фазовой функции СГ требует существенных объемов вычислений. Объем данных достигает десятков и сотен Гб для СГ диаметром более 100 мм.

2. Для обеспечения погрешности менее 1/10 длины волны, оптические компоненты должны быть установлены в расчетные положения вдоль осей x, y, z

и углов  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$  с высокой точностью, что создает большие сложности при юстировке.

Для обеспечения настройки измерительной системы, основная дифракционная структура дополняется юстировочными СГ (рис. 2) которые фокусируют свет в заданные точки пространства. Таким образом, можно однозначно выставить контролируемую поверхность относительно СГ.



Рис. 2. Оптическая схема контроля и вид дифракционной структуры СГ

# 3. Контроль сборки сложных оптических систем

Одной из проблем в оптическом приборостроении является сборка и настройка многокомпонентных оптических систем, как показано в примере на рис. 3, *а*. Были разработаны СГ, которые представляют собой несколько голограмм, изготовленных на одной подложке (рис. 3,  $\delta$ ) в одном технологическом цикле. При этом, каждая голограмма рассчитывается таким образом, чтобы получить интерференционную картину от одной из поверхностей линз O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> системы. На рис. 3,  $\delta$  цвет дифракционной структуры соответствует цвету контролируемой поверхности. Таким образом, при идеальной настройке системы на интерферограмме возникнет поле равномерной интенсивности на всех структурах одновременно. В противном случае, возникнет интерференционная картина, которую можно проанализировать и определить направление, в котором следует сместить тот или иной оптический компонент (рис. 3,  $\epsilon$ ).



Рис. 3. Схема контроля сложной оптической системы (*a*), вид СГ (б) и типичная интерферограмма в процессе юстировки (*в*)

### Заключение

Предложен метод контроля сборки многокомпонентных систем на основе синтезированных голограмм. Разработаны методы расчета такого типа СГ. Приведены экспериментальные результаты, показывающие высокую точность и простоту использования данного метода.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ Гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7) в ИАиЭ СО РАН.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полещук А. Г. Совмещение дифракционных и рефракционных компонентов в оптических системах // Автометрия. – 1985. – № 6. – С. 27–31.

2. Ларионов Н. П., Лукин А. В., Рафиков Р. А. Имитатор главного зеркала телескопа на основе синтезированной голограммы // ОМП. – 1980. – № 1. – С. 39–40.

3. Синтез ДОЭ в полярной системе координат. Динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных корректоров для контроля асферических зеркал / Р. В. Шиманский, А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. В. Черкашин // Автометрия. – 2017. – № 3. – С. 64–73.

© Р. К. Насыров, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПОЛИМЕРНОЙ НАНОФОТОНИКЕ ДЛЯ СИНТЕЗА СЕНСОРНЫХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

## Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

# Никита Сергеевич Никитенко

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, ведущий инженер, тел. (383)330-71-20, e-mail: rabochnet@mail.ru

# Виктор Федорович Плюснин

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор химических наук, зав. лабораторией, тел. (383)333-23-85, e-mail: plyusnin@yandex.ru

# Арсений Викторович Поважаев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, младший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: powazhaev@yandex.ru

# Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, зав. лабораторией, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

В докладе рассматривается возможность создания полимерных структур для разработки сенсорных элементов и элементов телекоммуникационных систем. Рассматривается применение планарных волноводов с добавками люминофора в качестве датчиков акустических сигналов. Также рассматривается возможность применения планарных волноводов в качестве приемной антенны для передачи видео информации в телекоммуникационных системах.

Ключевые слова: планарно-волоконная оптика, люминесценция, датчик, телекоммуникационные системы.

# RESEARCH ON POLYMER NANOPHOTONIC FOR SYNTHESIS OF SENSOR AND TELECOMMUNICATION DEVICES

### Alexander V. Britvin

Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

### Nikita S. Nikitenko

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Leading Engineer, phone: (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

# Victor F. Plyusnin

Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)333-23-85, e-mail: plyusnin@kinetics.nsc.ru

#### Arseniy V. Povazhaev

Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: powazhaev@yandex.ru

#### Boris V. Poller

Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

The report considers the possibility of creating polymer structures for the creation of sensory elements and elements of telecommunication systems. The application of planar waveguides with phosphor additives as sensors of acoustic signals is considered. We also consider the possibility of using planar waveguides as a receiving antenna for the transmission of video information in tele-communication systems.

Key words: planar-fiber optics, luminescence, sensor, telecommunication systems.

Развитие физики полимеров и нанооптики является базой для развития полимерной нанофотоники, включающей в себя исследования полимерных структур (пленки, волокна и др.) в состав которых вводятся различные наночастицы и квантовые излучатели в виде молекул люминофоров [1-3], также в состав полимерной нанофотоники входят жидкокристаллические полимеры как преобразователи параметров оптических пучков.

Размещение молекул люминофоров в пленках изоптических полимеров открывает возможность преобразования по спектру и во времени оптических импульсных информационных сигналов, падающих на поверхность пленки.

Введение в полимерную пленку также специальных микро- и наночастиц позволяет регистрировать изменения параметров физических полей, воздействующих на эти частицы и на саму пленку [4-7].

Модель полимерной сенсорной структуры – мультисенсора, реагирующей на магнитные и акустические сигналы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура мультисенсора:

ПВ – планарный полимерный волновод; МЧ – микрочастица; ЛИ – лазерный импульс; ЛМ – люминофор; АС – акустический сигнал. Принцип работы этого мультисенсора заключается в преобразовании падающих на поверхность планарного волновода лазерных импульсов с облученностью  $E_i$  и длиной волны  $\lambda_1$ , на длину волны  $\lambda_2$  и модуляцией выходного сигнала внешним воздействием (например, акустическим сигналом) на волновод и изменяющим характеристики распространения оптического сигнала в нем, и создающие облученность  $E_{\text{вых}}(\lambda_2)$  на входе фотоприемника лазерного приемопередающего блока. Нанослой на поверхности планарного волновода наносится для улучшения эксплуатационных характеристик и расширения функциональных возможностей.

За счет переизлучения принимаемого импульса люминофором (элементы в десятки нанометров) с квантовой эффективностью  $\eta$  и временем преобразования  $\tau_{пи}$  в волноводе распространяется за счет полного внутреннего отражения оптический сигнал с выходной мощностью  $P_i$  на торце световода.

Для исследованных нами полимерных планарных волноводов [2] усиление К<sub>пв</sub> облученности составило К<sub>пв</sub>=E<sub>вых</sub>/E<sub>УФИ</sub> > 70.

Известно, что большинство молекул полимера имеет вытянутую структуру длиной до нескольких тысяч нанометров с диаметром в десятки нанометров.

Микрочастица (из немагнитных материалов) размером от нескольких микрон до сотен нанометров в полимерной матрице образует упруго-резонансную структуру, по-разному реагирующую на акустические колебания из-за разных значений модулей упругости материалов и разных скоростей распространения акустического сигнала в материалах. В результате будут происходить смещения микрочастиц под действием акустического сигнала, что приведет к изменению характеристик распространения вторичного излучения от атомов и молекул люминофоров в полимерной матрице до выходного торца волновода. Также, при соответствующем закреплении тонкого планарного волновода длиной L акустический сигнал будет приводить к колебаниям выходного торца волновода, параметры которых будут зависеть от интенсивности и частоты колебаний. Для этих целей разработаны акустические сенсоры на планарных волноводах толщиной от 50 мкм до 80 мкм, имеющие чувствительность до 25 дБ в области сотен Гц.

Микрочастицы из магнитных материалов (железо, никель и т.п.) в полимерном планарном волноводе образуют ансамбли, согласованно реагирующие на изменение магнитного поля и влияющие на траектории распространения внутренних и выходных оптических импульсов. Исследования показывают [9], что торцы прозрачных планарных полимерных волноводов длиной 30 мм и толщиной в десятки мкм с магнитными частицами размером менее 450 нм также смещаются на несколько мм при воздействии полей до сотен микротесла, что открывает возможность одновременного контроля акустических и магнитных сигналов.

В общем случае чувствительность мультисенсора определяется концентрацией микро и наночастиц – n<sub>M4</sub>, их площадью S<sub>M4</sub> и расположением плоскости отражения *A* и самой частицы в планарном волноводе.

Обнаружено квазилинейная зависимость величины отклонения торца полимерной микропленки с магнитными наночастицами от величины внешнего магнитного поля. При угловом смещении частицы размером в 1000 нм на 100 нм, угол отражения излучения люминесценции изменится на десятки минут, соответственно изменяются параметры  $E_{\text{вых}}(\lambda_2)$  и М  $\{x, y\}$ . Тогда общее выражение для оценки влияния акустического сигнала интенсивностью  $J_i$  вызывающее микроперемещения частиц на единицы и десятки нанометров –  $\Delta l_i$ :

$$E_{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{b}\boldsymbol{l}\boldsymbol{X}}(\lambda_2, x, y, z) = \{E(\lambda_1)\} \{\Delta l_i\} n_{\mathcal{M}\boldsymbol{y}}(x, y, z) \cdot f \cdot K_{\Pi B}$$
(1)

где К<sub>пв</sub> – коэффициент передачи планарного волновода без микрочастиц,  $n_{MY}(x,y,z)$  – концентрация частиц в объеме волновода; f – фактор формы частицы.

При известных спектральных и временных параметрах акустического сигнала чувствительность мультисенсора может быть значительно улучшена за счет выбора люминофора с соответствующим временем переизлучения и соответствующих временных параметров лазерного импульса.

Также для измерения характеристик тепловых полей в зоне расположения сенсоров может быть использован известный эффект изменения кинетики люминесценции при изменении температуры, на основании которого разработаны люминофорные датчики на диапазон от минус 200 до плюс 200 градусов Цельсия [4]. В этом случае, необходимо контролировать временные параметры входных лазерных и выходных оптических импульсов.

Имеется также возможность контроля параметров внешней атмосферы за счет использования во внешней оболочке полимерного волновода полимеров, изменяющих коэффициент преломления при появлении опасных газов, таких как, например метан. При этом в волноводе будут изменяться условия полного внутреннего отражения, что приведет к изменению параметров выходных оптических импульсов [5].

Сенсорные модули на основе полимерных оптических элементов могут быть реализованы в объеме нескольких кубических сантиметров и получать энергию за счет передающего оптического луча. Экспериментальный образец макета сенсора представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид элемента макета сенсора с двумя микропленками толщиной по 100 мкм и площадью по 15 мм<sup>2</sup>

Испытания показали, экспериментальную оценку чувствительности по постоянному полю элемента сенсора около 300 мкТл/мкм или около 80 мкВ/мкТл.

Ожидаемая оценка чувствительности для оптимизированного элемента микросенсора с растровым измерителем и точным усилителем может составить десятки нанотесла в градиентном режиме. По сейсмическому сигналу получена оценка чувствительности микросенсора до 2 мкВ·с/мкм.

Принципиальное отличие рассматриваемых нами методов построения сенсорных устройств заключается в том, что в чувствительном элементе не используются электрические цепи, сам элемент выполняется из полимерных материалов: микропленки; оптические волноводы; корпуса. Эта особенность позволяет значительно увеличить помехоустойчивость измерений, снизить габариты и энергопотребление.

В общем случае связь между чувствительностью или обнаружительной способностью  $\psi$  и характеристиками исследуемого микросенсора на микропленке определяется следующими параметрами [9]. Параметры микропленки: длина, ширина, толщина, модуль Юнга полимера, характеристики нанослоев на поверхности пленки, конфигурация пленки (прямоугольная, трапеция, овал и др.), изменение толщины пленки, наличие перетяжек. Параметры ансамбля микро и наночастиц: средний диаметр, плотность *g*, магнитные характеристики. Координатные характеристики расположения частиц в микропленке – зависимость концентрации частиц на единицу объема от координат центра объема.

Исследование телекоммуникационных свойств полимерных волноводных структур с люминофорами для приема сигналов от удаленного ультрафиолетового передатчика показывает, что пропускная способность линии связи С<sub>пр.</sub> в первую очередь зависит от времени переизлучения оптического импульса люминофором Т<sub>лм</sub> и временем распространения преобразованных импульсов до фотоприемника – Т <sub>распр.</sub>

Учитывая, что мощность принятого сигнала P<sub>c</sub> зависит от квантовой эффективности люминофора q, то в общем случае пропускная способность (без учета фоновой помехи) полимерной люминофорной антенны будет определяться соотношением

 $C_{np.} = \{q(P_{BX}) [1/(T_{nM} + T_{pacnp.})]\}.$ 

Так как в полимерной структуре можно использовать несколько люминофоров на разные длины волн с Т<sub>лм</sub> в несколько нс, то суммарная пропускная способность линии может достигать десяти Гбит/с.

Возможная структура полимерной планарно-волоконной антенны для опторадиоволнового заоблачного ретранслятора лазерных сигналов со спутника представлена на рис. 3.

Для создания лазерных телекоммуникаций управления малыми БПЛА была разработана и испытана УФ линия передачи цветных видеосигналов между БПЛА. Для формирования УФ сигналов использовались отечественные образцы УФ диодов, разработанные АО «НИИПП» с участием ИЛФ СО РАН и ЗАО «СКБ». Макетный образец полимерной антенны для приема УФ цветных видеосигналов представлен на рис. 4.



Рис. 3. Пленочная антенна для опторадиоволнового ретранслятора



Рис. 4. Макет полимерной антенны для приема сигнала телекоммуникационных систем

Применение данного вида полимерных антенн позволяет получить необходимые диаграммы приема сигналов во время движения БПЛА и обеспечить высокую помехоустойчивость лазерной телекоммуникации к естественным и искусственным помехам.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полимерные нанокомпозиты. Под ред. Ю-Винг Май, Жонг-Жен Ю. – М. : Техно-сфера, 2011. – 688 с.

2. Новотный Лукас, Хехт Берт. Основы нанооптики. Пер. с англ. / Под ред. В. В. Самарцева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 484 с.

3. Баника Ф.-Г. Химические и биологические сенсоры: основы и применения. – М.: Техносфера, 2014. – 880 с.

4. Поллер Б. В. Ультрафиолетовые лазерные информационные системы. Состояние и перспективы развития // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 6, ч. . – С. 21–24.

5. Бритвин А. В., Поллер А. Б., Поллер Б. В., Кусакина А. Е. Характеристики преобразования оптических сигналов в полимерных пленках с люминофорами, с наночастицами железа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 22–26.

6. Структура и функциональные возможности лазерной информационно-сенсорной системы для дистанционного контроля объектов в труднодоступных зонах / А. В. Бритвин, А. Б. Поллер, Б. В. Поллер, Ю. И. Щетинин // Радиолокация, навигация, связь: сб. докл. 19-й Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 16–18 апр. 2013 г. – Воронеж: САКВОЕЕ, 2013. – Т. 1. – С. 178-184.

7. Бритвин А. В., Жумагулов Б. Т., Калимолдаев М. Н и др. // Комплексные системы мониторинга нефтепроводов на базе лазерных и пленочных технологий, Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – № 3. – 2013. – С. 51–54.

8. Бритвин А. В., Глушков Г. С., Никитенко. Н. С. и др. Вопросы построения и результаты экспериментальных исследований средств лазерно-радиоволновой наземно-космической связи и мониторинга // III всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», г. Красноярск, 22–23 сентября, 2016. – С. 387–390.

9. Алексеев Д.В., Бритвин А. В., Орлов С. Г.и др.О свойствах полимерных планарных и волоконных оптических волноводов с микрочастицами и перетяжками // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск: СГГА, 2008. – Т. 4, ч. 2. – С. 22–26.

10. Характеристики энергоинформационной модели и методов построения телекоммуникационной и квантово-криптографической лазерной системы спутниковой связи / Б. Д. Борисов, А. В. Бритвин, А. В. Зверев и др. // Проблемы информатики. – № 1. – 2013. – С. 69–75.

11. О характеристиках опторадиоволновых ретрансляторов для лазерных наземнокосмических сетей и линий связи в условиях облачности / А. В. Бритвин, С. И. Коняев, Б. В. Поллер, Ю. И. Щетинин // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 64–68.

> © А. В. Бритвин, Н. С. Никитенко, В. Ф. Плюснин, А. В. Поважаев, Б. В. Поллер, 2018

#### УДК 539.2

# КОМПАКТНЫЙ ПЛАНАРНЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

#### Сергей Львович Микерин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-66-55, e-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

#### Александр Иванович Плеханов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)333-31-74, e-mail: fractal@iae.nsk.su

#### Андрей Эдуардович Симанчук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-31-74, e-mail: simmk@yandex.ru

#### Александр Вадимович Якиманский

Институт высокомолекулярных соединений РАН, 199004, Россия, г. Санкт-Петербург, В. О. Большой пр., 31, доктор химических наук, зав. лабораторией, тел. (812)323-50-25, e-mail: yak@hq.macro.ru

#### Владимир Владимирович Шелковников

Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 9, доктор химических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-89-96, e-mail: vice@nioch.nsc.ru

#### Наталья Александровна Валишева

Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 13, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-8807, e-mail:valisheva@isp.nsc.ru

Представлены электрооптические модуляционные свойства разработанных волноводных планарных модуляторов на основе оригинальных хромофорсодержащих термостойких полимерных систем, а также с использованием оригинального синтезированного хромофора.

Ключевые слова: электрооптические полимеры, радиофотоника, электрооптический модулятор, генерация второй гармоники, метод Teng-Man.

# COMPACT PLANAR WAVEGUIDE MODULATOR BASED ON ELECTRO-OPTIC POLYMERS

### Sergey L. Mikerin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-66-55, e-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

### Alexander I. Plekhanov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)333-31-74, e-mail: fractal@iae.nsk.su

#### Andrey E. Simanchuk

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)333-31-74, e-mail: simmk@yandex.ru

#### Alexander V. Yakimansky

Institute of Macromolecular Compounds RAS, 31, Bolshoy Prospect St., Saint-Petersburg, 199004, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (812)323-50-25, e-mail: yak@hq.macro.ru

#### Vladimir V. Shelkovnikov

Institute of Organic Chemistry SB RAS, 9, Prospect Lavrentjeva St., Novosibirsk, Russia, 630090, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)330-89-96, e-mail: vice@nioch.nsc.ru

#### Natalia A. Valisheva

Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 13, Prospect Lavrentjeva St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-88-07, e-mail: valisheva@isp.nsc.ru

Electro-optic modulation properties of elaborated waveguide modulators based on original chromophore-doped thermal stable polymer systems, as well as using an original synthesized chromophore are presented.

Key words: electro-optical polymers, microwave photonics, electro-optical modulator, second harmonic generation, Teng-Man technique.

## Введение

Достижения в области волоконно-оптических и микроволновых технологий располагают к взаимной интеграции для создания сверхширокополосных каналов передачи данных в оптическом диапазоне. Ключевыми элементами, которые позволяют реализовать объединение этих двух направлений, являются высокочувствительные компактные широкополосные электрооптические модуляторы. Для создания таких быстрых оптических модуляторов целесообразно вести поиск и исследования сред с высоким нелинейным откликом второго порядка. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются хромофорсодержащие полимеры, упорядоченные на стадии изготовления. Такие тонкопленочные материалы демонстрируют квадратичные оптические нелинейности на один-два порядка превышающие нелинейность неорганических кристаллических структур, что позволяет снизить рабочее напряжение модуляторов на порядок [1, 2]. Кроме того, частотная дисперсия показателя преломления полимерных структур намного меньше, чем у кристаллических аналогов, и позволяет оптическим и СВЧ-волнам распространяться синфазно, что особенно важно для расширения рабочей полосы.

Нелинейно-оптический компонент в таких материалах представляет собой хромофор – органический комплекс с большой резонансной гиперполяризуемостью [1]. Полимерная матрица играет роль фиксирующего остова и определяет предельную концентрацию хромофора, адгезию к сопрягаемым поверхностям, предельную напряженность электрического поля при упорядочении и, что очень важно, термическую стабильность результирующей композиции. Использование термо- и теплостойких полиимидов открывает новые возможности для электрооптических материалов с высокой температурной и временной устойчивостью нелинейного отклика.

В представленной работе рассматриваются результаты разработки и реализации технологии изготовления планарных электрооптических (ЭО) модуляторов на основе синтезированных оригинальных теплостойких полиимидов с ковалентно присоединенным коммерческим красителем DR-13. Также представлены результаты применения оригинальных синтезированных оптически активных хромофоров.

Синтез полиимидов и хромофоров. Приготовление тонкопленочных электрооптических слоев. Синтез ряда оригинальных полиимидов с высокой температурой стеклования с ковалентным присоединением коммерческих красителей дисперсного типа DR (DisperseRed) и исследования их нелинейнооптического отклика, а также вопросов его температурной стабильности, детально описаны в [3-6]. Один из этого ряда, полиимид (рис. 1, *a*) на основе 3,3'-дигидрокси-4,4'-диаминодифенилметана и 4,4'-(фенилен-1,3-диокси) дифталевого ангидрида с ковалентным присоединением хромофора DR13, использовался в настоящей работе.

Оригинальный синтезированный пиразолиновый хромофор5-PIP-NET (2-(5-Оксо-3-циано-1-этил-4-(4-(3-фенил-5-(2,3,5,6-тетрафтор-4-(пиперидин-1-ил)фенил)-4,5-дигидро-1Н-пиразол-1ил)-стирил)-1Н-пиррол-2(5Н)-илиден)- малононитрил, (рис. 1, б) [7] для применения в модуляторе смешивался в соотношении 5/95 масс. % с аморфным поликарбонатом (Aldrich Chemistry).



Рис. 1. Структурные формулы: *a*) полиимид с DR-13; *б*) хромофор 5-PIP-NET

Тонкие пленки на подложках различного типа получались методом центрифугирования (около 600 об/мин) из растворов полимерных композиций. Для получения ЭО отклика пленочные структуры подвергались полингу: нагревались до температуры, близкой к температуре стеклования полимеров (150-180 °C), с помощью контактов к структуре прикладывалось электрическое поле напряженностью не менее 75-100 В на каждый мкм полной толщины структуры, которое удерживалось в течение 20 минут и затем до полного остывания.

Создание волноводных модуляторов. На кремниевую подложку толщиной 250 мкм наносился общий электрод (Au/Cr). Далее последовательно наносились слои УФ-отверждаемого полимера (стандартный фоторезист SU-8): базовый (толщиной 2 мкм) и структурированный (1 мкм), который обрабатывался оптической литографией через маску. В целом эти слои составляли нижнюю обкладку оптической волноводной структуры, в которой были сформированы разные варианты волноводных каналов, как фазовых модуляторов, так и амплитудных (типа интерферометра Маха-Цандера). Активный полимер заполнял сформированные каналы, образуя световедущую сердцевину толщиной 1,5-2 мкм. Заключительный слой коммерческого УФотверждаемого полимера NOA 61 (5 мкм) использовался как верхняя обкладка волноводной структуры. Качество созданных структур оценивалось с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. После отбраковки каналов на подложке на поверхности верхней обкладки формировались управляющие электроды (Au/Ti) над активными участками волноводов. Управляющие и общий электроды использовались для полинга полученных волноводных структур.

Результаты. Модулирующие свойства волноводных структур изучались при нулевых частотах управляющего напряжения (~ 1 кГц). Излучение одночастотного лазера (длина волны 1,3 мкм) заводилось через торец волноводной структуры на сколотой подложке с помощью волокна с сохранением поляризации и концевой линзы, дающей перетяжку диаметром 2,5 мкм. В амплитудном модуляторе в волноводе возбуждалась ТМ или ТЕ мода; в фазовом модуляторе возбуждались оба типа мод. Выходное излучение регистрировалось фотодатчиком через микрообъектив и поляризатор (при фазовой модуляции).

Общие потери излучения на ввод-вывод и распространение в созданных модуляторах не превысили 19 дБ. Амплитудный модулятор на основе полиимида с DR13 продемонстрировал (рис. 2, *a*) параметр L·V<sub> $\pi$ </sub> = 36 см·В (произведение длины активной части волновода на полуволновое напряжение, которое соответствует изменению управляющего напряжения при переходе модулятора между состояниями открыто/закрыто). Фазовый модулятор на основе хромофора 5-PIP-NET показал сравнительно низкий параметр L·V<sub> $\pi$ </sub> = 87 см·В (рис. 2, *б*).



Рис. 2. Осциллограммы интенсивности модулированного несущего излучения на фоне управляющего сигнала треугольной формы:

*а*) амплитудный модулятор на основе полиимида с DR-13; *б*) фазовый модулятор на основе поликарбоната с 5-PIP-NET.

Заключение. Синтезированы оригинальные хромофорсодержащие полиимиды и хромофор, разработаны технологические подходы, подобраны материалы для создания фазовых и амплитудных планарных модуляторов на их основе. Созданы компактные волноводные модуляторы, демонстрирующие параметр L·V лучше 40 см·В и низкие оптические потери.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» (http://ckp-rf.ru/ckp/3046/) при частичной поддержке РНФ (грант 16-13-10156).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dalton L. R., Steier W. H., Robinson B. H., Zhang C., Ren A., Garner S., Chen A., Londergan T., Irwin L., Carlson B., Fifield L., Phelan G., Kincaid C., Amend J., Jen A. From molecules to opto-chips: organic electro-optic materials // J. Mater. Chem. –1999. – V. 9. – P. 1905–1920.

2. Dalton L. R., Sullivan P. A., and Bale D. H. Electric Field Poled Organic Electro-optic Materials: State of the Art and Future Prospects // Chem. Rev. – 2010. – V. 110. – P. 25–55.

3. Nosova G. I., Abramov I. G., Solovskaya N. A., Smirnov N. N., et. al. Synthesis and photophysical properties of soluble polyimides and polyquinazolones containing side-chain chalcones or azo chromophores // Polym. Sci. Ser. B3 – 2011. - V. 53, No. 1-2. - P. 73.

4. Yakimansky A. V., Nosova G. I., Solovskaya N. A., Smirnov N. N., Plekhanov A. I., Simanchuk A. E., Gorkovenko A. I. Dispersion of quadratic nonlinearity of polarized films of chromophore-containing polyimides in the range of resonance absorption // Chem. Phys. Lett. -2011. - V.510, No. 4-6. - P.237-241.

5. Gorkovenko A. I., Plekhanov A. I., Simanchuk A. E., Yakimanskii A. V., Smirnov N. N., Solovskaya N. A., Nosova G. I. Nonlinear optical properties of chromophore-containing polyimides with covalently attached dyes // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014.– V. 50, No. 1. – P. 96-101. – DOI: 10.3103/S8756699014010129.

6. Gorkovenko A. I., Plekhanov A. I., Simanchuk A. E., Yakimanskiy A. V., Nosova G. I., Solovskaya N. A., and Smirnov N. N. Temperature dependence and the dispersion of nonlinear optical properties of chromophore-containing polyimide thin films // J. Appl. Phys. – 2014. –V. 116.–P.223104. – DOI: 10.1063/1.4904194.

7. Полифтортриарил-пиразолины как доноры в синтезе потенциальных электрооптически активных хромофоров / К. Д. Ерин, И. Ю. Каргаполова, Н. А. Орлова, В. В. Шелковников // Сборник тезисов докладов (Ш:У-9): Объединённая международная конференция по органической химии «Байкальские чтения-2017» (Иркутск, 27 августа–2 сентября 2017 г.). – С. 129.

> © С. Л. Микерин, А. И. Плеханов, А. Э. Симанчук, А. В. Якиманский, В. В. Шелковников, Н. А. Валишева, 2018

### ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЗАПИСИ ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С НЕЗАВИСИМО ВАРЬИРУЕМЫМИ ПЕРИОДАМИ

#### Сергей Львович Микерин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-66-55, e-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

#### Владимир Дмитриевич Угожаев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, тел. (383)330-66-55, e-mail: vdu@iae.nsk.su

Дано описание системы, предназначенной для одновременной записи двумерных ортогональных голографических решеток, например, в гелеобразных фотополимерных образцах. Система включает в себя два перестраиваемых двухлучевых интерферометра и узел совмещения интерференционных картин на образце. Их периоды перестраиваются независимо друг от друга в диапазоне 0,83–1,41 мкм при длине волны излучения 0,54 мкм без перемещения интерферометров и образца в процессе перестройки.

Ключевые слова: двухлучевой интерферометр, интерференционная картина, двумерная голографическая решетка, фотополимер, фотонный кристалл.

# INTERFEROMETRIC SYSTEM FOR RECORDING OF TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS WITH INDEPENDENTLY VARIABLE PERIODS

#### Sergey L. Mikerin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-66-55, e-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

#### Vladimir D. Ugozhaev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)330-66-55, e-mail: vdu@iae.nsk.su

A description of a system for simultaneously recording two-dimensional orthogonal holographic gratings, for example, in gel-like photopolymer samples is given. The system includes couple of tunable two-beam interferometers and a unit to superposition of interference patterns on the sample. Periods of the interference patterns are tuned independently of each other in the range  $0.83-1.41 \mu m$  at a radiation wavelength of 0.54  $\mu m$  without any displacement of the interferometers and the sample during the tuning process.

Key words: two-beam interferometer, interference pattern, two-dimensional holographic grating, photopolymer, photonic crystal.

### Введение

Интерференционная фотолитография – эффективный метод изготовления периодических структур на большой площади с масштабом до ~ 10 нм [1]; метод важен также при исследовании голографических материалов [2]. Однако

при его реализации требуются поэтапные экспозиции в фоточувствительном элементе (ФЭ) нескольких элементарных интерференционных картин с разными периодом и ориентацией.

Концепция вращательной перестройки периода интерференционной картины в двухлучевых интерферометрах, допускающая его перестройку без смещения ФЭ относительно интерферометра, предложена и развита в [3–6]. В представленной работе сообщается о разработке интерферометра, в котором применяется механизм имитации вращения, позволяющий перестраивать период при взаимно неподвижных интерферометре, ФЭ и источнике излучения, что сделало возможным совмещать независимо варьируемые интерференционные картины на одном образце.

# Результаты и обсуждение

За основу разработки был взят интерферометр, в котором область интерференции практически совмещена с неподвижным относительно интерферометра ФЭ во всей допустимой области перестройки периода [6]. В этой работе перестройка осуществляется путем совместного вращения интерферометра и ФЭ относительно неподвижного источника исходного светового пучка. Его эквивалентное вращение относительно неподвижного интерферометра не всегда возможно, например, из-за значительных габаритов источника. Таким образом, задача сводится к созданию механизма, который имитировал бы требуемое согласование линейного и углового перемещений исходного пучка на входе в светоделительных кубик при неподвижном источнике, описываемое формулой [6]:

$$q = \sqrt{2} \frac{l \sin \alpha - (h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi) \cos(\alpha - \xi)}{\sin(\alpha - 2\xi) + \cos(\alpha - 2\xi)} + \operatorname{tg} \psi + 1, \tag{1}$$

где q = Q/A — позиция оси исходного пучка 6 на входной поверхности  $C_1C_2$  (рис. 1),  $l = L/A = \text{const} - \text{расстояние между ребром } C_3$  светоделительного кубика и центром симметрии О области интерференции,  $\alpha = \theta + 2\xi + 45^\circ$  – половинный угол схождения,  $\theta$  – угол падения исходного пучка на входную поверхность,  $\xi$  – угол наклона зеркал 3.1 и 3.2 интерферометра к плоскости делительного зеркала в светоделительном кубике, h = H/A – расстояние между этими зеркалами,  $\psi$  – угол преломления, A – длина ребра. ФЭ должен располагаться внутри области интерференции:  $L \approx L_0$ . Расчеты показывают, что полученная из формулы (1) зависимость  $q(\theta)$  близка к линейной (рис. 2) при практически востребованных параметрах разрабатываемого устройства. При малых углах падения ( $|\theta| \ll 1$ , например,  $-5^\circ \le \theta \le 5^\circ$ ) зависимость линейного перемещения от углового оказывается линейной:

$$w = t\theta + q - 1/2, \tag{2}$$

где w = W/A — перемещение подвижного зеркала, отсчитываемое от его начального положения 8, в котором  $\theta = 0$  и q = 1/2; t = T/A — расстояние между входной поверхностью и исходным пучком 6. В (2) учтено, что  $\theta = 2\varphi$ .



Рис. 1. Оптическая схема



Рис. 2. Зависимость  $q(\theta)$  при l = const.На врезке показано отклонение зависимости от линейной

Для решения этой задачи использовалось подвижное зеркало 5, совершающее одновременно два движения: линейное W и угловое  $\varphi$ , воспроизводя требуемые линейное и угловое перемещения исходного пучка по формуле (1).

Рис. З показывает возможное исполнение механизма, реализующего предписываемую формулой (2) линейную зависимость  $w(\theta)$ . В нем подвижное зеркало 5 закрепляется на рычаге 15 с плечом R и при его перемещении вдоль оси z-z на расстояние W поворачивается на угол  $\varphi$  благодаря скольжению края этого рычага по направляющей 17, наклоненной под углом  $\eta$  к оси z-z:

$$w = r\theta/2\eta,\tag{3}$$

где r = R/A. Формула (3) находится из треугольника K<sub>w</sub>KZ<sub>w</sub> по условию малости углов  $\varphi$  и  $\eta$ , используя подстановку  $\varphi = \theta/2$ .



Рис. 3. Кинематическая схема механизма согласования перемещений подвижного зеркала

Из (2) выводится соотношение кинематических параметров данного механизма перестройки интерферометра:

$$w_{\max} = 1 - d + t \Delta \alpha, \tag{4}$$

где  $w_{\text{max}} = w_2 - w_1$  — дистанция, в пределах которой перемещается подвижное зеркало,  $\Delta \alpha = \Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$  — диапазон изменения половинного угла схождения, который может быть достигнут в исследуемом устройстве. Индексы 1 и 2 соответствуют левому 10 и правому 12 граничным положениям исходного пучка диаметром d = D/A (рис. 1). Размеры R и  $\eta$  определяются по конструктивным соображениям из выражения

$$r/\eta = 2w_{\max}/\Delta\alpha,\tag{5}$$

полученного преобразованием (3) с использованием параметров названных граничных положений.

Опытный образец интерферометра [6] был разработан на основе светоделительного кубика с длиной ребра A = 20 мм (рис. 1). Зеркала, ориентированные под углом наклона  $\xi = -15^\circ$ , установлены с малым зазором относительно ребер С<sub>2</sub> и С<sub>4</sub>: расстояние H = 29,1 мм. Начальное значение половинного угла схождения  $\alpha_0 = 15^\circ$ , и для исходного пучка диаметром D = 5 мм при перемещении подвижного зеркала в интервале  $-10 \le W \le 10$  мм этот угол изменяется от 11° до 19°, а период интерференционных полос — от 1,41 до 0,83 мкм соответственно (длина волны 540 нм). В начальном положении исходного пучка центр симметрии интерференционной картины удален от светоделительного кубика на расстояние  $L_{\text{нач}} = 80$  мм, и ФЭ совмещен с этим центром:  $L_0 = L_{\text{нач}}$ . В других положениях область интерференции получает смещение  $\Delta L$  вдоль плоскости делительного зеркала из-за нелинейности уравнения согласования (1). Чтобы поддерживать высокий контраст интерференционных полос, данное смещение должно быть малым по сравнению с половиной продольного размера области интерференции, что задается допуском на величину относительного смещения:  $k_s = 2|\Delta L| \sin \alpha / D \ll 1$ . Рис. 4 показывает, что это относительное смещение, рассчитанное для выбранных параметров опытного образца, с запасом удовлетворяет принятому критерию: максимальное смещение не превыша $et \pm 0,23\%$  и практически не влияет на уровень контраста.

Высший контраст интерференционных полос достигается при использовании линейно поляризованного излучения, причем поляризация должна быть ориентирована перпендикулярно плоскости схождения интерферирующих пучков. Такое обстоятельство позволяет использовать поляризационный кубик для совмещения интерференционных картин от двух интерферометров на поверхности ФЭ таким образом, чтобы их интерференционные полосы оказались перпендикулярными друг другу. Для реализации такого совмещения был разработан оптический узел, в котором одна пара пучков претерпевает поляризационное отражение в поляризационном кубике, а другая проходит сквозь кубик, причем плоскости схождения обеих пар пучков взаимно перпендикулярны. Далее система пучков выводится на ориентированный горизонтально стеклянный столик, на который помещается ФЭ, в частности, жидкая или гелеобразная фоточувствительная среда на прозрачной подложке.



Рис. 4. Зависимость относительного смещения интерференционной картины от угла падения

На основе данной разработки была изготовлена интерферометрическая система (рис. 5), включающая в себя два интерферометра l и узел совмещения 2 с предметным столиком 3, неподвижно закрепленные на общем основании; габариты системы —  $29 \times 20 \times 12$  см. Результаты теста созданных интерферометров показали удовлетворительное согласие экспериментальной и теоретической зависимости угла схождения пучков от смещения подвижного зеркала.



Рис. 5. Созданная интерферометрическая система: 1 – двухлучевые интерферометры; 2 – узел совмещения с выходной призмой; 3 – столик для размещения образцов

## Заключение

Представлены теория, характеристики и конструкция компактной интерферометрической системы, позволяющей осуществлять одновременную запись двух взаимно ортогональных интерференционных картин с независимо регулируемыми периодами в диапазоне 0,83–1,41 мкм при длине волны излучения 0,54 мкм. Система строится из двух одинаковых неподвижных перестраиваемых двухлучевых интерферометров, плоскости симметрии которых перпендикулярны друг к другу, и установленного в области их пересечения узла совмещения интерференционных картин на образце. Эти картины остаются неподвижными при перестройке любого из интерферометров, и перемещение образца при переходе от одной экспозиции к другой не требуется. Система рассчитана на использование любых образцов, в том числе жидких или гелеобразных фоточувствительных сред на прозрачных подложках. Она позволяет использовать один общий источник для обоих интерферометров или два взаимно независимых источника светового излучения с вертикальной поляризацией генерируемого излучения.

Практическая реализация интерферометра выполнена с использованием точного обрабатывающего оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» (http://ckp-rf.ru/ckp/3046/).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lu C., Lipson R. H. Interference lithography: a powerful tool for fabricating periodic structures // Laser photonics rev. 2010. – V. 4, N. 4. – P. 568-580.

2. Shelkovnikov V. V., Vasil'ev E. V., Gerasimova T. N., Pen E. F., Plekhanov A. I. Dynamics of pulsed recording of holographic diffraction gratings in photopolymer materials // Optics and spectroscopy. -2005. - V. 99, N. 5. - P. 806-815.

3. Mikerin S. L., Ugozhaev V. D. A Simple Two-Ray Interferometer Based on a Beamsplitter Cube // Optics and spectroscopy. – 2011. – V. 111, N. 6. – P. 973-979.

4. Mikerin S. L., Ugozhaev V. D. Reconfigurable Holographic Interferometer with Fixed Mirrors // Optoelectronics, instrumentation and data processing. -2012. -V. 48, N. 4. -P. 341-350.

5. Mikerin S. L., Ugozhaev V. D. A simple two-ray interferometer tuned by rotation; Tuning of interference pattern period by rotation of interferometer itself; A rotational tuning of convergence angle in a two-ray interferometer with fixed mirrors. In: Interferometers: Fundamentals, Methods and Applications / K. Harmon Eds. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers. – 2015. – 277 p.

6. Ugozhaev V.D. Rotationally tunable two-beam interferometer with a fixed photosensitive element. Part I. Interferometer based on a beam-splitter cube // Optoelectrincs, instrumentation and data processing. -2016. -V. 52, N. 2. -P. 153-160.

7. Mikerin S. L., Ugozhaev V. D. Dvukhluchevoy interferometr (varianty) [Two-beam interferometer (versions)]. Patent application for invention No. 2017141671. 29.11.2017.

© С. Л. Микерин, В. Д. Угожаев, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВОГО ГИБРИДНОГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ФОТОРЕПЛИКАЦИИ

#### Дмитрий Игоревич Деревянко

Институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 9, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории органических светочувствительных материалов, тел. (383)330-96-42, e-mail: dmitryderevianko@gmail.com

#### Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Проспект акад. Коптюга, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

#### Владимир Владимирович Шелковников

Институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 9, доктор химических наук, зав. лабораторией органических светочувствительных материалов, тел. (383)330-96-42, e-mail: vice@nioch.nsc.ru

Работа посвящена изучению механических свойств гибридного фотополимерного материала на основе акрилат-акриламидных и тиол-силоксановых олигомеров. Были сформированы микроструктуры методом фоторепликации. Новый материал может найти применение при изготовлении механически и химически устойчивых фазовых дифракционных и интегрально-оптических элементов.

**Ключевые слова:** гибридный материал, фотополимерная композиция, фотополимер, модуль юнга, твердость, фоторепликация.

# STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF A NEW HYBRID PHOTOPOLYMERIC MATERIAL FOR PHOTOREPLICATION

#### **Dmitriy I. Derevyanko**

Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS, 9, Prospect Lavrentieva St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, Laboratory of Organic Lightsensitive Materials, phone: (952)927-17-32, e-mail: derevyanko@nioch.nsc.ru

### Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of Diffractive Optics, phone: (383)33-33-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

#### Vladimir V. Shelkovnikov

Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS, 9, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of Organic Lightsensitive Materials, phone: (952)927-17-32, e-mail: vice@nioch.nsc.ru

The photopolymeric composition based on acrylate-acrylamide and thiol-siloxane was synthesized in Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS. The mechanical characteristics of hybrid photopolymeric material have been studied. The characteristics were compared with
the same for industrially produced polymers. Microstructures were formed by the method of photoresplication. New material can be applied for manufacturing of mechanically and chemically rigid diffractive and integrated optical components including ones on curved substrates.

Key words: hybrid material, photopolymer composition, photopolymer, youth modulus, hardness, photoreplication.

На сегодняшний день активно разрабатываются и исследуются фотополимерные гибридные органически-неорганические материалы для изготовления микрооптических и дифракционных компонентов [1, 2]. Фотополимеризованные пленки на основе гибридных фотополимерных композиций (ГФК) могут содержать различное соотношение компонент, что позволяет комбинировать свойства неорганических (хорошая адгезия, твердость, температурная стойкость, стойкость к плазмохимическому травлению) и органических (пластичность, гидрофобность, низкая диэлектрическая проницаемость) соединений [3].

Среди гибридных фотополимерных материалов наиболее известны и коммерчески доступными являются фотополимерные материалы серии Ormocer. Материал Ormocer (Organically Modified Ceramics) является гибридным ультрафиолетовым фотоотверждённым полимером и включает несколько вариантов композиций для различных технологий изготовления микрооптических компонентов. В частности ГФМ Ormocomp нашел широкое распространение для фоторепликации [4].

В данной работе исследованы свойства гибридного фотополимерного материала (ГФМ), полученного на основе акрилат-акриламидного мономера (АМ) и тиол-силоксанового олигомера (ТС) [5]. Структурные формулы данных соединений приведены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.



Рис. 1. Структурная формула акрилат-акриламидного мономера



Рис. 2. Структурная формула тиол-силоксанового олигомера

Силоксановые группы придают гибкость и термоустойчивость, тиольные группы защищают от кислородного ингибирования при фотополимеризации композиции, а двойные связи в акрилатных группах под действием света раскрываются, образуя сетку сшитого полимера.

Механические свойства фотополимеризованного материала были охарактеризованы с помощью сканирующего нанотвердомера НАНОСКАН 3D [6], так были определены твердость и модуль Юнга при разных соотношениях структурных блоков. Для сравнения были также проведены измерения для пленок SU-8 и Ormocomp (таблица).

Материал	Модуль Юнга, GPa	Твердость, GPa
AM	2,45±0,95	0,15±0,02
AM :TC 2:1	4,2±0,35	0,29±0,01
AM :TC 1:1	4,72±0,41	0,38±0,02
AM :TC 1:2	4,72±0,32	0,37±0,01
AM :TC 1:4	4,3±0,26	0,32±0,01
ТС	2,05±0,24	$0,16 \pm 0,01$
SU-8	4.8±0.10	0.34±0.02
OrmoComp	6.7±0.47	0.45±0.05

# Модуль Юнга и твердость полимеров

Зависимости модуля упругости и твердости от мольной доли TC олигомера к AM имеют одинаковую тенденцию к росту при увеличении доли TC олигомера до  $\approx 0,4$ . На наш взгляд этому способствует увеличение количества тиольных групп в композиции, что приводит к снятию эффекта кислородного ингибирования фотополимеризации и как следствие к формированию сшитой пленки с более высокой степенью конверсии двойных связей AM. С другой стороны можно увидеть уменьшение значений механических характеристик при увеличении доли TC олигомер  $\approx$  более 0.7, можно предположить, что это связано, с уменьшением количества акрилатных групп, способных к фотополимеризации, и как следствие отсутствием жесткой сшитой пленки. Наибольшее значение механических свойств ГФМ, наблюдается для соотношений AM:TC 1:1 (Модуль Юнга - 4,72±0,41 гПа, твердость 0,38±0,02 гПа) – это близкое значение для эпоксидного фоторезиста SU-8.

Высокие значения механических свойств ГФМ и нечувствительность тиоленовой реакции к воде и кислороду создали предпосылки для создания микроструктур методом фоторепликации [7, 8]. На рис. 3 представлен процесс фоторепликации.



Рис. 3. Процесс УФ-штамповки: А) нанесение ФПК на рельефную мастер-форму, В) УФ-облучение, С) снятие реплики

На первом этапе создания микроструктур методом фоторепликации 200 мл 30 % раствора ГФМ в хлороформе при соотношении АМ к TC 2:1 наносили на стеклянную мастер копию с квадратной топологией (рис. 4, *a*). Далее, для избавления от остатков растворителя, был осуществлен этап предварительной термообработки плёнок в течение 30 мин на программируемой плите при температуре 60°С. На следующем этапе происходило УФ-облучение на приборе Electro-cure-500 (electro light corp.) на протяжении 10 минут. На завершающем этапе облученную пленку механически отслаивали от подложки. Ниже приведены микроструктуры, полученные путем тиоленовой реакции с помощью фоторепликации (рис. 4,  $\delta$ ).



Рис. 4. *а*) Профилограмма мастер копии (ширина столбца – 5 мкм, высота 0,8 мкм), полученная с помощью интерферометра белого света WLI; б) Фотография микроструктур на ГФМ

Из рис. 4, *б* видно, что разработанный материал позволяет получить микроструктуры, имеющие следующие параметры: ширина 5 мкм и высота 0,8 мкм, полученные микроструктуры не обладают дефектами. Исследуемые мономеры могут быть использованы для создания микроструктур под действием УФ-облучения методом фоторепликации. В работе были измерены твердость, модуль Юнга, для нового гибридного фотополимерного материала на основе акрилат-акриламидных и тиолсилоксановых олигомеров. Получены экспериментальные зависимости модуля упругости и твердости от состава ГФМ. Продемонстрирована возможность создания микроструктур методом фоторепликации. Достигнутые физические параметры нового фоточувствительного гибридного материала позволяют в перспективе создавать механически прочные микроструктурированные оптические компоненты.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ (проект 16-13-10156) и частично за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7) в ИАиЭ СО РАН. Профилометрия образцов осуществлялась на оборудовании ЦКП «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» в ИАиЭ СО РАН.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shelkovnikov V. V., Ektova L. V., Orlova N. A., Ogneva L. N., Derevyanko D. I., Shundrina I. K., Salnikov G. E., Yanshole L. V. Synthesis and thermomechanical properties of hybrid photopolymer films based on the thiol-siloxane and acrylate oligomers // J. Mater. Sci. - 2015. - V. 50, No. 23. - P. 7544-7556.

2. Sanchez C., Rozes L., Ribot F., Laberty-Robert C., Grosso D., Sassoye C., Boissiere C., Nicole L. "Chimie douce": a land of opportunities for the designed construction of functional inorganic and hybrid organic-inorganic nanomaterials.// C. R. Chim. – V.13, No. 1. – P. 3-39.

3. Mironnikov N. G., Korolkov V. P., Derevyanko D. I., Shelkovnikov V. V., Vitrik O. B., Zhizhchenko A. Yu. Study of optical and thermo-optical properties based on thiol-siloxane and acrylate oligomer of a hybrid photopolymer material // Optoelectronics, instrumentation and data processing. -2016. - V. 52, No. 2. - P. 180-186.

4. Hybrid Polymers // Micro resist technology. URL: http://microresist.de /en/product/hybrid-polymers (дата обращения: 1.03.2018).

5. Деревянко Д. И., Орлова Н. А., Шелковников В. В. Синтез и полимеризация мономера смешанного акрилатно-акриламидного типа на основе 4,4'-бис(гидрокси)дифенилсульфида // Молодёжная научная школа-конференция «Актуальные проблемы органической химии»: сборник тезисов, (Шерегеш, 09-16 Марта 2018 г.). – Шерегеш, Кемеровская обл., 2018. – С. 120.

6. Миронников Н. Г., Корольков В. П., Деревянко Д. И. Исследование механических и термооптических свойств нового гибридного фотополимерного материала // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 59–64.

7. Lowe A.B. Thiol-ene "click" reactions and recent applications in polymer and materials synthesis // Polym. Chem.– 2010.– V. 1.– P. 17-36

8. Shelkovnikov V.V., Derevyanko D.I., Ektova L.V., Orlova N.A., Loskutov V.A., Vasil'iev E.V., Karpova E.V. Photopolymerization kinetics of a thiol–enol composition determined via recording / playback of a transmission holographic diffraction grating // Polymer Science Ser. B. – 2016. – V.58, I.5. – P. 519-528

© Д. И. Деревянко, В. П. Корольков, В. В. Шелковников, 2018

# АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТАХ

# Марат Саматович Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

# Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, зав. лабораторией, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

## Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, старший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

# Дмитрий Яковлевич Машников

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (383)330-87-43, e-mail: mashnikovdmitriy@gmail.com

Изучаются процессы акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах с применением сейсмических вибраторов в качестве источников низкочастотных акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере, и лазерных измерительных линий как оптических приемников колебаний. Предложенные типы источника и приемника в интересах изучения акустооптического взаимодействия определяют новизну и оригинальность предлагаемого подхода. Приводятся результаты экспериментов по оцениванию характеристик акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, инфранизкие частоты, сейсмический вибратор, лазерная измерительная линия, оптический стенд, экспериментальные исследования.

# ACOUSTOOPTIC INTERACTION ON LOW FREQUENCIES

## Marat S. Khairetdinov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia

## Boris V. Poller

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia

#### Aleksandor V. Britvin

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

# **Dmitriy Y. Mashnikov**

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-87-43, e-mail: mashnikovdmitriy@gmail.com

Processes acoustooptic interactions on low frequencies with application of seismic vibrators as sources of the low-frequency acoustic fluctuations, extending in atmosphere, and laser measuring lines as optical receivers of fluctuations are studied. Offered source and receiver type in interests of studying acoustooptic interactions define novelty and originality of the offered approach. Results of experiments on evaluation characteristics interactions on low frequencies are resulted.

**Key words:** acoustooptic interaction, low frequencies, seismic vibrator, laser measuring line, optical stand, experimental researches.

Введение. Вопросы акустооптического взаимодействия имеют давнюю историю и связаны они в основном с изучением дифракции света в ультразвуковом и радиочастотном диапазонах [1-3]. При этом практически неисследованными остаются вопросы акустооптического взаимодействия в области инфранизких частот. Это обусловлено отсутствием специальных акустических излучателей в этом диапазоне частот. В тоже время авторами данной работы и другими исследователями показано, что альтернативой указанным источникам являются сейсмические вибраторы, которые способны наряду с сейсмическим волнами в земле излучать акустические колебания в атмосфере [4,5]. К ним, в частности, относятся центробежные вибраторы ЦВ-100 и ЦВ-40 [6]. Благодаря высокой синхронности излучения акустических колебаний сигналы от таких источников могут регистрироваться на больших удалениях за счет использования методов корреляционно-спектрального накопления. При этом благодаря ограниченной мощности излучения решается одновременно проблема экологической безопасности использования данного класса источников в отличие от мощных взрывных источников. Все это вместе взятое открывает возможности проведения экспериментальных исследований по изучению закономерностей процессов акустооптического взаимодействия, результаты которых представляют интерес для создания комбинированных сейсмо-акусто-оптических информационных технологий.

Актуальность темы исследований, наряду с ее фундаментальной компонентой, определяется необходимостью решения задач акустического обнаружения и локации различных техногенных и природных объектов и событий с помощью световых измерительных колебаний наряду с использованием колебаний иной природы, например, сейсмических. Если для регистрации последних используется группирование датчиков с определенной пространственной расстановкой, то измерительный луч по отношению к низкочастотным акустическим колебаниям представляет собой непрерывную когерентную антенну, позволяющую определять с высокой точностью углы прихода низкочастотных акустических волн от внешних источников.

Предложенный подход к изучению акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах определяют новизну и оригинальность методической части проводимых исследований.

В основе рассматриваемого типа акустооптического взаимодействия лежат процессы, связанные с волновым возмущением лазерных световых колебаний внешним акустическим полем, сквозь которое в атмосфере распространяется световой луч. Возмущенная атмосфера в локальных точках пространства обуславливает изменение параметров распространения лазерного излучения, включая его характеристики преломления, поглощения и рассеяния. Следствием этого могут быть вариации амплитудных уровней и скоростей распространения измерительных волн, их фазо-частотные преобразования, определяющие возможности «лучевого приема» акустических колебаний.

Постановка задачи. Рассматривается взаимодействие волновых колебаний разной природы – акустический волновой процесс

$$\nabla^2 x - \frac{1}{\nu^2} \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \tag{1}$$

и процесс в измерительном луче

$$\nabla^2 y - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0$$
 (2)

где  $\upsilon$ , c – скорости распространения акустической и измерительных волн соответственно,  $\nabla^2$  – оператор Лапласа. Уравнение (1) допускает решение в виде плоской гармонической волны с амплитудой A:  $x(t) = A \sin(\omega t - \overline{k} \ \overline{r})$ , где  $\overline{r}$  – радиус-вектор,  $\overline{k}$  – волновой вектор, причем  $|\overline{k}| = k = \omega/\upsilon$ .

Взаимодействие обоих волновых процессов основывается на том, что акустический волновой фронт, характеризуемый в точках среды значениями акустических давлений, обуславливает возникновение в среде механических деформаций *a<sub>j</sub>*. Вследствие этого каждая акустическая волна сопровождается изменением показателя преломления среды *n*. С учетом этого для плоской монохроматической акустической волны, распространяющейся вдоль заданного направления *z*, меняющийся показатель преломления может быть представлен в виде

$$n(z,t) = n + \Delta n \cos(2\pi f t - kz)$$
(3)

Здесь n – невозмущенный показатель преломления, f и k – частота и волновое число,  $\Delta n$  – амплитуда изменения показателя преломления под действием

акустической волны. Для падающего света среда с показателем преломления (3) представляет собой дифракционную решетку, движущуюся со скоростью звука *v*. Проходя через такую среду, свет дифрагирует на неоднородностях показателя преломления в зависимости от частоты колебаний акустической волны. Условия осуществимости лучевого приема, основанные на соотношениях параметров внешнего акустического поля и измерительных колебаний, определяются следующими соотношениями:

$$V/\omega >> c_0/\upsilon, \ L/rl >> 1, \ \lambda/d > 0.82$$

$$L/\lambda << \begin{cases} c_0^2/c_m \upsilon \ npu \ c_0/\upsilon >> 1 \\ c_0^2/c_m \upsilon, \ c_0/(\upsilon - c_0) \ npu \ c_0/\upsilon < 1 \end{cases}$$

Здесь  $V, C_0, C_m^{\neg}$  – угловая частота, средняя скорость и амплитуда параметрического изменения скорости распространения колебаний в измерительном луче; L, d – длина и диаметр измерительного луча;  $\omega, \lambda, \upsilon$  – угловая частота, длина волны и скорость распространения внешних акустических колебаний; rl – радиус пространственной корреляции неоднородностей среды.

Приведенные соотношения определяют требования к выбору условий регистрации акустических колебаний с помощью лазерной измерительной линии. В реальных условиях на процессы регистрации влияют ряд факторов: неоднородность атмосферы, внешние шумы и освещенность и др. Полнота учета всех внешних факторов достигается в условиях проведения экспериментальных исследований.

Для проведения исследований авторами создан макет акусто-оптической информационной системы (рис. 1) в составе сейсмического вибратора ЦВ-40 (акустического излучателя), оптического стенда в составе лазерного излучателя, оптического приемника. Для прямой регистрации акустических колебаний используются автономные регистрирующие цифровые станции, располагаемые вдоль измерительного луча. Метеостанция предназначена для регистрации метеоусловий в окружающей атмосфере. Схема оптического стенда представлена на рис. 2.

На представленных схемах вибратор ЦВ-40 играет роль внешнего низкочастотного генератора акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере в диапазоне частот 6,25-11,23 Гц. Роль оптического стенда состоит в формировании импульсов накачки длительностью 50 мкс с частотой следования 1-10 кГц с помощью генератора импульсов (ГИ) и модуля регулировки частоты (РЧ), передачи – приема их по оптической линии связи с последующим выделением огибающей импульсов с применением интегратора (ИНТ), как это показано на рис. 3. Выделяемая огибающая несет в себе информацию о внешних воздействиях на измерительный лазерный луч в виде фазо-частотновременных характеристик. Измерения их проводились в условиях лаборатории и открытой атмосферы с использованием отражателей.



*a*)



Рис. 1. Компоненты акустооптической системы: а) сейсмический вибратор ЦВ-40; б) акусто-оптический стенд.



Рис. 2. а) функциональная схема модуля излучателя оптических импульсов;
б) функциональная схема оптического приемника. Здесь ИП-источник питания, ГИ-генератор импульсов, РЧ-регулятор частоты, УС-усилитель, М-модулятор, МЧ-модулирующая частота, ЛД-лазерный полупроводниковый детектор, ОС-оптическая система, ФД-фазовый детектор, ПФ-полосовой фильтр, Д-детектор, ИНТ-интегратор



Рис. 3. Запись оптического сигнала с несущей 1 кГц, модулированного по амплитуде акустическим сигналом и внешним шумом

В экспериментах выполнено оценивание предельно низкого уровня глубины амплитудной модуляции измерительного луча, характеризующего чувствительность акустооптического взаимодействия. Идея измерений в лабораторных условиях основывается на принципах амплитудной модуляции (AM) импульсов накачки лазерного излучения до задаваемой глубины модуляции от модулятора М прецезионными гармоническими сигналами в диапазоне частот 2-20 Гц (рис. 2, *a*) с последующей передачей – приемом по оптической линии длиною 80 м. В частности, примеры осциллограмм передачи АМ модулированных сигналов и приема демодулированных, представлены на рис. 4, 5.





Рис. 5. Осциллограмма 10 % АМ сигнала и выходного сигнала на атмосферной трассе

Рис. 4 соответствует случаю «передачи-приема» в условиях лаборатории на трассе протяженностью 80 м и глубине модуляции 5,1 %, рис. 5 – «передаче-

приему» по атмосферной трассе при глубине модуляции 10%. Очевидно, предельные чувствительности в условиях воздействия шумов можно достигать за счет применения цифровых методов обработки огибающей оптического сигнала. К числу таких методов относятся алгоритмы квадратурного измерения амплитуд и фаз гармонических колебаний [7].

С помощью этих алгоритмов для случая использования внешнего модулирующего колебания с частотой 5 Гц с глубиной модуляции 0,4 % на рис. 6, а и 6, б соответственно получены текущие значения оценок амплитуд и фаз огибающей оптического сигнала на каждом шаге  $m_i$  (i = 1...N, где N – множество дискретных отсчетов огибающей, укладывающихся на временном интервале анализа Т. В рассматриваемом случае T = 60 с) итерационного оценивания дискретных значений параметров. Количественные значения шагов представлены на оси абсцисс. Конечные результаты оценивания амплитуд и фаз определяются их установившимися значениями, начиная с некоторой итерации *m*<sub>vcr</sub> Аналогичные результаты для глубины модуляции 16 % и частоты 10 Гц представлены соответственно на рис. 7, а, б, в. На рис. 6, в и рис. 7, в для рассматриваемых случаев представлены результаты спектрального выделения модулирующего сигнала на фоне шумов. В проведенных тестовых экспериментах показано, что наиболее чувствительными к акустооптическому взаимодействию является фазо-частотные характеристики, позволяющие обеспечить достижимость определения в оптическом сигнале глубины модуляции до уровня в 0,1 %.





Рис. 7

Акустооптические взамодействия с использованием акустических колебаний вибрационных источников относятся к числу слабых взаимодействий, которые можно обнаружить лишь методами накопления сигналов в шумах. С учетом этого важно оценить верхние граничные значения по дальности, которые достижимы для выбранного типа вибрационного источника, каковым является вибратор ЦВ-40. Теоретически рассчитанные траектории распространения инфразвуковых волн могут охватывать линейную базу на поверхности Земли до 100 км [6].

С учетом такого обоснования выполнен эксперимент по регистрации акустических колебаний от вибратора ЦВ-40 вдоль линейного профиля протяженностью 100 км. Соответственно разработана и успешно апробирована в экспериментах с вибратором ЦВ-40 методика корреляционного накопления зондирующих ЛЧМ-сигналов вида s(t)= $A\cos(\omega_0 t+\beta t^2/2)$ , где  $\beta$  – скорость нарастания частоты излучения источника в пределах 7.91-11.23 Гц. Результаты сверток в зависимости от дальности представлены на рис. 8. Как следует из полученных сигналов помехоустойчивость результатов накопления во многом определяется зашумленностью пунктов регистрации. Справа на рис. 9 приведены нормированные графики затухания акустических и сейсмических сигналов по расстоянию. Как следует из полученных данных, усредненное ослабление силы звука в пределах 100 км составляет 4 порядка, т.е. 40 дБ. Принимая во внимание, что сила звука убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника, в данном случае в 100<sup>2</sup> раз (40 дБ), приходим к тому, что на инфранизких частотах ослабление звука по расстоянию полностью определяется фактором геометрического расхождения волнового фронта акустической волны. Это означает, что фактором поглощения акустической энергии в атмосфере практически можно пренебречь.



Рис. 8. Результаты сверток ЛЧМ-сигналов от вибратора ЦВ-40 в зависимости от дальности



Рис. 9. Графики затухания акустических и сейсмических волн по дальности

В этом несомненное достоинство способа изучения акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-07-00872-а, 16-07-01052-а.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория и практика современной акустооптики / В. Я. Молчанов, Ю. И. Китаев, А. И. Колесников, В. Н. Нарвер, А. З. Розенштейн, Н. П. Солодовников, К. Г. Шаповаленко. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 459 с.

2. Богданов С. В. Акустооптические методы измерения скорости звука. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. – 142 с.

3. Корпел А. Акустооптика – Acousto-optics. – М. : Мир, 1993.

4. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Дряхдов С. И., Ковалевский В. В., Михайленко Б. Г., Пушной Б. М., Фатьянов А. Г., Хайретдинов М. С., Шорохов М. Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. – 1996.

5. Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 3. – С. 431–441.

6. Гуляев В. Т., Кузнецов В. В., Плоткин В. В., Хомутов С. Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмовибраторов // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 303–312.

7. Хайретдинов М. С., Родионов Ю. И., Дворецкая Л. Г. Программно-технические средства обработки вибросейсмических сигналов и анализа микросейсм / Препринт 969. – ВЦ СО РАН, Новосибирск, 1993. – 42 с.

© М. С. Хайретдинов, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер, Д. Я. Машников, 2018

# ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕННОЙ ПЛЕНКИ ЭТАНОЛА ПРИ ЕЕ ИСТЕЧЕНИИ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ СПУТНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА ИЗ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО КАНАЛА В ВАКУУМ

## Александр Дмитриевич Назаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

## Виктор Григорьевич Приходько

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

#### Игорь Вячеславович Ярыгин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

В работе экспериментально исследуется течение пристенной пленки этанола внутри осесимметричного канала в условиях высокоскоростного спутного потока воздуха при истечении в вакуум. С помощью датчиков емкостного измерены средние толщины и волновые характеристики пленки в широком диапазоне чисел Рейнольдса спутного газового потока.

**Ключевые слова:** спутный поток газа, пристенная пленка жидкости, толщина пленки, волновые характеристики пленки.

# WAVE CHARACTERISTICS MEASUREMENT OF NEAR-WALL ETHANOL FILM UNDER EJECION INTO VACUUM WITH HIGH-VELOCITY CO-CURRENT GAS FLOW FROM THE AXISYMMETRIC CHANNEL

## Alexandr D. Nazarov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Dr. Sc., Senior Researcher, phone: (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

#### Victor G. Prikhodko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher

## Igor V. Yarygin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher

Interaction of near-wall liquid film flow of ethanol with high-velocity co-current air flow inside axisymmetrical channel under ejection into vacuum is studies experimentally. Liquid film mean thickness and wave characteristics are measured in the wide range of Reynolds numbers of co-current gas flow with the help of capacity-type probes.

Key words: co-current gas flow, near-wall film, film thickness, wave characteristics of a film.

В настоящее время широкое распространение получило использование тонких пленок жидкости в различных технических устройствах и технологических процессах. Общепринятым является деление пленок на два класса – гравитационные, стекающие по наклонным, либо вертикальным поверхностям, и стрессовые, движущиеся под действием газового потока [1]. В данной работе рассматривается взаимодействие пристенной пленки этанола с высокоскоростным (до сотен метров в секунду) спутным потоком воздуха внутри осесимметричного цилиндрического канала с последующим истечением в вакуум или затопленное пространство.

Эксперименты были проведены на Вакуумном газодинамическом комплексе ИТ СО РАН, позволяющим за счет большого объема вакуумной камеры (150 м<sup>3</sup>) выполнять исследования в импульсных режимах с большими расходами жидкости и газа, недостижимыми при работе в непрерывном режиме [2]. Для исследования течения пленки этанола внутри канала в данной работе была выбрана методика с использованием датчиков емкостного типа [3]. Данный метод не вносит возмущений в измеряемый поток, обладает хорошим временным разрешением (частота измерений 1 кГц по каждому датчику), пространственной локализацией (диаметр электрода – 1,6 мм) и хорошей точностью. Для тарировки емкостных датчиков использовалась оригинальная методика, приведенная в [4]. Схема рабочего участка показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема рабочего участка:

*1* – пленка жидкости, *2* – датчик для измерения толщины, *3* – датчики для измерения толщины и скорости, *4* – канал

Для измерения скорости движения пристенной пленки использовались два последовательно расположенных зонда 3, для измерения толщины – четыре зонда 2, расположенных через 90°. Измерения толщины и скорости пристенной

пленки жидкости проводятся вблизи выходного сечения осесимметричного канала, в качестве которого была использована цилиндрическая латунная трубка с внутренним диаметром 10 мм и длиной 20 мм, имеющая форкамеру диаметром 20 мм. Начальные температуры газа и жидкости были комнатными. Эксперименты проводились в импульсных режимах с длительность 5 секунд, при этом давление в вакуумной камере за время запуска поднималось на величину, не превышающую 0,1 Па. Рабочий участок устанавливался внутри вакуумной камеры вертикально, выходным сечением канала вниз. Массовый расход газа изменялся от 0,5 г/с до 20 г/с, расход жидкости – от 0,6 г/с до 2 г/с.

На рис. 2 приведены записи толщины пленки во времени при истечении в вакуум для разных значений числа Рейнольдса спутного газового потока Re<sub>gas</sub>. Можно видеть, что спутный газовый поток оказывает определяющее влияние на течение пленки – существенным образом меняется как толщина, так и амплитуда волн на поверхности пленки жидкости.



Рис. 2. Временные зависимости толщины пристенной пленки этанола для разных параметров спутного газового потока:  $a - \operatorname{Re}_{gas} = 1.5 \cdot 10^5$ ,  $b - \operatorname{Re}_{gas} = 6.9 \cdot 10^3$ 

Использование в качестве рабочего участка цилиндрической трубки позволило варьировать в широких пределах скорость и плотность спутного газового потока. На рис. 3 приведены экспериментальные данные для двух режимов истечения, отличающихся скоростью спутного газового потока V (60 м/с и 106 м/с), но при одинаковых числах Рейнольдса  $\text{Re}_{gas} = 4,3\cdot10^4$ , что обеспечивалось соответствующим изменением плотности газового потока. Можно видеть, что как волновые характеристики, так и средние толщины пленок довольно близки между собой, что говорит об определяющем влиянии числа Рейнольдса спутного потока газа на параметры пленки.



Рис. 3. Толщина пленки этанола, «растянутая» по времени

Проведенные эксперименты позволили получить количественные данные по средним толщинам пленок этанола в рассматриваемых условиях, а именно при изменении скорости спутного газового потока от 6 до 317 м/с (при изменении числа Маха от 0,02 до 1) и провести их обобщение. Соответствующие результаты приведены на рис. 4, из которого видно, что в исследованном диапазоне режимных параметров средние толщины пленок удовлетворительно обобщаются по числу Рейнольдса  $\text{Re}_{\text{gas}}$  спутного газового потока. На рис. 5 приведены амплитуды. Можно видеть, что с увеличением  $\text{Re}_{\text{gas}}$  уменьшается как средняя толщина, так и амплитуда волн на поверхности пленки.





Рис. 5. Зависимость амплитуды волн от Re<sub>gas</sub>

Кроме данных по толщинам и амплитудам волн проведенные исследования позволили получить также частотные характеристики. На рис. 6 приведены измеренные значение частоты мелких волн (ряби), регистрируемых на поверхности пленки жидкости.



Рис. 6. Зависимость частоты мелких волн на поверхности пленки от Regas

На рис. 7 приведены измеренные значение частоты крупных волн на поверхности пленки жидкости.



Рис. 7. Зависимость частоты крупных волн на поверхности пленки от Regas

Проведенный цикл исследований по взаимодействию пристенных пленок жидкостей со спутным газовым потоком позволил провести измерения локальных характеристик (толщины пленки, амплитуды, частот мелких и крупных волн) пристенной пленки этанола при движении внутри цилиндрического канала в диапазоне чисел Рейнольдса газа  $\text{Re}_{\text{gas}} = 3 \cdot 10^3 \cdot 1.6 \cdot 10^5$ . Установлено, что спутный газовый поток оказывает определяющее влияние на параметры течения пленки жидкости. Показано, что толщина пленки, амплитуда волн, частоты как крупных волн на поверхности пленки, так и мелких волн (ряби) коррелируют с числом Рейнольдса спутного газового потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного гранта 16-08-00436.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волновое течение пленок жидкости. – Новосибирск : Наука, 1992. – 256 с.

2. Приходько В. Г., Храмов Г. А., Ярыгин В. Н. Крупномасштабная криогенновакуумная установка для исследования газодинамических процессов // ПТЭ. 1996. – Т. 39. – № 2. – С. 162–164.

3. Серов А.Ф., Котов С.В., Назаров А.Д., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю. Емкостной измеритель локальной толщины пленки жидкости // ПТЭ. 1997. – Т. 40. – № 1. – С. 136–139.

4. Вязов Ю. Н., Вотинов П. Р., Ярыгин И. В. Диагностика параметров пристенной пленки жидкости при ее взаимодействии со спутным потоком газа в цилиндрическом канале // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 152–156.

© А. Д. Назаров, В. Г. Приходько, И. В. Ярыгин, 2018

# ФОРМИРОВАНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕСТОВЫХ СИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ КОНФОРМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

## Дмитрий Александрович Белоусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)330-79-31, e-mail: d.a.belousov91@gmail.com

#### Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

#### Руслан Камильевич Насыров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, старший научный сотрудник, тел. (383)330-79-31, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

Представлены результаты исследования применения тестовых синусоидальных решёток для осуществления производственного контроля конформальных элементов на каждом технологическом этапе полутоновой растровой фотолитографии. Показано, что использование тестовых решёток синусоидальной формы позволяет получать полную характеристическую кривую во всём исследуемом диапазонеформирования микрорельефа.

Ключевые слова: конформальные оптические элементы, растровая полутоновая фотолитография, производственный контроль, тестовая синусоидальная решетка.

# MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF SINUSOIDAL GRATING TEST PATTERNS FOR PRODUCTION INSPECTION OF CONFORMAL ELEMENTS

#### Dmitrij A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Software Engineer, phone: (383)330-79-31, e-mail: d.a.belousov91@gmail.com

## Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of the Diffraction Optics, phone: (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

## Ruslan K. Nasyrov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Scientist, phone: (383)330-79-31, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

The results of the investigation of the application of sinusoidal grating test patternsfor production inspection of conformal elements at each technological stage of halftone photolithography are presented. It is shown the use of the test gratings with sinusoidal profile makes possible to measuretotal characteristic curve in the whole depth range.

Key words: conformal elements, halftone photolithography, manufacturing inspection, sinusoidal grating test patterns.

Конформальные оптические элементы, функция пропускания которых выбирается из внешних неоптических условий, применяются как статические корректоры волнового фронта, исправляющие аберрации активных элементов мощных твердотельных лазеров. Искажения волнового фронта при прохождении через кристалл активного элемента являются следствием неоднородности распределения показателя преломления. Выращивание кристаллических активных элементов по методу Чохральского крайне трудозатратный и дорогостоящий процесс при том, что полученные изделия, зачастую, не удовлетворяют требованиям по оптическому качеству. В ИАиЭ СО РАН осуществляется изготовление индивидуальных конформальных корректоров для кристаллических активных элементов из YAG:Nd<sup>3+</sup> [1, 2] с использованием полутоновой растровой технологии [3]. Изготовление конформальных элементов с помощью данной технологии представляет собой многоэтапный процесс, каждый из которых является критическим, т.е. ошибки, возникшие на одном из этапов, в дальнейшем невозможно компенсировать. Изначально рельеф формируется в пленке фоторезиста, путем его экспонирования. Заданное распределение экспозиции обеспечивается с помощью растрового фотошаблона, который представляет собой амплитудную ячеистую структуру, сформированную в пленке хрома. Пропускание на отдельном участке фотошаблона зависит от скважности структуры. Затем, с помощью технологии ионно-плазменного травления полученный рельеф переносится в материал кварцевой подложки. Для контроля конечного рельефа корректоров используется интерферометр Физо Intellium Z100 [4]. На этапе формирования в фоторезисте рельефа контроль таким методом невозможен в связи с тем, что прозрачная пленка фоторезиста имеет иной показатель преломления по сравнению с кварцевой подложкой, что приводит к деструктивной интерференции в слое резиста. Интерферометр белого света значительно меньше подвержен влиянию деструктивной интерференции, однако его применение ограничено контролем структур относительно малого размера. В частности используемый в нашей работе WLI - интерферометр фирмы BMTGmbH позволяет производить измерения в поле шириной 1.4 мм [5].

Для того чтобы иметь возможность использовать WLI -интерферометр для осуществления контроля рельефа сформированного в пленке фоторезиста авторами опубликованных ранее работ [1, 2], было предложено использовать тестовую линейную решетку (ТЛР) с кусочно-непрерывным рельефом, расположенную вокруг изготавливаемого корректора. Период ТЛР составляет 1000 мкм, а ее глубина равна максимальной глубине структуры конформального элемента. Анализ глубины и формы ТЛР [6] позволяет подобрать параметры экспонирования фоторезиста, а так же, в случае неудовлетворительной формы рельефа, вносить коррекцию в файл скважности (файл, задающий пропускание растрового фотошаблона в каждой его точке), для записи нового фотошаблона. Кроме того, сканирование области фотошаблона, предназначенной для формирования ТЛР в слое фоторезиста, пробным лазерным пуском и измерение интегральной дифракционной эффективности (ДЭ) по всем порядкам позволяет контролировать функцию пропускания изготовленного фотошаблона. Таким образом, ис-

пользование тестовых структур помогает осуществлять контроль на каждом этапе производственного процесса.

Однако, использование ТЛР имеет ряд недостатков. Во-первых, при формировании рельефа с помощью полутоновой растровой технологии, за счет того что в процессе экспонирования фотошаблон расположен на значительном расстоянии (для устранения переноса структуры растрированного фотошаблона) от пленки фоторезиста полученная форма ТЛР имеет широкий обратный скат. Это не позволяет осуществлять контроль формы в области экстремумов линейной функции, которой аппроксимируется полученный рельеф и, следовательно, отсутствует возможность вносить в этих областях коррекцию в файл скважности. Размер исключенной из исследования области может достигать порядка 10% от периода ТЛР. Во-вторых, функция пропускания фотошаблона, в области экстремумов ТЛР меняется скачкообразно. Пробный пучок, с помощью которого осуществляется сканирование фотошаблона при измерении интегральной ДЭ, имеет размер порядка 5 ячеек фотошаблона. Следовательно, в процессе сканирования, при исследовании области экстремумов тестовой структуры измеренная функция пропускания будет меняться плавно от максимума к минимуму (или наоборот), образуя подобие обратного ската, что так же не позволяет осуществлять полный контроль растрового фотошаблона в этих областях.



Рис. 1. Контроль растрового фотошаблона по анализу области тестовой синусоидальной решетки: измерение интегральной ДЭ (*a*) и определение полученной функции скважности фотошаблона (*б*)

Для того чтобы иметь возможность получать полные характеристические кривые на каждом производственном этапе, предлагается использовать синусоидальные тестовые решетки. Функция пропускания растрового фотошаблона в области формирования синусоидальной решетки меняется плавно и, следовательно, интегральная ДЭ может быть измерена во всех ее областях (рис. 1, *a*). На рис. 2, *б* показана функция скважности растрового фотошаблона, восстановленная из измерений ДЭ тестовой синусоидальной решетки, в сравнении с расчетной скважностью. Отклонения полученной скважности не превышает 1.45%.

Формирование рельефа синусоидальной решетки в пленке фоторезиста (резист ФП-3535 производства компании ФРАСТ-М) позволяет осуществлять контроль глубины и формы профиля во всех его областях. На рис. 2, *а* показана форма профиля, измеренная на WLI - интерферометре после аппроксимации и горизонтирования в сравнении с теоретической формой тестовой решетки. Максимальное отклонение полученной формы составило 7.82%. На рис. 2, *б* показан процесс коррекции файла скважности, по анализу отклонений формы полученного профиля.



Рис. 2. Контроль формы профиля тестовой синусоидальной решетки, сформированной в пленке фоторезиста: измерение отклонения полученной формы профиля от теоретической при использовании исходного растрового фотошаблона (*a*); коррекция файла скважности фотошаблона (*б*); измеренная профилограмма рельефа в фоторезисте (*в*) и нормированная форма профиля (*г*), полученные при использовании растрового фотошаблона, записанного после коррекции функции скважности (*б*)

Процесс коррекции можно описать следующим образом. В точке  $X_1$  для получения глубины  $H_1$  была использована скважность  $D_1$ . Однако необходимая для данной координаты глубина рельефа была получена в точке  $X_2$ , в которой использовалась скважность  $D_2$ . Следовательно, в скорректированном файле скважности в ячейке  $N_1$  необходимо использовать значение скважности равное  $D_2$ . И так для каждой точки профиля. На рис. 2в приведена профилограмма тестовой синусоидальной решетки, сформированной в пленке фоторезиста, путем его экспонирования с использованием скорректированного растрового фотошаблона. Отклонения полученной формы не превышает 1.53% (рис. 2г).

В результате исследования было показано, что использование тестовых решеток синусоидальной формы для производственного контроля конформальных элементов позволяет получать полные характеристические кривые на каждом из технологических этапов растровой полутоновой технологии, начиная от контроля функции пропускания растрового фотошаблона заканчивая контролем полученной глубины и формы рельефа сформированного как в фоторезисте, так и в материале кварцевой подложки. После коррекции файла скважности и записи нового фотошаблона был произведен анализ профилограмм ряда тестовых синусоидальных решеток полученных путем экспонирования фоторезиста с различными параметрами. Отклонение полученной формы не превышало 2.57%, при глубине решеток от 3.1 мкм до 3.5 мкм. Таким образом, предложенный метод позволил значительно снизить погрешность на этапе формирования 3D рельефа в слое фоторезиста

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7) в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корольков В. П., Насыров Р. К., Полещук А. Г., Арапов Ю. Д., Иванов А. Ф. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления // Квантовая электроника. – 2013. – Т 43, № 2. – С. 117-121.

2. Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Poleshchuk A. G., Arapov Y. D., Ivanov A. F. Freeform corrector for laser with large aperture YAG:Nd<sup>3+</sup>active element // Optical Engineering – V. 53, N 7. – P. 117-121.

3. Полещук А. Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий // Автометрия. – 1991. – № 6. – С. 54-61.

4. https://sigatec.fr/download/intelliumZ100%20Sigatec.pdf.

5. http://breitmeier.de/en/optical-profilometry/wli-lab.

6. Корольков В. П., Остапенко С.В. Характеризация профилограмм кусочнонепрерывного дифракционного микрорельефа // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 34–41.

© Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К РАЗЪЮСТИРОВКЕ СВЕРХРАЗРЕШАЮЩЕГО ЗЕРКАЛЬНО-ДИФРАКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА

#### Руслан Камильевич Насыров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru

#### Андрей Георгиевич Седухин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Работа посвящена разработке методов юстировки комбинированного сверхразрешающего зеркально-дифракционного объектива, основными компонентами которого являются дифракционный оптический элемент (ДОЭ) и кольцевое сферическое зеркало. Проведено моделирование возникающих аберраций при смещении ДОЭ и зеркала и предложены методики устранения основных типов аберраций объектива, типа сферической аберрации и комы.

Ключевые слова: дифракционная оптика, лазерная запись.

# INVESTIGATION OF THE STABILITY TO MISALIGNMENT OF A HIGH-RESOLUTION MIRROR-DIFFRACTION OBJECTIVE

## Ruslan K. Nasyrov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-79-31, e-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru

## Andrey G. Sedukhin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-79-31, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

The work is devoted to the development of methods for aligning a combined high-resolution mirror-diffractive objective, the main components of which are a diffractive optical element (DOE) and an annular spherical mirror. The modeling of emerging aberrations in the displacement of DOE and mirror was carried out, and methods were proposed for eliminating the main types of lens aberrations, such as spherical aberration and coma.

Key words: diffractive optics, laser writing.

# Введение

Настоящая работа посвящена изучению вопросов юстировки и устойчивости к разъюстировке комбинированного объектива [1], который был разработан для фокусировки излучения ультрафиолетового лазера в системе сканирующего нанолитографа. Сочетание таких факторов, как короткая длина волны лазера ( $\lambda = 266$  нм), высокая числовая апертура объектива (NA = 0,95) и относительно большой рабочий отрезок (1 мм), предъявляют жесткие требования к качеству изготовления компонентов объектива, к допускам механических креплений компонентов объектива и к точности их юстировки [2]. Учитывая нестандартную конструкцию объектива и его компонентов, прямое использование традиционных методов юстировки, ориентированных на стандартные линзы, невозможно. Данный объектив должен формировать в зоне фокусировки лазерное субволновое пятно (FWHM) размером порядка 0,4 $\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны лазера.

# Оптическая схема зеркально-дифракционного объектива

Основными компонентами рассматриваемого объектива являются дифракционный оптический элемент (ДОЭ) с радиальной симметрией, расположенный на одной оптической оси с кольцевым сферическим зеркалом (СЗ) (рис. 1). Вспомогательные компоненты объектива – это преобразователь (П) линейной поляризации в радиальную и заградительная диафрагма, являющаяся пространственно-частотным фильтром и пропускающая лазерную световую волну первого порядка дифракции ДОЭ. Сам ДОЭ служит для фокусировки волны лазера в кольцо, расположенное в передней фокальной плоскости СЗ.



Рис. 1. Оптическая схема комбинированного зеркально-дифракционного объектива

Как видно из рис. 1, особенностью данной конструкции является удаление нижних пространственных частот из спектра фокусируемой волны лазера. Это создает дополнительные трудности при юстировке и настройке ДОЭ и СЗ, а также при регистрации функции рассеяния точки (ФРТ) объектива. С другой стороны, следует также учитывать, что в соответствии с критериями Рэлея и Марешаля, примененными к рассматриваемому случаю, для получения ФРТ объектива, близкой к дифракционно-ограниченной, абсолютная деформация волнового фронта объекта не должна превышать соответственно  $\lambda/4 = 66,5$  нм и  $\lambda/14 = 19$  нм (первая и вторая величины  $\lambda/4$  понимаются по указанным критериям, как максимальное и среднеквадратическое значения).

Обеспечение таких малых (нанометровых) размеров деформации волнового фронта на рабочих линейных апертурах преобразователя поляризации, ДОЭ и СЗ с диаметрами примерно 14 мм требует, очевидно, использования особо точных методов юстировки данных узлов.

# Моделирование разъюстировки зеркально-дифракционного объектива

Оптическая схема была смоделирована в системе Zemax. Фазовая функция ДОЭ задавалась в виде многочлена четной степени. На рис. 2 приведены результаты моделирования смещения точки в фокальной плоскости объектива при поперечном смещении сферического зеркала на 1 мкм и его наклоне (относительно точки пересечения сферической поверхности с оптической осью) на одну угловую минуту.



Рис. 2. Моделирование точки при поперечном смещении сферического зеркала на 1 мкм (*a*) и наклоне на 1 угл. мин. (*б*)

Из представленных результатов видно, что необходимо обеспечить жесткие допуски на юстировку и точность фиксации узлов такого объектива. В частности, видно, что поперечное смещение C3 на ±1 мкм приводит к круговому разбросу положения точек в фокальной плоскости примерно на  $\pm 2$  мкм, т. е. практически к удвоенному смещению точек в фокальной плоскости. Одним из методов точной оптической юстировки является интерференционный метод [3]. Он основан на том, что когда ДОЭ и сферическое зеркало не находятся на одной оптической оси, положение центрального светового пятна, имеющего относительно большой размер и образованного первым сходящимся паразитным дифракционным порядком ДОЭ (когда диафрагму удаляют во время настройки), не будет совпадать с центральным пятном от СЗ, имеющим малый размер и образованным пучком первого расходящегося полезного порядка дифракции. Юстировка соосности наклона этих компонентов осуществляется путем совмещения центральных пятен пучков от этих компонентов. Такая методика позволяет устранить основные типы аберраций объектива, такие как сферическая аберрация и кома.

## Заключение

Проведено моделирование основных видов аберраций при смещении дифракционного оптического объектива и сферического зеркала в комбинированном высокоразрешающем объективе. Показано, что к жесткости конструкции и точности юстировки такого объектива предъявляются повышенные требования и что необходимо использовать высокоточный интерференционный режим юстировки для получения расчетного размера записывающего пятна.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01721).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полещук А. Г., Седухин А. Г. Высокоапертурный объектив для фокусировки оптического излучения // Патент РФ на полезную модель № 162920. – Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 08.07.2016 г. Опубликовано 27.06.2016. – Бюл., № 18.

2. Полещук А. Г., Седухин А. Г. Дифракционно-зеркальный высокоапертурный микрообъектив для фокусировки лазерного излучения в устройствах записи // Труды 13-й Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2016» «Голография. Наука и практика» 12-15 сентября 2016, Ярославль. – С. 351-354.

3. Седухин А. Г., Полещук А. Г. Особенности юстировки высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 91–95.

© Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, 2018

# ОРГАНИЗАЦИЯ ДВУХВОЛНОВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ВЫСОКОАПЕРТУРНОГО ЗЕРКАЛЬНО-ДИФРАКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА

#### Андрей Георгиевич Седухин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-79-31, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Предложена система организации двухволнового режима работы высокоапертурного (NA=0.95) зеркально-дифракционного объектива, на двукратно отличающихся длинах волн лазерных источников – 266 нм и 532 нм. Указанный объектив выполнен на основе дифракционного оптического элемента (ДОЭ) и кольцевого сферического зеркала, а для суммирования лазерных пучков применен их тонкопленочный гармонический объединитель. Основной акцент в данной работе сделан на вопросе оптимизации бинарно-фазовой структуры ДОЭ и исследовании возможности его работы одновременно в первом порядке дифракции на длине волны 266 нм и во втором порядке дифракции на длине волны 532 нм.

**Ключевые слова:** дифракция, высокоапертурные оптические объективы, бинарнофазовые дифракционные структуры, многопорядковые дифракционные решетки.

# IMPLEMENTING THE TWO-WAVELENGTH OPERATION OF A HIGH-NUMERICAL-APERTURE MIRROR-DIFFRACTIVE OBJECTIVE LENS

#### Andrey G. Sedukhin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)336-41-08, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

A system is proposed for implementing the operation of a high-numerical-aperture (NA = 0.95) mirror-diffractive objective lens attwo-times distinguished wavelengths of laser sources – 266 nm and 532 nm. The objective lens is based on a diffractive optical element (DOE) and an annular spherical mirror. Athin-film harmonic mirror is used to combine the laser beams. The main emphasis in this work is made on the issue of optimization of the binary-phase structure of the DOE and on the investigation of the possibility of its operation simultaneously in the first diffraction order at a wavelength of 266 nm and in the second diffraction order at a wavelength of 532 nm.

Key words: diffraction, high-numerical-aperture objective lenses, binary-phase diffractive structures, multi-order diffraction gratings.

В настоящей работе предложен метод организации двухволнового режима работы высокоапертурного зеркально-дифракционного объектива для двукратно отличающихся значений длин волн лазерных источников. В конкретно рассматриваемом варианте, данные значения составляют 266 нм и 532 нм. Оптическая схема указанного объектива совместно с тонкопленочным гармоническим объединителем пучков (ОП) приведена на рис. 1. Ранее объектив был рассмотрен в ссылках [1, 2]. Он имеет числовую апертуру NA = 0.95, кольцевую форму выходной апертуры и проектировался на его использование в системе лазерного сканирующего нанолитографа, при длине волны технологического лазера рав-

ной  $\lambda_1 = 266$  нм. Схема объектива весьма критична к точности юстировки его компонентов. Использование же невидимого глазом излучения глубокого ультрафиолетового диапазона длин волн, а также отсутствие (на рынке) доступных стандартных оптических средств контроля сфокусированного пучка с указанной высокой числовой апертурой делают практически невозможной точную юстировку данной системы на длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм. Под стандартными средствами контроля здесь понимается применение другого высококачественного объектива с еще большей числовой апертурой, способного работать на указанной длине волны.



# Рис. 1. Оптическая схема зеркально-дифракционного объектива совместно с объединителем пучков ОП:

ДОЭ – дифракционный оптический элемент, Д – кольцевая диафрагма, СЗ – кольцевое сферическое зеркало, O – центр кривизны зеркала, F – точка фокуса на оптической оси z

В связи с указанным обстоятельством, в одном из важных потенциальных вариантов сканирующего лазерного нанолитографа предусматривается применение дополнительного лазерного источника с длиной волны  $\lambda_2$  двукратно превышающей рабочую длину, то есть с $\lambda_2 = 532$  нм. Как показано на рис. 1, коллимированные лазерные пучки указанных длин волн объединяются с помощью объединителя пучков ОП, с точной юстировкой общего хода пучков на выходе ОП. Для того, чтобы система фокусировки имела также общий фокус, могут быть рассмотрены несколько вариантов выполнения структуры ДОЭ. Реализация общего фокуса предопределяет практически важную возможность автоматической юстировки системы на невидимой длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм, в случае, когда система полностью отъюстирована на видимой длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм (например, по методике, рассмотренной в [2]).

В рассматриваемом здесь варианте исследован практический случай, когда ДОЭ имеет радиально-симметричную бинарно-фазовую структуру с минималь-

ным размером зон, превышающим (в частности, по технологическим причинам) 500 нм, при максимальном угле дифракции лучей в центре ДОЭ равном  $\gamma = 6^{\circ}$ . Соответственно, из формулы дифракции на регулярной решетке на длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм следует, что минимальный период фазовой структуры в центре ДОЭ составляет

$$d = m_2 \lambda_2 / \sin(\gamma) = 2.2 \text{ MKM}, \tag{1}$$

где  $m_2 = 1$ – индекс первого полезного порядка ДОЭ для  $\lambda_2 = 532$  нм. Из уравнения (1) можно также заключить, что фактор  $m_2\lambda_2$ , а следовательно и параметры d и  $\gamma$ , можно сохранить строго постоянными при переходе на двукратно меньшую длину волны  $\lambda_1 = 266$  нм и при организации работы ДОЭ в соответствующем этой длине волны втором порядке дифракции  $m_1 = 2$ , то есть в случае, когда  $m_2\lambda_2 = m_1\lambda_1 = \text{const}$ . Известно, что ряд фазовых структур ДОЭ, в частности, так называемые гармонические киноформные структуры [3], позволяют обеспечить работу сразу в нескольких дифракционных порядках, с относительно высокими дифракционными интенсивностями в данных порядках. Однако, малая величина минимального периода фазовой структуры ДОЭ, определяемая формулой (1), а также технологические ограничения по разрешающей способности установки для прямой лазерной записи структуры ДОЭ [4] не позволяют реализовать необходимый киноформный профиль.

Вместе с тем, выполнение указанного условия  $m_2\lambda_2 = m_1\lambda_1 = \text{const}$  и удовлетворение технологических ограничений по разрешающей способности установки для прямой лазерной записи, возможно при бинарно-фазовой радиальной структуре ДОЭ, с дополнительной модуляцией периода и скважности зон данной структуры. Задача расчёта такого ДОЭ очень близка к оптимизационной задаче расчета решеток Даммана, с той разницей, что оптимизации здесь подлежит такая структура, которая будет иметь лишь один первый порядок дифракции при работе ДОЭ на длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм и лишь один второй порядок дифракции при работе ДОЭ на длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм. При этом в качестве псевдопериода решетки Даммана следует выбрать удвоенный исходный период структуры ДОЭ. Данная задача осложняется тем, что при двукратной разнице в длинах волн, трудно обеспечить оптимальную для обеих длин волн фазовую задержку ДОЭ для реализации высокой эффективности одновременно на обеих длинах волн. Тем не менее, как показали проведенные нами расчеты, реализация указанных ДОЭ все же возможна с умеренной эффективностью в полезных порядках дифракции на обеих длинах волн порядка 11%. Однако, минимальный размер зон такого ДОЭ составил бы, по нашей оценке слишком малую величину – 0.11 мкм.

В связи со сказанным, для возможности синтеза бинарно-фазового ДОЭ, имеющего минимальный размер зон больше 500 нм и способного работать на двух длинах волн  $\lambda_1 = 266$  нм и  $\lambda_2 = 532$  нм, в данной работе ниже представлен потенциально пригодный для проектируемого лазерного нанолитографа расчетный вариант структуры ДОЭ с относительно высокой (для бинарной структуры) световой эффективностью на длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм и невысокой (но достаточной для практического применения – например, для проведения юстировки системы) эффективностью на длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм. Оптимизация структуры ДОЭ была проведена в соответствии с выше указанным видоизменением целевой функции, характерной для расчета решеток Даммана, а также эмпирическим выставлением весового баланса между световыми эффективностями ДОЭ при работе на разных длинах волн и для различных порядков дифракции, с целью реализации структуры ДОЭ с минимальным размером зон больше 500 нм. При оптимизационном расчете глубины фазового профиля ДОЭ учтено, что показатели преломления кварцевого стекла для изготовления ДОЭ составляют на длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм  $n_1 = 1.4997$  и на длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм  $n_1 = 1.4607$ .

Определенные в результате расчета относительные точки перехода на одном псевдопериоде структуры ДОЭ можно представить в виде следующей последовательности: 0.2984, 0.5547, 0.7016, 1.0000, с начальным абсолютным значением псевдопериода в центре ДОЭ равном 4.4 мкм. Исходя из указанной последовательности точек перехода, минимальный размер зон ДОЭ составил  $(0.7016-0.5547) \times 4.4 = 0.65$  мкм. Расчетная глубина бинарно-фазовой структуры составила 0.625 мкм. На рис. 2 показаны два варианта относительной интенсивности в дифракционных порядках рассчитанного ДОЭ, нормированной на величину интенсивности падающего пучка – при работе ДОЭ на длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм (а) и при его работе на длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм (б). Как можно видеть, при работе на основной длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм, дифракционная эффективность в полезном втором порядке дифракции составляет 30.2 % и приближается к эффективности регулярного ДОЭ со стандартной скважностью зон (равной 2), то есть к 40.5%. При работе же на вспомогательной длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм, дифракционная эффективность в полезном первом порядке дифракции составляет 2.8%, что можно считать достаточным для проведения операций по юстировке системы и проверке ее характеристик на данной длине волны.

Таким образом, в данной работе продемонстрировано, что при отклонении от стандартной процедуры расчета зон бинарно-фазовой структуры ДОЭ, можно обеспечить достаточно удовлетворительную (по эффективности) работу ДОЭ, а следовательно и всего объектива, на двукратно отличающихся длинах волн, с сохранением общей точки фокуса объектива.



Рис. 2. Относительные интенсивности в дифракционных порядках рассчитанного ДОЭ при работе на длине волны  $\lambda_1 = 266$  нм (a) и на длине волны  $\lambda_2 = 532$  нм (б)

Данная работа поддержана Российским научным фондом (грант 17-19-01721).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Седухин А. Г. Полещук А. Г. Зеркально-дифракционный объектив для фокусировки лазерного радиально поляризованного пучка в пятно предельно малого размера // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 42–46.

2. Седухин А.Г., Полещук А.Г. Особенности юстировки высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 91–95.

3. Sweeney D.W. and Sommargren G.E. Harmonic diffractive lenses // Appl. Opt. – 1995. – V. 34 (14). – P. 2470–2475.

4. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. – 1999. – V.38 (8). – P. 1295–1301.

© А. Г. Седухин, 2018

# ОПТИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОМЕТР НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ЛИННИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК, ГЛУБИНЫ И ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

# Руслан Владимирович Шиманский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

# Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.su

# Антон Евгеньевич Качкин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер, тел. (383)330-7931, e-mail: anton.kachkin@yandex.ru

В работе рассматривается оптический профилометр, разработанный на основе интерферометра Линника для задачи контроля толщины пленок и глубины шероховатого и оптически гладкого рельефа в диапазоне до ±50 мкм. Обсуждаются вопросы калибровки прибора и ограничения предложенного метода измерения рельефа на основе серии обработки серии интерферограмм в белом свете, снятой при механическом вертикальном сканировании интерферометра относительно образца.

Ключевые слова: профилометрия, интерферометр Линника, интерферометр белого света, вертикальное сканирование, шероховатый микрорельеф.

# OPTICAL PROFILOMETER BASED ON THE LINNIK INTERFEROMETER FOR MEASURING THE FILMS, DEPTHS AND THE FORM OF THE RELIEF

## Ruslan V. Shimansky

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

# Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.su

## Anton E. Kachkin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)333-30-91, e-mail: anton.kachkin@yandex.ru

An optical profilometer developed on the basis of Linnik interferometer is considered for the task of controlling the thickness of films and the depth of rough and optically smooth relief in the range up to  $\pm$  50 µm. The problems of calibration and limitation of the method of measuring the relief based on a white light interferometer with vertical scanning are discussed.

**Key words:** profilometry, Linnik interferometer, white light interferometer, vertical scanning, rough microrelief.
### Введение

Измерение толщины плёнок, глубины и формы рельефа в настоящее время является весьма актуальной и востребованной задачей, как для лабораторий научно-исследовательских институтов и университетов, так и для цехового контроля на промышленных предприятиях. В машиностроении задача измерения формы рельефа решается относительно просто и недорого с использованием контактных профилометров [1]. Но эти приборы не подходят для измерения покрытий из мягких полимерных материалов (например, фоторезистов), оптических поверхностей и рельефа с достаточно глубоким рельефом. Использование разных типов материалов, в том числе с высокой шероховатостью, необходимость измерения в достаточно большом диапазоне глубин от сотни нанометров до десятков микрометров с погрешностью в диапазоне 1-5% (для контактных профилометров типичная погрешность – 10%) ставит задачу разработки бесконтактного оптическогопрофилометра. Схема Линника является достаточно популярной для такого типа профилометров. На её основе разработаны приборы МИА-Д (ВНИИОФИ) [2] и МНП (КТИ НП СО РАН) [3]. Ограничением профилометра МИА-Д является использование в качестве осветителя лазерного источника, что исключает измерение профилей с резким перепадом глубины. Профилометр МНП удовлетворяет всем современным требованиям, но имеет достаточно большую стоимость, что ограничивает круг потребителей в современных экономических условиях.

Разработанный совместными усилиями ИАиЭ СО РАН и ЗАО «Дифракция» профилометр MII-4-DIGI-100 на базе микроинтерферометра Линника МИИ-4М [4,5] позволяет решить широкий спектр задач: от измерения толщины тонкопленочных покрытий до глубины рельефа печатных плат. В настоящей работе рассмотрен модернизированный вариант этого прибора, позволяющий измерять глубокий рельеф с высокой шероховатостью.

# Конструкция профилометра

Профилометр выполнен на основе стандартного оптического блока микроинтерферометра МИИ-4М (ЛОМО, Санкт-Петербург) [3] с волоконным подводом светового пучка. Световолоконный кабель подключается к светодиодному осветителю с управлением и питанием от контроллера, который в свою очередь управляется через USB-порт персональным компьютером.

Контроллер обеспечивает переключение между белым и квазимонохроматическим светодиодами осветителя, а также управление яркостью свечения светодиодов. Дополнительно в оптический блок интерферометра интегрирован линейный датчик перемещения интерферометрического блока относительно образца с разрешением 5 нм. Текущее значение датчика считывается управляющим компьютером и используется программным обеспечением профилометра при расчёте глубины измеряемого профиля. Установленная вместо окуляра микроинтерферометра цифровая камера позволяет производить управ-



Рис. 1. Оптический профилометр на базе микроинтерферометров МИИ-4М

ляющему компьютеру захват кадров изображения интерферограмм и производить их последующую обработку. Размер светового контролируемого поля составляет не менее – 200х260 мкм. На рис. 1 приведена фотография разработанного оптического профилометра. Программное обеспечение профилометра предоставляет несколько режимов измерения образца, а также предоставляет возможности выполнения оценки формы рельефа, визуализации и сохранения на носитель информации результатов измерения. На данные момент программное обеспечение предоставляет три основных режима измерения: трекинга с одной интерферограммой, трекинга с двумя интерферограммами и режим вертикального сканирования. Каждый из режимов используется для измерения определённого типа рельефа.

# Режим трекинга с одной интереферограммой

Для измерения формы рельефа с глубиной до нескольких микрон для поверхностей с оптическим качеством используется режим трекинга полосы по одной интерферограмме. Перед измерением осуществляется калибровка периода полос интерферограммы, снятой при квазимонохроматическом освещении. Калибровка производится автоматически с использованием алгоритма определения количества и периода интерференционных полос в срезе интерферограммы. Также в интерактивном режиме производится калибровка линейного размера изображения полученного с камеры по тестовой решетке с известным периодом.

Затем производится захват интерферограммы в белом свете по которой производится трекинг ахроматической полосы. Трекинг интерференционной полосы производится алгоритмом последовательного локального вычисления положения средневзвешенного центра максимума или минимума ахроматической полосы с максимальной интенсивностью. На рис. 2 приведена иллюстрация работы данного алгоритма. На рис. 3 приведён пример результата работы алгоритма трекинга. Результаты трекинга используются для расчета данных двухмерной профилограммы используемой для оценки формы профиля и его характеристик. В данном режиме обеспечивается диапазон измерений до ±2 мкм с разрешением 1...5 нм в зависимости от количества интерференционных полос в кадре.



Рис. 2. Схема алгоритма поиска точки «хребта» интерференционной полосы. Пример исходных данных (слева) и обработанных данных (справа). AL-текущий анализируемый отрезок с длиной L, «бегущее» WH окно фильтра, САР-средневзвешенный максимум текущего отрезка



Рис. 3. Результат работы алгоритма трекинга интерференционной полосы

# Режим трекинга с двумя интерферограммами

Для измерения глубины оптически гладкого рельефа в диапазоне до ±50 мкм используется режим с двумя интерферограммами. Данный режим базируется на алгоритме трекинга, рассмотренном выше. Но для определения положения интерферометрического блока относительно образца при снятии каждой интерферограммы используется информация с линейного датчика перемещения.



Рис. 4. Измерение в режиме двух интерферограмм: *а*) трекинг первой интерферограммы; *б*) комбинированный профиль первой и второй интреферограммы и рассчитанный результат глубина профиля

Перед началом измерения производится калибровка периода полос идентично трековому режиму. Затем производится фокусировка и захват интерферограммы в белом свете на нижней плоскости измеряемого образца. Далее производится такая же операция для верхней плоскости. Программное обеспечение автоматически сохраняет положение интерферометрического блока для каждой из интерферограмм. В результате получаются две интерферограммы в белом свете соответственно для нижней и верхней поверхности образца, которые могут быть отдельно обработаны методом трекинга с учётом сохранённых значений датчика вертикального положения. На рис. 4 показаны основные этапы измерения в режиме с использованием двух интерферограмм. Результатом трекинга является комбинированный двухмерный профиль рис. 4, б. Для вычисления глубины рельефа производится расчёт линейной регрессии для обеих частей данных трекинга, на основе которой выполняется экстраполяция линейных отрезков до моделируемой границы ступеньки, определяемой как средняя точка на горизонтали между ближайшими точками профиля трекинга интерферограмм. Результат экстраполяции отображается в виде пунктирной линии (рис. 4, б). Глубина рельефа рассчитывается как расстояние между пересечением линий экстраполяции с моделируемой границей ступеньки профиля. В данном режиме диапазон измерений составляет ±50 мкм. Погрешность измерения оценивается по формуле  $\Delta D = \pm (20 + (N_f/N_p + dN) \cdot 300 + Ra)$  нм, где N<sub>f</sub> – количество полос в кадре (не менее 3), N<sub>p</sub> – количество пикселов в кадре по вертикальной координате, dN – прогиб полос в интерферограмме плоской поверхности, нормированный на период интерференционных полос, *Ra* – параметр шероховатости рельефа.

## Режим вертикального сканирования

Режим с двумя интерферограммами невозможно использовать для измерения формы рельефа поверхности с высокой шероховатостью, совершенно разрушающей интерференционные полосы. На рис. 5 показана типичная шероховатая поверхность металлического покрытия, сформированного гальваникой при изготовлении печатной платы на керамической подложке. Для измерения глубины и формы рельефа таких поверхностей был разработан режим вертикального сканирования. В режиме вертикального сканирования для определения глубины микрорельефа обрабатывается серия интеферограмм, снятых с заданным шагом по вертикальной координате при медленном перемещении интерференционного блока поворотом ручки фокусировки. Алгоритм расчёта базируется на определении максимума локального изменения яркости поверхности по серии интерферограмм, снятых с периодом 150 нм (четверть эквивалентной длины волны). На рис. 6 изображены начальный этап съемки серии интерферограмм и результат работы алгоритма определения профиля и глубины микрорельефа.



Рис. 5. Фотография шероховатой поверхности покрытия печатных плат



Рис. 6. Начальный этап съемки серии интерферограмм (слева) и результат работы алгоритма вертикального сканирования (справа)

Эксперименты показали, что погрешность измерения можно оценить по формуле  $\Delta D = \pm (50 \text{ нм} + 0.01 \cdot T + 0.3 \cdot Ra)$  нм, где Ra – параметр шероховатости рельефа, T – измеренное значение глубины микрорельефа. Прибор был успешно испытан на образцах с параметром Ra шероховатости до 1 мкм.

## Заключение

Разработанный оптический профилометр позволяет производить измерение толщины плёнок, глубины и формы рельефа покрытий разных типов материалов, в том числе с высокой шероховатостью. Основными преимуществами профилометра являются: возможность бесконтактного измерения образца, диапазон измерения глубины до  $\pm 50$  мкм, нанометровая точность измерения для глубин рельефа порядка нескольких микрон и субмикронная точность измерения для глубин профиля в несколько десятков микрон.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ Гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7) в ИАиЭ СО РАН.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Профилограф-профилометр АБРИС ПМ7.2 [Электрон. данные] // Официальный сайт НПП «Техноком». - http://tehnokom.opt.ru/page\_katalog\_6333.html.

2. Микроскоп интерференционный автоматизированный (динамический) МИА-Д [Электрон. данные] // Официальный сайт ВНИИОФИ. – Режим доступа: http://www.vniiofi.ru/depart/m44/mia-d.html

3. Интерференционный микроскоп-нанопрофилометр МНП [Электрон. данные] // Официальный сайт КТИ НП СО РАН. - http://www.tdisie.nsc.ru/Rus/nano\_rus.html

4. В.П. Корольков, А.Е. Качкин, Р.В. Шиманский. Модернизация микроинтерферометров МИИ-4 и МИИ-4М // Мир измерений. – 2012. – N10. – С. 37-40.

5. Микроинтерферометр МИИ-4М [Электрон. данные] // Официальный сайт ОАО "ЛОМО". – Режим доступа: http://lomo-microsystems.ru / Mii-4M.html, свободный.

© Р. В. Шиманский, В. П. Корольков, А. Е. Качкин, 2018

## КОНТРОЛЬ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР, РАССЧИТАННЫХ НА ПРОПУСКАНИЕ

### Дмитрий Александрович Белоусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)330-79-31, e-mail: d.a.belousov91@gmail.com

### Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Представлены результаты исследования метода, позволяющего осуществлять контроль дифракционной эффективности в отражённом свете для ДОЭ, выполненных в оптически прозрачных материалах и рассчитанных для работы в ДУФ-диапазоне на пропускание. Ключевой особенностью метода является применение иммерсионной жидкости для устранения отражения от обратной поверхности ДОЭ и пробного лазерного пучка с длиной волны, обеспечивающей разность фаз  $2\pi$  на отражение от структуры измеряемого ДОЭ. Показана возможность применения предложенного метода для производственного контроля качества изготовления многоуровневых ДОЭ по анализу дифракционной эффективности тестовых линейных решёток.

**Ключевые слова:** дифракционные оптические элементы, контроль дифракционной эффективности, ДУФ-диапазон.

# DIFFRACTIVE EFFICIENCY CONTROL IN REFLECTED RADIATION FOR DIFFRACTION STRUCTURES DESIGNED FOR TRANSMISSION MODE

### Dmitrij A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Software Engineer, phone: (383)330-79-31, e-mail: d.a.belousov91@gmail.com

### Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of the Diffraction Optics, phone: (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

The results of the investigation of method for control of the diffraction efficiency in reflected light for DOE designed for transmission mode in the DUVrange are presented. A key feature of the method is the use of an immersion liquid to eliminate reflection from the back surface of DOE and a probe laser beam with a wavelength that provides a  $2\pi$  phase difference from the structure of the measured DOE in reflection mode. The possibility of using the proposed method for manufacturing quality control of multilevel DOE's by means of the analysis of the diffraction efficiency of test linear gratings is presented.

Key words: diffractive optical elements, diffraction efficiency measurement, DUV range.

Одним из методов осуществления производственного контроля качества изготавливаемых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является метод дифрактометрии, основанный на анализе интенсивностей дифрагированного от исследуемого элемента излучении. При производстве многоуровневых ДОЭ, предназначенных для работы в ДУФ-диапазоне, контроль дифракционной эффективности (ДЭ) осложняется тем, что измерения необходимо производить в соответствии с расчетно оптической схемой, которая, как правило, не предоставляется заказчиком и на расчетной длине волны ДУФ-лазера, доступ к которой у изготовителя ДОЭ может быть затруднен. В связи с этим, для осуществления производственного контроля, был предложен метод, основанный на анализе ДЭ не самого элемента, а тестовых линейных решеток (ТЛР) [1]. Согласно данному методу, рядом с каждым элементом формируются ТЛР, имеющие ту же глубину, что и многоуровневый ДОЭ, а измерение ДЭ осуществляется в отраженном свете. Длина волны пробного лазерного пучка λ, обеспечивающая разность фаз  $2\pi$  на отражение от структуры исследуемого элемента, может быть определена из соотношения:

$$\lambda = \frac{2*h_{\rm p}}{\cos(\alpha)},\tag{1}$$

где  $h_p$  – расчетная глубина рельефа,  $\alpha$  – угол падения лазерного излучения на ТЛР. Так как источники излучения могут иметь определенный стандартный набор длин волн, угол падения  $\alpha$  является подстроечным параметром. Для устранения интерференции отраженного дифрагированного излучения с излучением, отраженным от обратной стороны подложки, авторами работы [1] было предложено два метода – наносить на обратную сторону ДОЭ слой глицерина и копировальной бумаги с матовой поверхностью и напылять непрозрачную металлическую пленку на рельеф ДОЭ на время измерения, а после стравливать ее. Последний метод давал существенно более стабильные результаты. Упрощенная схема установки реализующей предложенный метод представлена на рис. 1.





Однако, данный метод не позволяет контролировать ДОЭ, предназначенные для работы с мощным ДУФ лазерным излучением. Это вызвано тем, что после стравливания металлической пленки, частицы металла остаются в микродефектахповерхности ДОЭ, и под воздействием мощного ДУФ лазерного излучения, со временем, происходит разрушение кварцевой подложки, ухудшающее дифракционную эффективность элемента.

Для решения этой проблемы было предложено отказаться от напыления хрома на ДОЭ и модифицировать классический для оптики метод с иммерсией и матовой бумагой, заменив бумагу, на опорную кварцевую подложку, обратная сторона которой выполнена таким образом, чтобы не допустить попадание отраженного от нее излучения в измерительный канал. Иммерсионная жидкость, коэффициент преломления которой  $n_2 \approx n_1$  (где  $n_1$  – коэффициент преломления кварца), позволяет «убрать» воздушную границу и тем самым обеспечить практически беспрепятственное попадание прошедшего излучения на обратную сторону опорной подложки. Использование опорной подложки обладает рядом преимуществ по сравнению с матовой бумагой. Во-первых, обеспечивается лучшее прилегание к поверхности исследуемого ДОЭ, а во-вторых, данный метод позволяет повысить повторяемость получаемых результатов измерения ДЭ. В рамках данной работы было проведено исследование применения двух типов опорной подложки: клиновой (рис. 2, а) и плоской с рассеивающим (в нашем случае матовым) покрытием (рис. 2, б). Для исключения царапания обратной стороны ДОЭ о поверхность опорной кварцевой подложки на нее наклеивались узкие полоски тонкой пластиковой ленты по краям зоны измерения.



Рис. 2. Упрощенная схема установки для измерения ДЭ в отраженном свете от периодических структур, выполненных в оптически прозрачных материалах: с использованием клиновой опорной подложки (*a*) и с использованием плоской опорной подложки с рассеивающим покрытием (б)

Многоуровневые ДОЭ, для которых разрабатывался данный метод, изготавливаются методом проекционной фотолитографии с растрированным фотошаблоном [2], и в процессе производства располагаются на кварцевой подложке диаметром 100 мм по 20 штук. Каждый элемент включает в себя по две ТЛР с периодом 100 мкм. Расчетная глубина рельефа  $h_{\rm p}$ составляет 344 нм.

Для апробации предложенного метода из изготовленной подложки с элементами была вырезана тестовая пластина содержащая 5 многоуровневых ДОЭ (условно обозначенные как A, B, C, D и E), и соответственно 10 ТЛР (A1, A2, В1, В2 ..., Е1, Е2). Для начала тестовая пластина была покрыта слоем хрома, после чего измерялась ДЭ первого дифракционного порядка ТЛР методом, описанным в работе [1] (рис. 1). Измерения ДЭ осуществлялись с использованием лазерного модуля с длиной волны 691 нм. Полученные данные мы считали эталонными. Затем с ТЛР D и E был стравлен слой хрома, после чего, тестовая пластина устанавливалась, через слой иммерсионной жидкости, на опорную подложку и снова измерялась ДЭ ТЛР. В качестве иммерсионной жидкости был использован раствор глицерина, коэффициент преломления которого был измерен на рефрактометре ИРФ-22 и составил 1.460, в то время как коэффициент преломления кварца, измеренный на том же приборе, был равен 1.4595. Данные ДЭ ТЛР А, В и С, с которых хром не стравливался, использовались для того, чтобы определить повторяемость получаемых результатов. В таблице приведены данные ДЭ первого дифракционного порядка, усредненные по 15 измерениям, до частичного стравливания хрома и после с применением клиновой опорной подложки и плоской опорной подложки с рассеивающим покрытием.

	Из до ст	вмерение очастич гравлива хрома	е ДЭ ного ания	Измерение ДЭ после частичного стравливания хрома с использованием клиновой опорной подложки			с р	Измеро настично хрома с поской о рассеива	ение ДЭ эго стран использо порной ющим п	после вливан ование подлож окрыт	ия 2м кки ием		
Структура	Покрытиехромом	ТЛР 1 ДЭ, %	ТЛР 2 ДЭ, %	Покрытие хромом	ТЛР 1 ДЭ, %	ТЛР 2 ДЭ, %	ТЛР 1 - Расхождение результатов, %	ТЛР 2 - Расхождение результатов, %	Покрытие хромом	ТЛР 1 ДЭ, %	ТЛР 2 ДЭ, %	TJIP 1 - Расхождение результатов, %	ТЛР 2 - Расхождение результатов, %
Α	+	93.06	93.60	+	93.05	94.78	0.01	1.18	+	93.64	94.13	0.58	0.54
В	+	93.27	93.90	+	94.49	93.88	1.22	0.02	+	94.06	93.92	0.79	0.02
С	+	94.24	93.36	+	94.37	92.84	0.13	0.51	+	94.16	92.42	0.08	0.93
D	+	93.84	90.64	-	93.88	91.87	0.04	1.23	-	94.01	90.36	0.16	0.27
Е	+	92.91	86.77	-	92.87	85.68	0.04	1.09	-	92.27	86.10	0.64	0.67

|--|

Результаты измерения ДЭ, полученные при использовании предложенных опорных подложек, имеют хорошую согласованность, как между собой, так и с данными полученными от ТЛР покрытых хромом. В случае измерения ДЭ с использованием статично установленных фотоприемников, как показано на рис. 2, наиболее эффективным является использование клиновой опорной подложки, так как при этом полностью исключается попадание отраженного (или рассеянного) от обратной поверхности излучения в измерительный канал. Однако в случае измерения параметров ДОЭ по анализу дифракционной картины на устройствах, описанных в работах [3], [4] и [5], которые позволяют регистрировать все дифракционные порядки в диапазоне углов дифракции ± 85° и 360° по азимутальному углу, при использовании клиновой опорной подложки, отраженное от обратной стороны излучение попадет в область обнаружения видеокамеры. Для таких систем наиболее эффективным является использование опорной подложки с рассеивающим покрытием, которая позволяет избежать регистрации дифракционногоизлучения, прошедшего сквозь периодическую структуру и отраженного от обратной стороны подложки.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос. регистрации АААА-А17-117052210002-7) в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полещук А. Г., Корольков В. П., Насыров Р. К., Хомутов В. Н., Конченко А. С. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 818–829.

2. Полещук А. Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий // Автометрия. – 1991. – № 6. – С. 54–61.

3. Хомутов В. Н., Полещук А. Г., Черкашин В. В. Измерение дифракционной эффективности ДОЭ по многим порядкам дифракции // «Компьютерная оптика». – 2011. – Т. 35. – С. 196–201.

4. Белоусов Д.А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой // «Компьютерная оптика». – 2015. – Т.39, №5. – С.678-687.

5. Белоусов Д.А., Полещук А.Г., Хомутов В.Н. Контроль параметров микрорельефа синтезированных голограмм методом анализа дифракционной картины // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 32–36.

© Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, 2018

# РАЗРАБОТКА ДИФРАКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С УМЕНЬШЕННЫМИ НЕРАВНОМЕРНОСТЯМИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

### Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

### Павел Сергеевич Орлов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, обучающийся

В работе рассматривается изготовление пленочных дифракционных элементов, в форме квадратных отверстий с «размытыми» краями. Показано, что лазерное излучение, дифрагировавшее на этих элементах, формирует дифракционную картину Френеля с существенно меньшими неравномерностями интенсивности.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент.

# DESIGN OF A DIFFRACTION ELEMENT WITH REDUCED NON-MEASUREMENTS OF SPATIAL DISTRIBUTION OF INTENSITY

### Yuriy Ts. Batomunkuev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

### Pavel S. Orlov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Student

The production of film diffraction elements in the form of square holes with "blurred" edges is considered in the paper. It is shown that the laser radiation diffracted on these elements forms a diffraction Fresnel picture with significantly smaller intensity irregularities.

Key words: diffractive optical element.

Известно, что в задачах формирования равномерного распределения интенсивности лазерного излучения в заданной области пространства имеют место сложности, вызванные дифракцией этого излучения. В частности, возникают проблемы неравномерности интенсивности и наличия света за пределами заданной области освещения [1,2]. На рис. 1 представлена известная дифракционная картина Френеля, возникающая при прохождении монохроматической световой волны через квадратное отверстие. В ряде работ, например [3-5], были рассмотрены задачи получения равномерного распределения интенсивности лазерного излучения на плоской прямоугольной поверхности заданного размера и разработаны дифракционные элементы, формирующие это распределение. Но предложенные дифракционные элементы имеют сложную структуру, для реализации которой требуется специализированное прецизионное оборудование. Целью работы является разработка простого дифракционного элемента, формирующего в заданной плоскости распределение интенсивности лазерного излучения с уменьшенной неравномерностью.



Рис. 1. Квадратное отверстие (*a*) и дифракционная картина (б) Френеля в монохроматической волне, прошедшей через это отверстие

Известно, что распределение интенсивности в дифракционной картине Френеля лазерного излучения, прошедшего через произвольное отверстие, можно описать выражением [1, 6]

$$I = \left| A_0 \iint_{S} \frac{e^{ik(r+s)}}{rs} K(\alpha) dS \right|^2, \tag{1}$$

где *I*– интенсивность падающей волны,  $A_0$  – амплитуда волны, r – расстояние от источника до отверстия, s – расстояние от отверстия до рассматриваемой точки на экране,  $K(\alpha)$  – коэффициент, описывающий зависимость амплитуды вторичных волн от угла между направлениями распространения падающей и вторичных волн, k – волновое число, S – площадь отверстия.

Выражение (1) для квадратного отверстия со стороной много большей длины волны излучения лазера, может быть представлено в виде (вдоль оси Ox<sub>1</sub> на экране) [6,7]

$$I = \left| A \int_{S} \frac{\sin[k(x_{1} - x + r)]}{k(x_{1} - x + r)} dx \right|^{2},$$
(2)

где *А* – амплитуда волны, *k* – волновое число, *x* – координата рассматриваемой точки на отверстии, *x*<sub>1</sub> – координата рассматриваемой точки на экране, *r* – малая поправка в виде случайно изменяющейся величины.

По формуле (2) были выполнены расчеты распределения амплитуды в дифракционной картине Френеля монохроматической волны, дифрагировавшей на квадратном отверстии. Для уменьшения неравномерности интенсивности в этой дифракционной картине в работе изучаются два способа. Первый способ заключается в плавном «размывании» резкой границы отверстия, формирования непрерывного увеличения пропускания у края отверстия. Этого можно достичь с помощью добавления в интеграл (2) множителя, учитывающего дополнительное поглощение лазерного излучения и зависящего от координаты точек отверстия вблизи края. Второй способ заключается в изменении линии края отверстия случайным образом. Аналитически это можно осуществить с помощью добавления в интеграл (2) случайно меняющейся величины в фазу и в амплитуду вторичных волн, испускаемых точками отверстия вблизи краев. Результаты расчетов интенсивности монохроматической световой волны со случайно меняющейся фазой представлены на рис. 2 (сплошная кривая). При выполнении расчетов были приняты следующие значения величин: расстояние от отверстия до плоскости наблюдения (до экрана) – 15 м, длина волны излучения – 532 нм, сторона отверстия – 0,03 м.





Пунктирная кривая – без добавления случайной величины, сплошная кривая – с добавлением случайной величины

Для экспериментальной проверки предложенных идей были изготовлены дифракционные элементы, выполненные в программе AutoCAD и распечатанные на прозрачной пленке. При этом минимальные размеры дифракционной структуры этих элементов ограничивались разрешением принтера. Одним из таких элементов было квадратное отверстие с постепенно увеличивающейся прозрачностью от краев отверстия. Пример такого элемента и формируемая прошедшей волной дифракционная картина Френеля представлены соответственно на рис. 3, *a*, *б*.



Рис. 3. Квадратное отверстие:

*a*) с переменной прозрачностью, *в*) со случайно нанесенными пятнами,  $\partial$ ) с комбинацией переменной прозрачности и случайно нанесенных пятен,  $\delta$ ), *г*),  $\partial$ ) соответствующие дифракционные картины Френеля в монохроматической световой волне, дифрагировавшей на отверстии

Рассматривались и дифракционные элементы со случайно расположенными маленькими пятнами разного размера вблизи края отверстия. Пример такого элемента и соответствующая ему дифракционная картина Френеля показаны на рис. 3, *в*, *г*. Также рассматривалось влияние комбинации переменной прозрачности и случайных пятен вблизи края отверстия (рис. 3, *д*, *е*). На рис. 4 предоставлен оптимизированный дифракционный элемент и распределение интенсивности лазерного излучения в дифракционной картине Френеля в световой волне, прошедшей через этот элемент. Толщина зоны «размытости» у края отверстия, согласно экспериментальным данным, должна составлять 2-3 мм.



*a*)



Рис. 4: *а*) Квадратное отверстие с переменной прозрачностью и случайно расположенными пятнами; *б*) дифракционная картина Френеля в монохроматической волне, дифрагировавшей на этом отверстии

Полученный на всех этих примерах эффект уменьшения неравномерности интенсивности в дифракционной картине Френеля можно объяснить в общих чертах следующим образом: прозрачная область на краю отверстия представляет собой множество точечных источников вторичных волн, которые интерферируют между собой, образуя на экране множество интерференционных картин. При изменении случайным или заданным образом амплитуды и фазы вторичных волн видность их интерференционных картин уменьшается, создавая эффект размазывания. Тем самым на экране образуется освещенная область с несколько размытыми границами и закруглениями на углах, но почти без каких либо ярко выраженных дифракционных темных и светлых участков.

Таким образом, в работе было проведено изучение распределения интенсивности в дифракционной картине Френеля в монохроматической волне лазерного излучения, прошедшего квадратное отверстие. Предложено, что формированием вблизи края отверстия случайного распределения амплитуды и фазы вторичных волн может быть уменьшена неравномерность интенсивности в дифракционной картине. Изготовлены дифракционные элементы, в форме квадратного отверстия с «размытыми» краями, подтверждающие сделанные предположения и существенно уменьшающие неравномерность интенсивности в дифракционной картине Френеля.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. 2-е изд. – М. : Наука, 1973. – 713 с.

2. Дифракционная компьютерная оптика / Д. Л. Головашкин, Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский и др. // Физмалит, 2007. – 736 с.

3. Вычислительный эксперимент с фокусатором Гауссова пучка в прямоугольник с постоянной интенсивностью / Голуб М. А., Досколович Л. Л., Казанский Н. Л., Сисакян И. Н., Сойфер В. А., Харитонов С. И. // Компьютерная оптика. – 1990. – № 7. – С. 42–49.

4. Досколович Л. Л., Казанский Н. Л. Исследование голографических оптических элементов, фокусирующих в двумерную прямоугольную область // Компьютерная оптика. – 1992. – № 12. – С. 14–17.

5. Горячев Л. В., Горячев В. Л. Устранение дифракции в пучках света // Фундаментальная и прикладная физика. – 2012. – № 1. – С. 29–37.

6. А.В. Быков, И.В. Митин, А.М. Салецкий. Оптика. Методика решения задач. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова. – 2010. – С. 246.

7. Ю. В. Чугуй. Расчёт положения границы объекта при его проецированиив пространственно-неинвариантной когерентно-оптической системе // Автометрия. – 2016. – № 6. – С. 50–60.

© Ю. Ц. Батомункуев, П. С. Орлов, 2018

### УДК 543:423:575.2 (04)

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ПРИРОДНЫХ ВОД БОЛЬШОГО ЧУЙСКОГО КАНАЛА

#### Нурбек Жаныбекович Жеенбаев

Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика Ж. Жеенбаева Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 720071, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 265а, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией атомной спектроскопии и химического анализа материалов, тел. (312)64-26-99, e-mail: las.if-2011@mail.ru

### Гульбара Жусупбаевна Доржуева

Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика Ж. Жеенбаева Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 720071, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 265а, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (312)64-26-99, e-mail: Gulbara.D@mail.ru

Представлены результаты атомно-эмиссионного спектрального анализа для определения микроэлементов в водах Большого Чуйского канала.

Ключевые слова: атомно-эмиссионная спектроскопия, двухструйный плазматрон, элементы, концентрация элементов.

### SPECTRALMETHOD FOR NATURAL WATER OF GRAND CHUI CHANNEL ANALYSIS

#### Nurbek J. Jeenbaev

Institute of physics-technical problems named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 265a, Prospect Chui St., Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, D. Sc., Head of Labarotory of Atomic Spectroscopy, phone: (312)64-26-99, e-mail: las.if-2011@mail.ru

#### Gulbara J. Dorjueva

Institute of physics-technical problems named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 265a, Prospect Chui St., Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, Ph. D., Senior Researcher, phone: (312)64-26-99, e-mail: Gulbara.D@mail.ru

The results of the atomic-emission spectral analysis for microelements determination in the Big Chui Channel.

Key words: atomic-emission spectroscopy, two-jet plasmatron, elements, concentration of elements.

Известно, что микроэлементам отводят особую роль в изучении процессов, связанных с загрязнением воды, главным образом металлами, которые являются как компонентами жизненно важных биологических систем, так и продуктами техногенного происхождения. Металлы и их соединения попадают в окружающую среду в результате промышленной и сельскохозяйственной деятельности. Круг вредных соединений металлов включает в себя до тысячи или более наименований, включая органические соединения, неорганические вещества, элементы, их ионные и молекулярные формы [1-3]. Известно, что в минеральных водах содержится множество различных химических элементов, которые существуют в недрах Земли. Они существуют в форме простых ионов или нерастворимых солей, и их концентрации различаются между собой на 5-6 порядков. Наиболее распространенными являются положительные ионы натрия, калия, кальция, магния и т. д. Содержащиеся в минеральных водах в микроколичествах ионы этих элементов (марганец, медь, цинк, молибден, мышьяк, железо, кобальт, никель, хром и т. д.), являются неизменными компонентами нормальной работы большинства ферментов, присутствующих в организме человека, и способны активно участвовать в обменных процессах различных веществ организма. Тем не менее, ряд элементов природных минеральных вод характеризуется точно установленным токсичным воздействием на организм человека. Для большинства этих элементов определены предельно допустимые концентрации (ПДК), при превышении которых вода не может быть использована для питьевых нужд [4].

Атомно-эмиссионная спектроскопия природных вод с использованием различных источников возбуждения (дуга постоянного тока, индуктивная плазма, двухструйный плазмотрон и др.) в качестве многоэлементного метода позволяет одновременно получать информацию по широкому кругу исследуемых элементов и характеризуется слабой зависимостью аналитического результата от химической формы анализируемых проб. Анализ природных вод целесообразно проводить с использованием таких источников возбуждения спектров элементов, у которых состав плазмы как можно меньше зависит от сложности состава природных вод. В этом отношении двухструйный плазмотрон ДПГ-50 выгодно отличается от других источников света и устранение влияния состава воды на результаты анализа, по-видимому, связано с полным испарением аэрозольных капель, а также с особенностями механизма возбуждения плазменной струи [4,5]. Другим достоинством является, тот факт, что при прямом введении анализируемой жидкости между плазменными струями осуществляется быстрый анализ с низкими пределами обнаружения и высокими метрологическими характеристиками. Высокая температура и протяженность двухструйного плазмотрона ДПГ-50 обеспечивает полное испарение инжектированных тонкодисперсных аэрозолей, что является определяющим фактором для снижения предела обнаружения элементов в спектре атомного излучения и является гарантией хорошей воспроизводимости полученных результатов [6].

Именно поэтому для решения проблемы определения содержания металлов в природных водах Кыргызстана, а именно в водах Большого Чуйского канала (БЧК) в городе Бишкеке и в его окрестностях, в качестве высокотемпературного источника возбуждения был выбран двухструйный плазмотрон ДПГ-50. Образцы воды были отобраны в естественных водах БЧК, начиная с городских пределов в предварительно подготовленные полиэтиленовые емкости. До отбора природной воды емкости трижды ополаскивали этой водой. Каждую взятую пробу воды в отдельности концентрировали 20 раз без кипения путем выпаривания в вытяжном шкафу и хранили в мерной колбе. В качестве эталонных образцов использовались синтетические стандартные растворы, содержащие определяемые элементы. Многоэлементные стандартные растворы детектируемых элементов были получены путем растворения металлов, оксидов и солей марки OCЧ, XЧ, ЧДА в минимальном объеме, в основном HNO<sub>3</sub> марки XЧ, с последующим добавлением дистиллированной воды до требуемого объема. Рабочий стандартный раствор получают путем последовательного разбавления основного стандарта фоновым раствором.

Для изучения концентрированных водных проб использовался метод атомноэмиссионного спектрального анализа. Исследования проводились в оптимальном режиме работы двухструйного плазмотрона ДПГ-50 при проекции (1: 1) линзой (с фокусным расстоянием F = 150 мм) оптимальной части плазменной струи, расположенной на расстоянии H = 25 мм от среза плазменных головок, на щель спектрографа ДФС-13 (решетка 600 шт/мм). Спектры каждого образца и сравнительные образцы синтетических растворов фотографировались с временем экспозиции 40 секунд на фотопластинку ПФС-01 с чувствительностью 6 единиц. ГОСТ. При этом ширина щели спектрографа составляла 20 мкм.

Анализируемые растворы, налитые в стеклянные бутылки, были соединены хлорвиниловой трубкой с распылителем и установлены на высоте 30 см от кончика распылителя. Спектры анализируемых вод и синтетических растворов фотографировались дважды. После съемки каждого образца шланги и распылитель промывали дистиллированной водой в течение 15-20 секунд. Фотопластинка проявлялась в стандартном проявителе, фиксировалась, промывалась, затем высушивалась. Спектральные линии обнаруженных элементов и фона вблизи линии фотометрировали на микроденситометре МД-100 и определяли интенсивность спектральных линий исследуемых элементов  $I_{\rm Л}$ . На основе измерений синтетических стандартных растворов был составлен график калибровки в координатах LgI<sub>Л</sub>-LgC, где C – концентрации определяемых элементов.

В таблице 1 показан анализ содержания металлов в отобранных пробах. Из данных таблицы 1 следует, что значения установленных концентраций элементов в разных точках пробоотбора вод различны, но большинство из них намного меньше, чем ПДК. Во время анализа Cu, Cr, Zn, Fe были обнаружены во всех пробах. Содержание Fe во всех пробах намного выше, чем концентрация ПДК, а содержание Zn в целом ниже, чем ПДК во всех пробах. Концентрация Cu в воде БЧК по мере удаления от города уменьшается, тогда как для концентрации Cr такая картина распределения не наблюдается. Содержание Cu в воде БЧК ближе к городу Бешкек превышает ПДК в 1,3 раза, в остальных же местах отбора проб превышение ПДК этого элемента, не наблюдается. Увеличение содержания Си ближе к городу, по-видимому, связано с антропогенным загрязнением окружающей среды. Концентрации Си и Zn ниже ПДК почти во всех точках отбора проб. Содержание железа во всех образцах превышает ПДК от 1,6 до 4,6 раза. Отвечая на вопрос: в чем причина высокого содержания железа в канале БЧК, следует отметить, что это может быть связано с вовышенным геохимическим фоном железа в породах, где протекают реки, поскольку содержание железа по всему каналу сильно не меняется.

Место	Расстояние,	Cu	Cr	Zn	Fe	
отбора проб	КМ	Cu	CI	2.11	10	
		мг/л				
<b>№</b> 1	Начало черты города	1.28	0.011	1.68	1.38	
Nº 2	5	1.4	0.026	1.1	1.8	
Nº 3	8	1.34	0.011	1.62	0.98	
<u>N</u> <u>o</u> 4	10	0.14	0.062	1.68	1.96	
Nº 5	13	0.08	0.062	1.80	1.36	
<u>№</u> 6	15	0.07	0.026	0.55	0.6	
Nº 7	20	0.08	0.022	1.62	1.46	
Nº 8	23	0.08	0.026	1.96	0.64	
Nº 9	25	0.08	0.015	1.62	0.48	
<u>№</u> 10	30	0.09	0.052	1.32	1.22	
ПДК		1.0.	0.05	5.0	0.3	

Спектральный анализ вод БЧК

Во всех экспериментах относительное стандартное отклонение атомноэмиссионного спектрального анализа составляет 0.5-0.6 в зависимости от определяемого элемента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Золотов Ю. А. Аналитическая химия: проблемы и достижения. – М. : Наука, 1992. – 285 с.

2. Мур Д. В., Раммамутри С. Тяжелые металлы в природных водах. – М. : Мир, 1987. – 285 с.

3. Шуваева О. В. Современное состояние и проблемы элементного анализа вод различной природы: Аналит. Обзор / СОРАНГПНТБ, ИНХ. – Новосибирск, 1996. – 48 с.

4. Lahl H., Lavanchy Y H. Hydrogeological application of trace – element analysis with ACP-AES for the characterization of ground water categories at the foot the Swiss Jura between Lausanne // Fresenius Z. Anal. Chemical. – 1991. - V.341. - P.559.

5. Anderson J. Analysis of drinking water by ICP-AES with ultrasonic nebuliezer //Atomic Spectroscopy. – 1992. – V. 13. – P. 93.

5. Жеенбаев Ж. Ж., Энгельшт В. С., Урманбетов К. Двухструйный плазматрон для спектрального анализа // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42, № 2. – С. 174–176.

6. Жеенбаев Ж. Ж., Энгельшт В. С., Урманбетов К., Таштанов Р. А., Доржуева Г. Ж. Влияние макрокомпонентов природных вод на интенсивности линий определяемых микроэлементов // Известия НАН КР. – 2003. – № 2–3. – С. 73–79.

© Н. Ж. Жеенбаев, Г. Ж. Доржуева, 2018

### УДК 617.741: 535.4

## БИНАРНЫЕ СТРУКТУРЫ В ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ ХРУСТАЛИКАХ ГЛАЗА

#### Галина Александровна Ленкова

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)336-41-08, e-mail: lenkova@iae.nsk.su

Рассмотрены особенности применения бинарных дифракционных структур в мультифокальных искусственных хрусталиках глаза (интраокулярных линзах ИОЛ) для расширения фокальной области. Приводятся результаты аналитического исследования влияния сферических аберраций глаза и оптической силы диафрагмы (диаметра зрачка) на глубину фокуса (пределы четкого видения). Анализируется распределение интенсивности по порядкам дифракции в бинарных дифракционно-рефракционных ИОЛ.

**Ключевые слова:** бинарные дифракционно-рефракционные хрусталики глаза, зрачок, интраокулярные линзы, глубина фокуса.

## **BINARY STRUCTURE IN TIME-REFRACTION LENS EYES**

### Galina A. Lenkova

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)336-41-08, e-mail: lenkova@iae.nsk.su

Specific features of the application of binary diffraction structures in multifocal artificial lens of the eye (intraocular lenses IOL) for the expansion of the focal region are considered. The results of an analytical study of the effect of spherical eye aberrations and the optical power of the diaphragm (pupil diameter) on the depth of the focus (the limits of a clear vision) are presented. The intensity distribution in the diffraction orders is analyzed in binary diffraction-refractive IOLs.

**Key words:** binary diffractive-refractive lens of the eye, pupil, intraocular lenses, depth of focus.

## Введение

При имплантации искусственных хрусталиков глаза (интраокулярных линз ИОЛ) почти полностью теряется естественная аккомодация глаза, т.е. способность непрерывной перефокусировки на разные расстояния. В случае однофокусных ИОЛ восстанавливается зрение вдаль, а для ближнего расстояния пациенту необходимы очки. Проблема расширения пределов аккомодации решается путем создания бифокальных ИОЛ рефракционного и дифракционно-рефракционного (гибридного) типа (рис. 1), из которых особый интерес представляет второй тип.



Рис. 1. Бифокальная ИОЛ внутри (a) и вне глаза ( $\delta$ )

Дифракционно-рефракционная ИОЛ состоит из двояковыпуклой или плоско-выпуклой линзы (рефракционный элемент) и фазовой кольцевой микроструктуры (дифракционный элемент), формируемой на одной из поверхностей линзы (рис. 2). Рефракционный, базовый, элемент создает главный фокус ИОЛ, а совместно с дифракционным элементом - еще один или несколько дополнительных фокусов.



Рис. 2. Бифокальные ИОЛ ReSTOR (США) и МИОЛ-Аккорд (Россия)

Бифокальные ИОЛ с пилообразной (киноформной) структурой (рис. 2), аналогичной фазовой линзе Френеля, имеют два фокуса 0-й (зрение вдаль) и +1-й (зрение вблизи). Благодаря удачному сочетанию низкой и высокой оптических сил дифракционного и рефракционного элементов с противоположной зависимостью фокусных расстояний элементов от длины волны компенсируются хроматические аберрации в +1-м порядке. Подобная дифракционнорефракционная ИОЛ была разработана в лаборатории дифракционной оптики Института автоматики и электрометрии СО РАН под названием МИОЛ-Аккорд (рис. 2) [1]. В отличие от зарубежного метода алмазного точения, кварцевая матрица дифракционной структуры этой ИОЛ изготавливается путем прямой лазерной записи в фоторезисте и методом реактивного ионно-плазменного травления. Кроме того, в структуре предусмотрена компенсация сферических аберраций глаза. Пациенты с бифокальными ИОЛ имеют хорошую остроту зрения вдаль и вблизи, но значительно сниженную на промежуточном расстоянии, важном для работы на компьютере. Для решения этой проблемы разрабатывают мультифокальные ИОЛ, позволяющие расширить глубину фокуса или сформировать дополнительные фокусы. В последнем случае [2] находят применение бинарные структуры, подобные фазовой зонной пластинке (рис. 3), в которых формирование трех фокусов достигается просто - выбором глубины профиля, что невозможно в случае киноформной структуры. В некоторых конструкциях дифракционно-рефракционных ИОЛ предлагается изменять диаметр центральной зоны дифракционной структуры, что также, как изменение диаметра диафрагмы, может приводить к увеличению глубины фокуса.



Рис. 3. ИОЛ с бинарной структурой

Цель работы состоит в аналитическом исследовании роли диафрагмы (диаметра зрачка глаза) и особенностей бинарной бифокальной дифракционной структуры (хроматических аберраций и скважности) для расширения фокальной области дифракционно-рефракционных ИОЛ.

# Связь глубины фокуса с оптической силой диафрагмы

Глубина резкости (фокальная глубина) оптической системы определяется величиной смещения  $\pm \Delta z$  вдоль оптической оси относительно фокуса, в пределах которого качество изображения остается достаточно хорошим. Наиболее широко используемым критерием для установления глубины фокуса является приращение волновой аберрации на  $\lambda/4$  или уменьшение интенсивности на оси на 20 % относительно максимума [3], что соответствует с учетом  $\Phi_{\pi}$  из [4]:

$$\Delta z = \pm (1/2) f^2 \lambda / (n_1 a^2) = \pm 2 f^2 \lambda / (n_1 d^2) = \pm (f^2 / n_1) (\Phi_{\rm g} / 2), \qquad (1)$$

где *а* и *d* – радиус и диаметр апертуры (зрачка),  $\lambda$  – длина волны,  $n_1$  - показатель преломления окружающей среды, *f* – фокусное расстояние,  $\Delta z$  - расстояние от фокуса до точки наблюдения,  $\Phi_{d}$  - оптическая сила диафрагмы:

$$\Phi_{\pi} = 4\lambda/d^2. \tag{2}$$

Известно, что разрешающая способность оптической системы определяется как полуширина функции рассеяния точки ФРТ:  $\rho = \lambda f/(n_1 d)$ . Интересно, что если провести лучи, соединяющие края диафрагмы с противоположными нулевыми значениями ФРТ (рис. 4, *a*), то они пересекаются на расстоянии  $\Delta z_1 = 2\rho f/d = 2f^2\lambda/(n_1 d^2)$  от фокуса, которое совпадает с  $\Delta z$ . Это чисто геометрическое совпадение позволяет оценить глубину фокуса реального глаза на основе экспериментальных ( $\rho_{\Gamma}$ ) и теоретических ( $\rho_{T}$ ) значений разрешающей способности глаза, приведенных в [5]. При малых диафрагмах (до 1.5 мм) разность ( $\rho_{\Gamma} - \rho_{T}$ ) постоянна и обусловлена только мозаичным строением сетчатки (размером колбочек), а далее увеличивается из-за неоднородностей хрусталика и сферических аберраций.



Рис. 4

На основе (1) изменение оптической силы  $\Delta \Phi$  в пределах глубины фокуса:

$$\Delta \Phi = n_1 / f - n_1 / f_1 = \pm \Delta z_1 n_1 / f^2 = \pm 2\lambda / d^2 = \pm \Phi_{\rm A} / 2.$$
(3)

Из (3) следует, что полное изменение оптической силы (полная глубина фокуса) равно  $\Phi_{d}$ . В табл. 1 приводятся значения  $\Phi_{d}$ , рассчитанные по формуле (2) для  $\lambda$ =0.555 мкм. Используя зависимость  $\Delta z_1$  от  $\rho$  и  $\Delta \Phi$  от  $\Delta z_1$ , можно оценить в диоптриях полную глубину фокусировки глаза с естественным хрусталиком. Она представлена в 3-й колонке табл. 1. Зрачок глаза может принимать значения от 1.5 мм до 7 мм, но преимущественно от 2 мм до 5 мм. Из табл. 1 видно, что в последнем случае глубина фокуса составляет ~1 дптр, т.е. без аккомодации нормальный глаз видит от бесконечности до ~1 м.

При замене естественного хрусталика на ИОЛ устраняется влияние неоднородности хрусталика, и глубина фокусировки становится равной и меньше ~0.5 дптр (значения в скобках в табл. 1), т.е. от бесконечности до ~2 м. Чтобы видеть на расстоянии 25 -50 см, необходимо дополнительно 4 – 2 дптр. Эту задачу выполняют бифокальные и мультифокальные ИОЛ.

<i>d</i> ,	$\Phi_{{ m  extsf{d}}}$ ,	$\Phi_{_{ m J}}p_{_{ m \Gamma}}/p_{_{ m T}}$ ,
ММ	дптр	дптр
0.6	6.2	7.3
0.8	3.5.	4.3
1.0	2.2	2.9
1.5	1.0	1.7 (1.0)
2.0	0.6	1.4 (0.6)
3.0	0.3	1.1 (0.4)
4.0	0.2	1.0 (0.3)
5.0	0.1	0.9 (0.4)

Таблица 1

## Особенности бинарной структуры

Значения радиусов  $r_k$ , диаметров  $d_k$  и числа зон k бинарной структуры (рис. 3) определяются по известным формулам зонной пластинки:

$$r_k^2 = f_{\mu\nu} k\lambda/n_1, \qquad d_k^2 = 4k\lambda/\Phi_{\mu\nu}, \qquad k = d_k^2 \Phi_{\mu\nu}/(4\lambda), \qquad (4)$$

где  $f_{д_3}$  и  $\Phi_{d_3}$  – фокусное расстояние и оптическая сила дифракционного элемента. В табл. 2 приведены значения диаметров 1-й (центральной) зоны  $d_1$ и число зон k при диаметрах зрачка d от 1.5 мм до 5 мм и характерных значений  $\Phi_{d_3}$  для дифракционного элемента от 1 дптр до 4 дптр. В скобках указаны соответствующие значения оптической силы очковых линз (~ в 1.3 раза меньше, чем  $\Phi_{d_3}$ ), а ниже расстояния до объекта в сантиметрах. Недостаток бинарной структуры в том, что в отрицательном фокусе (-1-м порядке) хроматическая аберрация  $\Delta \Phi_{CF} = \Phi_C - \Phi_F$  не компенсируется, а увеличивается [6]. Величина  $\Delta \Phi_{CF}$ , рассчитанная для модели глаза с ИОЛ, отрицательная и составляет – 0.95 дптр, а для дифракционного компонента ( $\Delta \Phi_{CF})_{d_3} = \Phi_{d_3}(\Delta \lambda_{CF}/\lambda)$  зависит от знака  $\Phi_{d_3}$ . Таким образом, при отрицательных  $\Phi_{d_3}$ ]-2| дптр величина  $\Delta \Phi_{CF}$ бифокальной ИОЛ увеличится в ~2 раза (см. табл. 3).

	Ф <sub>дэ</sub> , дптр					
	1(0.8)	2(1.5)	3(2.3)	4(3.1)		
	125см	67см	43см	31см		
$d_1$ , мм	1.5	1.1	0.9	0.8		
<i>d</i> , мм	k					
1.5	1	2	3	4		
2	1.8	3.6	5.4	7.2		
3	4	8	12	16		
4	7.2	14.4	21.6	28.8		
5	11.3	22.5	33.9	45.2		

Таблица	2
,	

	$\Phi_{{}_{\!$				$\Phi_{{ m d}{ m 9}},$ дптр			
	+ 1	+ 2	+ 3	+ 4	- 1	- 2	- 3	- 4
(⊿Ф <sub>СF</sub> ) <sub>дэ</sub> , дптр	+0.31	+0.62	+0.93	+1.24	-0.31	-0.62	-0.93	-1.24

Рассмотрим распределение интенсивности I(n) по фокусам (порядкам дифракционного спектра) в зависимости от скважности c = s/t (t и s – период структуры и ширина фазовой ступеньки) бинарной структуры (рис. 4,  $\delta$ ). В [7] показано, что его можно представить как произведение трех функций:

$$I(n) = F(n)W(n)P(n),$$
(5)

где n – номер порядка дифракции, F(n) – гребенчатая функция, имеющая значения, равные 1, при целых значениях n, W(n) – нормированная огибающая функция типа  $(sinx / x)^2$ , которая имеет главный максимум, равный 1, при n = 0 и нулевые значения при n = m/c (m - целое число). P(n) – интерференционная функция, которая имеет только два выражения. При n = 0 и n = m/c она принимает вид:  $P_0 = c^2[1 + (1/c - 1)^2 - 2(1/c - 1)\cos \varphi]$ , а в остальных порядках  $P_n = 4c^2\sin^2(\varphi/2)$ . Здесь  $\varphi = 2\pi h(n_2 - n_1)/\lambda$ , - фазовая задержка на участкеs,  $n_2$  – показатель преломления материала структуры (рис.4, 2). Если  $\varphi = \pi$ , то  $P_0 = c^2(2 - 1/c)^2$  и  $P_n = 4c^2$ , причем если c = 1/2, то отсутствует 0-й порядок. При отклонении скважности от значения c = 1/2 появляются дополнительные фокусы, более высокого порядка, чем ±1-й, а при  $\varphi = \pi$  - также 0-й порядок.

### Заключение

Определено, что полная глубина фокуса оптической системы равна оптической силе диафрагмы (зрачка)  $\Phi_{d}$ , что недостаточно для ближнего зрения с монофокальной ИОЛ. Для расширения глубины фокуса возможно применение бинарной фазовой дифракционной структуры, но из-за хроматических аберраций только в том случае, если оптическая сила этой структуры меньше двух диоптрий. Вероятно, для расширения фокальной области можно использовать эффект появления дополнительных фокусов при отклонении скважности структуры от значения 1/2. Следует также учесть, что, для использования полного интервала оптических сил бинарной структуры (+1-й, 0-й и -1-й порядки), необходимо увеличить оптическую силу рефракционной части ИОЛ, т.к. в зрении вдаль будет участвовать отрицательная оптическая сила дифракционного элемента.

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Корольков В. П., Искаков И. А. Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Оптический журнал.– 2007. – Т. 74.– № 12. – С. 34–39.

2. Voskresenskaya A., Pozdeyeva N., Pashtaev N., Batkov Ye., Treushnicov V., Cherednik V., Initial results of trifocal diffractive IOL implantation// Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.  $-2010. - T. 248. - N_{\rm D} 9. - P. 1299-1306.$ 

3. Бетенси Э., Хопкинс Р., Шеннон Р. и др. Проектирование оптических систем. Пер. англ. / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта. – М. : Мир, 1983. – 432 с.

4. Ленкова Г. А. О фокальном сдвиге и фазовой линзе Френеля // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 111. – № 1. – С. 107–114.

5. Максутов Д.Д. Астрономическая оптика. – Л. : Наука, 1979. – 395 с.

6. Ленкова Г. А. Хроматические аберрации модели глаза с дифракционнорефракционными интраокулярными линзами // Автометрия. – 2009.– Т. 45.– № 2. – С. 99–114.

7. Ленкова Г. А. Особенности распределения интенсивности в дифракционном спектре амплитудно-фазовых решеток // Автометрия. – 1992. – № 5.– С. 14–26.

© Г. А. Ленкова, 2018

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### Сергей Николаевич Шарангович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, тел. (382)241-36-43, e-mail: shr@tusur.ru

### Кирилл Владимирович Заичко

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, аспирант, e-mail: zaichkokv@gmail.com

Представлены результаты расчета оптического затухания в оптическом волокне при воздействии различных доз ионизирующего излучения (на основе экспериментальных данных). Определены предельные значения факторов, которые воздействуют на оптическое волокно. Дана численная оценка пределов работоспособности оптического волокна.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптическое затухание, ионизирующее излучение, космический аппарат.

# NUMERICAL SIMULATION OF THE SIZE OF DIFFICULTY OF THE OPTICAL FIBER UNDER INFLUENCE OF VARIOUS DOSES OF IONIZING RADIATION

### Sergei N. Sharangovic

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenin St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D., Professor, Department of Superhigh-Frequency and Quantum Radio Engineering, phone: (382)241-36-43, e-mail: shr@tusur.ru

### Kirill V. Zaichko

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenin St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D. Student, e-mail: zaichkokv@gmail.com

The results of calculation of optical damping under the action of ionizing radiation of various doses are presented on the basis of experimental data. The limiting values of the factors that affect the optical fiber are determined. A numerical estimate of the limits of optical fiber performance is given.

Key words: optical fiber, optical attenuation, ionizing radiation, spacecraft.

Важнейшей характеристикой оптических волокон (OB), используемых в космических аппаратах (KA) с длительным сроком работы, являются оптические потери. Они определяют дальность связи по OB и его эффективность.

Цель работы – произвести численное моделирование влияния ионизирующего излучения на оптическое затухание в ОВ.

Из источника [1] известна зависимость затухания в ОВ от поглощенной дозы ионизирующего излучения. Эта зависимость в графической форме представлена на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость радиационно-наведенного поглощения (РНП) от времени облучения (максимальная доза 5,5×10<sup>4</sup> рад) [1]

Быстрый рост концентрации центров окраски на начальных стадиях облучения связан с заполнением носителями зарядов ловушек, исходно имеющихся в оптическом материале, а снижение скорости накопления центров окраски на последующих стадиях облучения может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, число ловушек, ещё не заполненных носителями зарядов, постепенно уменьшается, поскольку заполненные ловушки перестают конкурировать с незаполненными за захват носителей. Во-вторых, такую конкуренцию незаполненным ловушкам начинают оказывать уже возникшие центры окраски: дырочные центры – за захват электронов, а электронные – за захват дырок. И в том, и в другом случаях имеет место процесс исчезновения центров окраски в результате рекомбинации свободных носителей заряда с носителями противоположного знака, захваченными на соответствующих ловушках [2].

Для определения величины затухания в ОВ при воздействии больших доз излучения, проведем аппроксимацию экспериментальных данных источника [1].

В источнике [2] указано кинетическое уравнение процесса накопления РЦО, полученное для случая неизменной мощности дозы в ходе облучения:

$$dn = [(N-n)p - n(q+q_T)]dt,$$
(1)

где *N* – концентрация ловушек, на которых образуются центра окраски;

*t* – длительность облучения;

*р* – вероятность возникновения центра окраски при захвате носителя заряда;

*q* – вероятность разрушения центра окраски под действием излучения;

 $q_{T}$  – вероятность термического разрушения центра окраски при температуре T .

Из всего сказанного выше следует, что накопление РЦО включает три процесса [1-2]: возникновение центров окраски из ловушек, существующих в материале до воздействия излучения, возникновение РЦО из ловушек, возникших в процессе облучения, разрушение РЦО. Очевидно, что каждый из процессов характеризуется собственной постоянной времени, обозначим их как  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$ 

, соответственно.

Модель, приведенная в [2] не описывает затухание, она описывает изменение концентрации РЦО. Для того чтобы описать затухание введем весовые коэффициенты пропорциональности, показывающие вклад каждого из процессов изменения концентрации РЦО в затухание ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ). Тогда, уравнение, описывающее РНП, примет следующий вид:

$$\alpha_{meop} = n_1 \cdot (1 - e^{-b1 \cdot t}) + n_2 \cdot (1 - e^{-b2 \cdot t}) - n_3 \cdot (1 - e^{-b3 \cdot t}).$$
<sup>(2)</sup>

Результат аппроксимации экспериментальных данных из [1] уравнением (2) показан на рис. 2.



Рис. 2. Результат численного моделирования

Полученное уравнение описывает кинетику изменения затухания при воздействии ионизирующего излучения на ОВ. Для определения величин затухания при дозах 30 Мрад, 300 Мрад, и 600 Мрад, необходимо определить времена, при которых данные дозы будут достигнуты при неизменной мощности дозы излучения. Выразим величину мощности дозы облучения:

$$M = \frac{D}{T}.$$
 (3)

Тогда, для каждой дозы можно определить время облучения:

$$t_i = \frac{D_i}{D_0} \cdot T_0 \,, \tag{4}$$

где  $D_i$  – величина дозы;

 $D_0$  – величина дозы экспериментальная [1];

*T*<sub>0</sub> – время облучения [1].

Расчетные времена облучения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение длительности облучения и соответствующие им дозы.

<i>D<sub>i</sub></i> , Мрад	30	300	600
<i>t<sub>i</sub></i> , сек	$6,545 \cdot 10^{5}$	$6,545 \cdot 10^{6}$	$1,309 \cdot 10^{7}$

Подставим полученные значения в уравнение  $\alpha_{meop}$ , по которому осуществлялась аппроксимация и получим величину затухания при различных дозах облучения, см. табл. 2.

Таблица 2

Величина затухания при различной мощности дозы облучения.

<i>D<sub>i</sub></i> , Мрад	30	300	600
$lpha_{meop}(t_1)$ , дБ/км	9,329	9,329	9,329

Оценка показывает, что при заданных дозах затухание в ОВ стационарно и составляет 9,329 дБ/км.

Стоит отметить, что приведенные расчетные значения затухания (табл. 2) получены для условий испытания ОВ в экспериментальной установке, аналогичной приведенной в [1], в течение времен, указанных в табл. 2. В условиях космического пространства, дозы (30 Мрад, 300 Мрад и 600 Мрад для разных условий радиационной защиты) накапливаются в элементах КА в течение 25 лет его работы. Иллюстрация зависимости РНП от поглощенной дозы, рассчитанной по выражению (2) (в логарифмическом масштабе), приведена на рис. 3.



Рис. 3. Расчетная зависимость радиационно-наведенного поглощения от поглощенной дозы облучения

Оценка показывает, что при заданных дозах затухание в ОВ стационарно и составляет 9,329 дБ/км. Это можно объяснить конечным количеством РЦО, которое может образоваться в кварцевом стекле при воздействии ионизирующего излучения.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгов И. И., Иванов Г. А., Чамаровский Ю. К., Яковлев М. Я. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной [Электронный ресурс] // Спецвыпуск «Фотон-экспресс» – Наука. – 2005. – № 6. – С. 8-10 – Режим доступа : http://fotonexpress.ru/pdf/PE 6(46).pdf (дата обращения 09.03.18)

2. Арбузов В. И. Основы радиационного оптического материаловедения. Учебное пособие. – СПб. : СПбГУИТМО, 2008. – 284 с.

© С. Н. Шарангович, К. В. Заичко, 2018

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ

### Марина Петровна Егоренко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: e\_m\_p@mail.ru

### Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Рассчитана оптическая система, работающая в ультрафиолетовом и визуальном диапазонах спектра для получения комбинированного изображения, используя два спектральных диапазона одновременно. Особенностью системы является конструкция оптических поверхностей, учитывающихиспользование технологий 3D печати.

Ключевые слова: ультрафиолетовый и визуальный диапазоны спектра, комбинированное изображение, двухспектральная оптическая система, решение задач наблюдения и разведки, асферические поверхности, технологии 3D печати.

# FEATURES OF THE OPTICAL SYSTEM USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

### Marina P. Egorenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Lecturer, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-91-11,e-mail: e\_m\_@mail.ru

### Viktor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail

The optical system operating in the ultraviolet and visual spectral range zones to obtain a combined image is calculated using two spectral bands simultaneously. A special feature of the system is the design of optical surfaces, taking into account the use of 3D printing technologies.

**Key words:** ultraviolet and visible ranges of the spectrum, combined image, dvuhsistemnaya optical system, the tasks of surveillance and reconnaissance, aspherical surfaces of 3D printing technology.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для решения самых разных задач в интересах военных и гражданских пользователей – для оперативного проведения аэрофотосъемки, радиовещания, поисково-спасательных работ, разведки и наблюдения, поддержания правопорядка и т. д. БПЛА отличаются большим разнообразием, их конструкция и размеры зависят от задач, для которых они предназначаются [1]. В последнее время повысился интерес к разработке сверхлегких беспилотных летательных аппаратов для решения задач наблюдения и разведки. Они комплектуются штатными видеокамерами для навигации полета.

Широкоугольные объективы, как правило, имеют небольшое фокусное расстояние, примерно 4 ÷ 8 мм. Для идентификации объекта наблюдения требуется оптическая система с большим фокусным расстоянием и относительным отверстием.

Масса сверхлегких беспилотных летательных аппаратов не превышает 50 ÷ 100 г. Исходя из этого, масса оптических систем не должна превышать более 1/4 массы всего БПЛА, т. е. быть не более 10–20 гг.

Таким образом, к оптической системе наблюдения и идентификации объектива предъявляются жесткие массогабаритные требования.

Следовательно, для изготовления оптических деталей необходимо выбирать оптические материалы с наименьшей плотностью [2].

Расчет оптической системы планируется из полистирола (ПС) – это один из легких полимеров (плотность – от 0,902 до 1,04 г/см<sup>3</sup>). Он прозрачен в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Его показатель преломления 1,59 – 1,60 мкм [3, 4].

Для расчета в ППП «Zemax» была выбрана многоспектральная зеркальнолинзовая оптическая система (МЗЛО), выполненная из одного оптического материала, содержащая отражающие компоненты в виде линз Манжена и компенсаторы с положительной оптической силой в параллельном ходе лучей. В этом случае происходит частичная взаимная компенсация хроматических аберраций между компонентами. Для более полной компенсации аберраций в схему объектива после системы зеркал вводится дополнительный компенсатор из того же оптического материала (рис. 1) [5].



Рис. 1. Двухспектральная зеркально-линзовая система:

1 – положительная линза, выполненная в виде мениска; 2 – отрицательный мениск (зеркало Манжена); 3 – зеркало с наружным отражением, совмещенное со второй поверхностью положительной линзы 1; 4 – компенсатор аберраций, выполненный расклеенным из отрицательной линзы, являющейся центральной частью отрицательного мениска 2; 5 – линза Пиацци-Смита

Предлагаемая оптическая система выполнена по патенту [6], теория расчета приведена в работах [7, 8]. Эта оптическая система позволяет получить изображение одного участка объекта в едином масштабе, но в разных спектральных диапазонах. Дальнейшая электронная обработка изображений позволит получить комбинированное изображение ультрафиолетового и визуального диапазонов спектра.

Традиционная технология изготовления оптических деталей из полистирола – литье под давлением. Наиболее технологичное изготовление литьевой формы для оптических поверхностей – сфера [2].

Если применить асферизацию оптических поверхностей, то можно увеличить число коррекционных параметров, используя их для повышения оптических параметров, например, угла поля зрения или относительного отверстия.

Наиболее перспективной технологией для этого может быть технология 3D печати. Кстати, единственным материалом оптического качества в этой технологии является полистирол [9, 10].

Исходя из технологических возможностей различных способов 3D печати, обеспечивать точность формирования поверхностей (табл. 1), был определен наиболее перспективный из них – SLA для изготовления рассчитываемой оптической системы [11].

Таблица 1

Способ	Максимальная точность	Вирол	
3D печати	изготовления моделей, мкм	Бывод	
MJM	16	Наиболее точный метод (есть ограничения)	
SLA	25-50	Подходит для изготовления оптических деталей	
SLS	50-100	Подходит для изготовления оптических деталей	
LOM	100	В данном способе материалом служит бумага	
3DP	100	Ограниченное количество материалов	
FDM	>200	Низкая точность получаемых поверхностей	

Выбор способа изготовления оптических элементов

При разработке оптической системы в нее заранее были заложены асферические поверхности второго порядка для изготовления методом 3D печати. Согласно схемному решению лучи проходят через некоторые поверхности несколько раз (табл. 2).

Таблица 2

Некоторые конструктивные параметры асферических поверхностей

Поверхность	Радиус поверхности, мм	Материал	Эксцентриситет
3, 5, 7	-27,06	полистирол	-16,62
4,8	-62,36	полистирол	-59,46
9	3,46	полистирол	0,56
10	5,76	полистирол	-295,89
Концентрация энергии в пикселе ФПУ размером 6 × 6 мкм для ультрафиолетового и визуального диапазонов спектра ( $\Delta \lambda = 0,365-0,656$  мкм), а также для ближнего инфракрасного диапазона спектра ( $\Delta \lambda = 0,589-0,900$  мкм) приведены на рис. 2.



Рис. 2. Графики концентрации энергии в пикселе 6 × 6 мкм: *а*) диапазон спектра 0,365 – 0,656 мкм; *б*) диапазон спектра 0,589– 0,900 мкм

Рассчитанная система имеет следующие характеристики: f = 10 мм, D/f' = 1:1,43, угол поля зрения 20°, размер пиксела матрицы 6 × 6 мкм.

Таким образом, в результате компьютерного моделирования показана принципиальная возможность разработки единой оптической системы для ультрафиолетового, визуального и ближнего инфракрасного диапазонов спектра из полистирола для технологии 3D печати.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rutforce T0902 2.4G Flying Frog FPV RC Racing Drone [Электронный ресурс]: www.rcmoment.com/prm 9286.html

2. Bäumer Stefan. Handbook of Plastic Optics. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. – 189 p.

3. Серова В. Н. Оптические и другие материалы на основе прозрачных полимеров : монография. – Казань : КГТУ, 2010. – 540 с.

4. Wakaki Moriaki, Kudo Keiei, Thibuya Takehisa. Physical Properties and Data of Optical Materials : e-book. – CRC Press, 2007. – 576 p.

5. Егоренко М. П. Двухспектральная оптическая система для нанодронов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 95–97.

6. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Пат. № 98072 Российской Федерации на полезную модель МПК<sup>4</sup>G02B 17/00. Двухспектральная зеркально-линзовая система; заявитель и патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – № 2010108755/22(012273); заявл. 09.03.10; опубл.27.09.10.

7. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркальнолинзового объектива // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50, № 2. – С. 65–69.

8. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 53–58.

9. 3D-печатные оптические линзы на принтере Form 1 [Электронный ресурс]: 3Dtoday.ru> industry...pechatnye...linzy...printere-form-1.html

10. Технологии 3D-печати [Электронный pecypc]: http://www.ixbt.com/printer/3d/ 3d tech.shtml.

11. Катков И. А., Егоренко М. П. Анализ свойств оптических материалов для многодиапазонных объективов видеокамер нанодронов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 3–7.

© М. П. Егоренко, В. С. Ефремов, 2018

## УДК 535

# УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

## Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

## Диана Георгиевна Макарова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры информационной безопасности, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.ib@ssga.ru

## Олеся Владимировна Киселёва

Научно-производственное объединение «ЭЛСИБ» публичное акционерное общество, 630088, Россия, г. Новосибирск, ул. Сибиряков-Гвардейцев, 56, инженер-конструктор

Ключевые слова: жидкостные оптические элементы, искажение формы оптической поверхности.

Рассмотрена конструкция жидкостного оптического устройства для исследования оптических свойств жидкостных линзовых и зеркально-линзовых элементов при искажении формы сферической поверхности под воздействием гравитации. Конструкция устройства позволяет исследовать оптические элементы с положительной и отрицательной оптической силой и в разных спектральных диапазонах.

# DEVICE FOR RESEARCH THE OPTICAL PROPERTIES OF LIQUID ELEMENTS

## Viktor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

## Diana G. Makarova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant, Department of Information Security, phone: (383)343-91-11, e-mail: kaf.ib@ssga.ru

## Olesya V. Kiseleva

Scientific and Production Association ELSIB, 56, Sibiryakov-Gvardeytsev St., Novosibirsk, 630088, Russia, Design Engineer

The design of a liquid optical device for study the optical properties of liquid lens and mirrorlens elements at the distortion of the spherical surface shape under the gravity influence is considered. The design of the device allows investigating the optical elements with positive and negative optical power in different spectral ranges.

Key words: liquid optical elements, distortion of the shape of the optical surface.

В последнее время возродился интерес к жидкостным оптическим элементам с разными принципами управления (гидравлическим и электросмачивания) кривизны сферической преломляющей или отражающей поверхности для разработки адаптивных оптических систем [1–6].

Но в процессе эксплуатации поверхность оптических жидкостных элементов в составе видеокамер, установленных на носителях, может занимать различное положение в пространстве.

При этом форма сферической оптической поверхности будет отличаться от сферы из-за гравитационного воздействия. Причем факторов влияния может быть достаточно много (например, толщина и эластичность пленки, вязкость жидкости и т. д.)

Из-за различной ориентации оптической оси (ОО) жидкостного элемента относительно линии горизонта (ЛГ) можно предположить несколько вариантов отклонений эластичного оптического элемента от сферической формы:

- «грушевидная» при параллельности ОО относительно ЛГ;

- «эллиптическая» при перпендикулярности ОО относительно ЛГ.

Причем расположение эластичной поверхности жидкостного элемента, сверху или снизу, относительно жидкости определит ориентацию эллипса относительно его большой или малой оси. Промежуточные углы ориентации ОО относительно ЛГ дадут много комбинаций сложных сочетаний «грушевидной» и «эллиптической» форм поверхности.

Для определения конкретного влияния одной эластичной поверхности вторая поверхность выполнена «жесткой» в виде плоскопараллельной пластинки из оптически прозрачного материала для выбранной области спектра. На рисунке представлено устройство жидкостного линзового элемента. Основным элементом кластера 1 является эластичный элемент жидкостной линзы. Форма эластичного элемента определяется количеством жидкости, подаваемой поршнем 4 из цилиндра в рабочую зону.

Предварительное заполнение цилиндра и рабочей камеры жидкостью осуществляется через заливное отверстие, закрываемое заглушкой 5, а окончательное – через дренажное отверстие, закрываемое винтом 6 в вертикальном положении после выхода из камеры пузырьков воздуха.

Дозированная подача жидкости обеспечивается поршнем 4 при вращении регулировочного винта 9.

Наклон ОО жидкостного элемента относительно ЛГ осуществляется вращением корпуса 3 вокруг оси отверстия М6.

Предлагаемое устройство жидкостного элемента позволит определить погрешности сферической формы эластичного элемента при разных радиусах кривизны и углах наклона ОО относительно ЛГ, а также его влияние на качество изображения (дифракционной точки).



a)

A - A

б)



Устройство жидкостного линзового (зеркального) элемента, вид:

а) сбоку (разрез по Б-Б); б) сзади; в) цилиндра (разрез по А-А): 1 – кластер;
3 – корпус; 4 – шток; 5 – заглушка; 6, 15, 16 – винты; 7 – фиксатор штока;
8 – фланец; 9 – винт регулировочный; 10 – пластина плоскопараллельная;
11 – кольцо резиновое; 17 – сальник; 18 – уплотнитель

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефремов В. С., Макарова Д. Г., Шлишевский В. Б. Условия построения двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 55–59. 2. Голицын А. В., Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Некоторые варианты оптических систем на основе жидкостных элементов // XI Международная конференция «Прикладная оптика-2014»: сб. трудов в 3 т. (Санкт-Петербург, 21–24 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург : Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2014. Т. 3, секция 2. – С. 55.

3. Ефремов В. С., Макарова Д. Г., Шлишевский В. Б. Формулы параксиальной оптики для двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. Х Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 21–25.

4. Макарова Д. Г., Болотин А. А. Адаптивная жидкостная оптическая система терагерцового диапазона спектра для медицинской аппаратуры // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 46–52.

5. Макарова Д. Г., Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Вариообъектив с жидколинзовой системой изменения фокусного расстояния // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 77–81.

6. Blum M., Büeler M., Grätzel C., Aschwanden M. Compact optical design solutions using focus tunable lenses [Электронный ресурс]. – URL: http://proceedings. spiedigitallibrary.org/pro-ceeding.aspx?articleid=1661475 (дата обращения 24.02.2018).

© В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, О. В. Киселёва, 2018

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДАГЕНТА R-21 В УСЛОВИЯХ ОПУСКНОГО ТЕЧЕНИЯ В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

#### Алишер Сезгирович Шамирзаев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)316-57-31, e-mail: alisham@ngs.ru

#### Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, зав. отделом, тел. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при конденсации хладагента R-21 в условиях опускного течения в вертикальном микроструктурированном теплообменнике, образованном системой миниканалов. Проведен сравнительный анализ теплоотдачи при конденсации для двух массовых скоростей, получено хорошее соответствие экспериментальных данных и расчета по методике, учитывающей влияние напряжение трения в турбулентном потоке газа на теплоотдачу при конденсации.

Ключевые слова: теплообмен, микроструктурированный теплообменник, миниканал, конденсация, хладон R-21.

# THERMOPHYSICAL STUDY OF HEAT TRANSFER DURING DOWNFLOW CONDENSATION REFRIGERANT R-21 IN MICROSTRUCTURED HEAT EXCHANGER

#### Alisher S. Shamirzaev

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)316-57-31, e-mail: alisham@ngs.ru

## Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory of Multiphase Systems, phone: (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

The results of experimental study of the heat transfer with condensing of refrigerant R-21 under the descending flow in the vertical micro heat exchanger with minichannels were presented. Using multipoint wall temperature and local heat flux measurements the comparative analysis of the heat transfer with condensation at different mass fluxes was done. Good agreement between experimental data and calculations which take into account the friction stress influence at turbulent gas flow on condensation heat transfer were obtained.

Key words: heat transfer, microstructured heat exchanger, minichannel, condensation, refrigerant R-21.

Компактные двухфазные пластинчатые теплообменники, использующие теплоту фазового перехода, имеют высокую тепловую производительность

и широко используются в холодильной и криогенной промышленности. Они также применимы для использования в химических технологиях и абсорбционных тепловых насосах [1]. Стандартные пластинчатые теплообменники состоят из спаянных плоских, перфорированных и смещенных ребер.

В компактных теплообменниках размеры каналов сравнимы с капиллярной постоянной и капиллярные силы оказываются существенными в условиях парожидкостных течений. Влияние капиллярных сил на гидродинамику течения и теплообмен слабо изучены [2]. Отличительной особенностью компактных теплообменников является высокая удельная поверхность теплообмена на единицу объёма теплообменника. Структурирование теплообменной поверхности позволяет интенсифицировать теплоотдачу. Теплоотдача при конденсации в каналах малого размера рассмотрена в [3–7], где показана высокая эффективность таких каналов в теплообменных системах. В то же время данные работы показывают отсутствие универсальных методов расчета теплообмена при фазовом переходе в стеснённых условиях. Целью данной работы является исследование механизмов конденсации хладагента R-21 в элементе пластинчато-ребристого микроструктурированного теплообменника, в условиях опускного течения при малом тепловом потоке, что является типичными для многих практических приложений.

Измерения теплоотдачи при конденсации при нисходящем течении хладагента R-21 проведено при массовой скорости 30 и 40 кг/м<sup>2</sup>с. Эксперименты проведены на теплообменном участке, представленном на рис. 1.



Рис. 1. Схема теплообменного участка

В экспериментах использовался вертикальный микротеплообменник прямоугольного сечения размером 6.7х70х279 мм с верхней подачей хладагента. На входе в теплообменник было организовано равномерное распределение жидкости и пара. Экспериментальный участок изготовлен методом вакуумной пайки формованного перфорированного алюминиевого листа со стенками теплообменника толщиной 3 мм и имел плотность ребер 800 ребер на метр. Предварительный парогенератор использовался для достижения желаемого начального паросодержания на входе в рабочий участок. На выходе из рабочего участка располагался доиспаритель жидкости для подавления пульсаций давления в трубопроводе, соединяющем экспериментальную секцию с основным конденсатором.

Коэффициент теплоотдачи *h* вычисляется с учетом тепловой эффективности поверхности теплообмена  $\eta_0 = 1 - (A_1/A_0)(1 - \eta_f)$  следующим образом:

$$Q_{fr} = A_0 \eta_0 h (T_w - T_{Sat}) \, .$$

Здесь Q<sub>fr</sub> – количество тепла, подведенное к стенке теплообменника,  $\eta_f$  –эффективность ребра,  $A_1$  и  $A_0$  – площадь ребер и полная внутренняя площадь тестовой секции. Средняя внутренняя температура стенки T<sub>w</sub> определена по измеренным температурам стенки теплообменника с учетом градиента температуры стенки. Температура насыщения T<sub>Sat</sub>, определялась по измеренному давлению. Внешняя температура стенки определялась многоточечным измерением температуры поверхности по данным 12 термопар; по 6 штук на каждой стенке участка. В боковой стенке теплообменника располагаются отверстия для измерения статического давления, середине теплообменника, и перепада давления, около входа и выхода. Термоэлектрические модули Пельтье и выравнивающие температуру медные пластины обеспечивают охлаждение экспериментального теплообменника, рис. 1. Водные теплообменники обеспечивают охлаждение и термостабилизацию элементов Пельтье. Количество тепла снятого с элементов Пельтье определялось по расходу и изменению температуры охлаждающей воды. В ходе экспериментов среднеквадратичное отклонение средней температуры стенки для всех термопар не превосходило 0.1°C.

Карта режимов течения, приведенная в работе [8] показывает наличие в каналах микроструктурированного перфорированного теплообменника переходного течения с жидкими пробками, чередующегося переходного течения и течения жидкости в менисках в углах каналов с не смоченными ребрами теплообменника. На рис. 2 приведена зависимость теплоотдачи при конденсации от числа Рейнольдса пара, определенного по среднему паросодержанию теплообменнике *x*. Экспериментальные данные получены при средней температуре насыщения 24 °C. Данные представленные на рис. 2 показывают, что в рассмотренных условиях коэффициент теплоотдачи при конденсации слабо зависит от паросодержания (скорости пара) и массовой скорости при числе Рейнольдса пара менее 4000. В этих условиях пленочная конденсация пара на тонкой искривленной капиллярными силами пленке жидкости определяет теплоотдачу, что и было предложено ранее в [2]. Когда число Рейнольдса пара более 4000 увеличение скорости пара приводит к увеличению теплоотдачи. Уменьшение массовой скорости жидкости так же приводит к увеличению теплоотдачи.



Рис. 2. Зависимость числа Нусельта от числа Рейнольдса при конденсации пара для массовой скорости G = 30 и 40 кг/м<sup>2</sup>с

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации от среднего паросодержания в рабочем участке для массовой скорости G =  $30 \text{ кг/m}^2$ с. Коэффициент теплоотдачи мало изменяется в диапазоне паросодержаний от 0.05 до 0.6 и затем возрастает с ростом паросодержания. Линией на рис. 3 показан расчет коэффициента теплоотдачи в зависимости от массового паросодержания, выполненный по методике, предложенной в [9].

В расчетах было использовано уравнение для расчета толщины пленки жидкости в турбулентном потоке пара и коэффициента теплоотдачи. Для нахождения трения на межфазной поверхности применялся подход [10]. После проведения расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи, они усреднялись по длине рабочего участка. Как видно, предлагаемая методика расчета коэффициента теплоотдачи хорошо соответствует экспериментальным данным.

Предложенный подход для расчёта коэффициентов теплоотдачи, показывает хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента, и может быть использован для расчета теплообмена в промышленных конденсаторах и установках сжижения природного газа.



Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от массового паросодержания при конденсации для массовой скорости 30 кг/м<sup>2</sup>с. Точки соответствуют экспериментальным данным, линия соответствует расчету

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nakoryakov V. E. et al. Two-phase nonisothermal flows of LiBr water solution in minichannels //Journal of Engineering Thermophysics. -2014. -T. 23.  $-N_{\odot}$ . 4. -C. 257-263.

2.Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. 14 Int. Heat Transfer Conf. Washington: ASME. – 2010. – Keynote 22570.

3. Thome J. R., El Hajal J., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes //International Journal of Heat and Mass Transfer.  $-2003. - T. 46. - N_{\odot}$ . 18. - C. 3365-3387.

4. Cavallini A. et al. Condensation heat transfer and pressure gradient inside multiport minichannels //Heat transfer engineering.  $-2005. - T. 26. - N_{\odot}. 3. - C. 45-55.$ 

5. Kim S. M., Mudawar I. Flow condensation in parallel micro-channels–Part 2: Heat transfer results and correlation technique //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – T. 55. –  $N_{\odot}$ . 4. – C. 984-994.

6. Kim S. M., Mudawar I. Theoretical model for annular flow condensation in rectangular micro-channels //International Journal of Heat and Mass Transfer. -2012. -T. 55.  $-N_{\odot}$ . 4. -C. 958-970.

7. Al-Zaidi A. H., Mahmoud M. M., Karayiannis T. G. Condensation flow patterns and heat transfer in horizontal microchannels // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – T. 90. – C. 153-173.

8. Шамирзаев А. С., Кузнецов В. В. Теплофизические исследования процесса испарения жидкости при опускном течении в микроструктурированном теплообменнике // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 168–172.

9. Butterworth D. An analysis of film flow and its application to condensation in a horizontal tube // International Journal of Multiphase Flow.  $-1974. - T. 1. - N_{\odot}. 5. - C. 671-682.$ 

10. Asali J. C., Hanratty T. J., Andreussi P. Interfacial drag and film height for vertical annular flow //AIChE Journal.  $-1985. - T. 31. - N_{\odot}. 6. - C. 895-902.$ 

#### REFERENCES

1. Nakoryakov V. E. et al. (2014) Two-phase nonisothermal flows of LiBr water solution in minichannels, Journal of Engineering Thermophysics, 23(4), 257-263.

2.Kuznetsov V.V. (2010) Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale, Proc. 14 Int. Heat Transfer Conf. Washington: ASME. Keynote 22570.

3. Thome J. R., El Hajal J., Cavallini A. (2003) Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (18), 3365-3387.

4. Cavallini A. et al. (2005) Condensation heat transfer and pressure gradient inside multiport minichannels, Heat transfer engineering, 26(3), 45-55.

5. Kim S. M., Mudawar I.(2012) Flow condensation in parallel micro-channels–Part 2: Heat transfer results and correlation technique, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(4), 984-994.

6. Kim S. M., Mudawar I.(2012) Theoretical model for annular flow condensation in rectangular micro-channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(4), 958-970.

7. Al-Zaidi A. H., Mahmoud M. M., Karayiannis T. G. (2018) Condensation flow patterns and heat transfer in horizontal microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 90, 153-173.

8. Shamirzaev A.S., Kuznetsov V.V. (2017) Thermophysical study of phase change evaporation during downflow in microstuctured heat exchanger, Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2017 (pp. 168–172). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

9. Butterworth D. (1974) An analysis of film flow and its application to condensation in a horizontal tube, International Journal of Multiphase Flow, 1(5), 671-682.

10. Asali J. C., Hanratty T. J., Andreussi P. (1985) Interfacial drag and film height for vertical annular flow, AIChE Journal, 31(6), 895-902.

© А. С. Шамирзаев, В. В. Кузнецов, 2018

# ОСОБЕННОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА ПО ЕДИНИЧНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАСАДОК

#### Александр Николаевич Павленко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зав. лабораторией низкотемпературной теплофизики, тел. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

#### Антон Сергеевич Суртаев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: surtaevas@gmail.com

#### Владимир Сергеевич Сердюков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, инженер-исследователь, аспирант, тел. (383)330-87-00, e-mail: vsserd@gmail.com

#### Олег Александрович Володин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: volodin\_o@mail.ru

Дается краткий анализ результатов экспериментального исследования гидродинамики пленочного течения криогенной жидкости по поверхности единичных элементов структурированной насадки. На основе сравнения опытных данных показано влияние формы микротекстуры, диаметра отверстий, угла наклона больших ребер на зоны растекания пленки жидкости по корругированным поверхностям при различных значениях пленочного числа Рейнольдса.

**Ключевые слова:** стекающие пленки жидкости, степень орошения, смачивание, структурированные насадки, корругированные пластины, микротекстура, отверстия.

# FEATURES OF LIQUID NITROGEN FILM FLOW ON SINGLE ELEMENTS OF STRUCTURED PACKINGS

#### Aleksandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Corresponding Member of RAS, Head of Low Temperature Thermophysics Laboratory, phone: (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

#### Anton S. Surtaev

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-87-00, e-mail: surtaevas@gmail.com

## Vladimir S. Serdyukov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer-researcher, Ph. D. Student, phone: (383)330-87-00, e-mail: vsserd@gmail.com

#### Oleg A. Volodin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-87-00, e-mail: volodin@ngs.ru

The brief analysis of the results of an experimental study of the hydrodynamics of the film flow of a cryogenic liquid over the surface of single elements of a structured packing is given. On the basis of a comparison of the experimental data, the influence of the shape of the microtexture, the diameter of the holes, and the angle of inclination of the large ribs on the zones of spreading of the liquid film along the corrugated surfaces at different values of the Reynolds film number was shown.

Key words: flowing liquid films, irrigation degree, wetting, structured packings, corrugated plates, microtexture, holes.

Использование дистилляционных колонн со структурированными насадками в сравнении с тарельчатыми колоннами обеспечивает существенно меньшее гидравлическое сопротивление в расчете на единицу переноса, более высокие нагрузки по пару и жидкости, что значительно повышает производительность колонн и снижает затраты энергии на получение полезных продуктов. Однако регулярные насадки по сравнению с насыпными весьма чувствительны, например, по эффективности разделения смесей при дистилляции, к равномерности распределения жидкости по сечению [1]. Результаты исследований и эксплуатации промышленных ректификационных колонн с широко используемыми в настоящее время регулярными насадками показали, что эффективность разделения при увеличении их диаметра может значительно снижаться, что сказывается на производительности и чистоте готовой продукции. Это связано с существенным влиянием неравномерности распределений параметров потоков по сечению и высоте колонны, определяемой как начальными условиями орошения жидкости и ввода пара в насадку, так и внутренними процессами перераспределения потоков жидкости и пара при разделении смесей вследствие целого ряда факторов. Поэтому проблема интенсификации тепло - и массообмена в таких многоканальных системах, дальнейшее развитие оптимальных аппаратов насадочного типа являются чрезвычайно актуальными. Несмотря на широкое использование на практике данных режимов в контактных аппаратах, закономерности гидродинамики и тепломассообмена при таких течениях, выявление которых служит основой для разработки как конструктивных, так и технологических методов интенсификации процессов разделения смесей, исследованы весьма слабо. Исследования особенностей течения пленок различных жидкостей по структурным элементам регулярных насадок интенсивно развиваются в последнее время [2–7]. Строгое теоретическое исследование, моделирование таких течений и процессов весьма затруднительно и не является на сегодня решенной задачей в связи с чрезвычайно высокой сложностью их описания. Значительное влияние на эффективность разделения смесей, интенсивность тепломассообмена при пленочных течениях жидкостей и их смесей по структурированным поверхностям оказывают эффекты перераспределения жидкости, особенности эволюции волновых характеристик на свободной поверхности, динамика образования несмоченных зон. Существует лишь ограниченное число работ, посвященных исследованию гидродинамики при волновых пленочных течениях маловязких высокосмачивающих криогенных жидкостей. В тоже время исследования характеристик пленочного течения криогенных жидкостей по поверхностям сложной геометрии являются весьма актуальными, поскольку такие гидродинамические режимы реализуются в условиях дистилляции на структурированных насадках при криогенном разделении жидкого воздуха для получения чистых кислорода, азота, аргона и др. продуктов, в пленочных теплообменниках различного назначения.

Целью данной работы является экспериментальное изучение особенностей пленочного течения жидкого азота по различным единичным элементам структурированных насадок при изменении степени орошения. Исследования были проведены при использовании как одиночных корругированных пластин с различным углом наклона ребер, разной формой микротекстуры, так и на парных корругированных пластинах различной формы для изучения эффектов перераспределения жидкости, вследствие ее перетока через контактные точки.

Исследования были проведены на экспериментальной установке, принципиальная схема которой была детально описана в [8]. Опытные данные получены при течении жидкого азота, находящегося на линии насыщения, в диапазоне изменения пленочного числа Рейнольдса Re =  $4 \cdot \Gamma / v = 258-860$ . Здесь:  $\Gamma = q/l - q/l$ плотность орошения,  $m^2/c$ ; q – объемный расход жидкости,  $m^3/c$ ; l – периметр орошаемых каналов на верхнем срезе пластины, м; v – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с. Рабочая жидкость подается через криогенный трубопровод из гелиевого сосуда в бак постоянного уровня жидкости, размещенный во внутренней полости оптического криостата. Из бака постоянного уровня жидкость через щелевой распределитель поступает на рабочий участок и далее стекает в измерительные сосуды. Через четыре оптических окна выполнялась визуализация течения и макросъемка с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom 7.0 и специальных фотообъективов. В первой серии опытов исследования были проведены на одиночных пластинах при горизонтальном, вертикальном направлениях микротекстуры, с комбинированной микротекстурой (с периодическим по высоте пластины изменением ее направления). Во второй серии опытов исследования были проведены на парных плотно прижатых друг к другу корругированных пластинах различной формы.

На рисунке (*a*) представлено сравнение размеров зон смоченной поверхности для пластин с горизонтальной и комбинированной микротекстурами при минимальном и максимальном значениях степени орошения. Анализ полученных результатов показывает, что форма микротекстуры оказывает существенное влияние на характер пленочного течения жидкости и размер, форму зон ее растекания по поверхности пластин. Для пластины с комбинированной микротекстурой по сравнению с пластиной, имеющей горизонтальное направление микротекстуры, размер смоченных зон увеличивается при всех указанных значениях степени орошения.



Границы областей пленочного течения жидкого азота. Угол наклона гофр к горизонтали составлял 47 град. Орошение пяти каналов на верхнем срезе: *а*) диаметр отверстий 4.0 мм: 1, 2 – пластина с комбинированной микротекстурой, 1', 2' – с горизонтальной микротекстурой; *б*) пластины с комбинированной микротекстурой: 1, 2 – 4.0, 1', 2' – 2.3 мм. 1, 1' – q= 1.10<sup>-6</sup> м<sup>3</sup>/с (Re= 258); 2, 2' – 3.34.10<sup>-6</sup> (860), соответственно

В случае горизонтальной микротекстуры при наименьшем значении числа Рейнольдса (Re = 258) жидкость практически не перетекает через вершины каналов из орошаемых каналов в неорошаемую часть пластины. Пленочное течение жидкости в зонах с вертикальными каналами микротекстуры способствует более значительному ее перетоку через вершины крупных ребер, обеспечивая смачивание большей части поверхности пластины. Как видно из рисунке ( $\delta$ ), при малой степени орошения размер зон смоченной поверхности на корругированной пластине с диаметром отверстий 2.3 мм значительно больше, чем при диаметре отверстий 4.0 мм. При большей степени орошения нижние границы зон смачивания практически одинаковы для обеих пластин.

Таким образом, показано влияние формы микротекстуры, размера отверстий на характеристики течения, динамику и расположение зон разрыва пленки жидкости и возникновение устойчивых сухих пятен на гофрированной поверхности при различной степени орошения.

В опытах по изучению характера растекания жидкости в пакете, состоящем из двух корругированных пластин, показано, что наблюдаемое значительное перераспределение жидкости по ширине пакета с насадкой связано со значительным перетеканием жидкости через контактные точки. При этом, изменение ориентации микротекстуры с горизонтального направления на вертикальное, угла наклона ребер также приводит к существенному перераспределению локального расхода стекающей жидкости по ширине пакета. Показано, что характер данного перераспределения существенно зависит от степени орошения.

Полученные результаты важны как для разработки оптимальных форм структурированных поверхностей с целью интенсификации тепло-массообмена и повышения эффективности разделения смесей при дистилляции на структурированных насадках, так и для построения и верификации моделей описания процессов разделения смесей в данных условиях, учитывающих реальный характер пленочного течения жидкости в структурированных насадках различной геометрии.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pavlenko A. N, Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Chekhovich V. Yu., Volodin O. A., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE J. – 2014. – Vol. 60(2). – P. 690-705.

2. Janzen A., Steube J., Aferka S., Kenig E. Y., Crine M., Marchot P., Toye D. Investigation of liquid flow morphology inside a structured packing using X-ray tomography // Chemical Engineering Science. – 2013. – Vol. 102. – P. 451–460.

3. Oluji'ca Z., Rietfortb T., Jansenb H., Zich E. Performance characteristics of an intermediatearea high performance structured packing // Chemical Engineering Research and Design. -2015. - Vol. 99. - P. 14-19.

4. Li H., Wang F., Wang C., Gao X., Li X. Liquid flow behavior study in SiC foam corrugated sheet using a novel ultraviolet fluorescence technique coupled with CFD simulation // Chemical Engineering Science. – 2015. – Vol. 123. – P. 341–349.

5. Pavlenko A. N., Li X., Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Volodin O. A., Surtaev A.S., Gao X., Zhang L., Sui H., Li H. Effect of dynamically controlled irrigation of a structured packing on mixture separation efficiency // Journal of Engineering Thermophysics. – 2015. – Vol. 24(3). – P. 210–221.

6. Yao Y., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Effects of layers and holes on performance of wire mesh packing // Journal of Engineering Thermophysics. – 2015. – Vol. 24(3). – P. 222–236.

7. Лаптева Е. А., Лаптев А. Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен) / Под ред. Н.Н. Зиятдинова. – Казань: Печать – Сервис XXI век, 2015. – 236 с.

8. Павленко А. Н., Володин О. А., Сердюков В. С. Особенности пленочного течения азота по структурированным поверхностям // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10(1). – С. 33–41.

#### REFERENCES

1. Pavlenko A. N, Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Chekhovich V. Yu., Volodin O. A., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE J. -2014. -Vol. 60(2). -P. 690-705.

2. Janzen A., Steube J., Aferka S., Kenig E. Y., Crine M., Marchot P., Toye D. Investigation of liquid flow morphology inside a structured packing using X-ray tomography // Chemical Engineering Science. – 2013. – Vol. 102. – P. 451–460.

3. Oluji'ca Z., Rietfortb T., Jansenb H., Zich E. Performance characteristics of an intermediatearea high performance structured packing // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – Vol. 99. – P. 14–19.

4. Li H., Wang F., Wang C., Gao X., Li X. Liquid flow behavior study in SiC foam corrugated sheet using a novel ultraviolet fluorescence technique coupled with CFD simulation // Chemical Engineering Science. – 2015. – Vol. 123. – P. 341–349.

5. Pavlenko A. N., Li X., Zhukov V. E., Pecherkin N. I., Volodin O. A., Surtaev A.S., Gao X., Zhang L., Sui H., Li H. Effect of dynamically controlled irrigation of a structured packing on mixture separation efficiency // Journal of Engineering Thermophysics. – 2015. – Vol. 24(3). – P. 210–221.

6. Yao Y., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Effects of layers and holes on performance of wire mesh packing // Journal of Engineering Thermophysics. – 2015. – Vol. 24(3). – P. 222–236.

7. Lapteva, E. A., & Laptev, A. G. (2015) Applied aspects of transfer phenomena in devices of chemical technology and heat power engineering (hydro-mechanics and heat and mass transfer). Kazan: Service XXI century [in Russian].

8. Pavlenko A. N., Volodin O. A., & Serdukov V. S. (2015) Features of film flow of nitrogen on structured surfaces. [Bulletin of Novosibirsk state University], series: Physics. – 2015. – Vol. 10(1). – (pp. 33–41) [in Russian].

© А. Н. Павленко, А. С. Суртаев, В. С. Сердюков, О. А. Володин, 2018

## УДК 535.374:621.375.8

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КРИОГЕННОГО МУЛЬТИДИСКОВОГО УСИЛИТЕЛЯ С МОЩНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

## Виктор Валерьевич Петров

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. 330-98-36, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

## Глеб Владимирович Купцов

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, младший научный сотрудник, тел. 330-98-36, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

#### Алексей Викторович Лаптев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, младший научный сотрудник, тел. 330-98-36, e-mail: alex\_laptev@ngs.ru

#### Владимир Анатольевич Петров

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, младший научный сотрудник, тел. 330-98-36, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

#### Ефим Викторович Пестряков

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. 330-98-36, e-mail: pefvic@laser.nsc.ru

В Институте Лазерной Физики СО РАН разрабатывается фемтосекундная лазерная система с частотой повторения импульсов до 1 кГц, состоящая из задающего генератора импульсов и двух оптически синхронизованных каналов: канала параметрического усиления и канала лазерного усиления. При создании мощных лазерных систем особое внимание уделяется термооптическим искажениям в активных элементах. Реализована схема по измерению величины термической линзы при помощи датчика Шака-Хартмана в активных элементах криогенного мультидискового усилителя с мощной диодной накачкой в канале лазерного усиления. Определены критерии настройки экспозиции датчика волнового фронта и вклады расстроек оптической системы в ошибку измерения. Приведены результаты экспериментов по измерению величины термической линзы. Результаты экспериментов согласуются с теоретическим расчетом.

Ключевые слова: мощный лазер, лазерный усилитель, термическая линза, датчик волнового фронта, диодная накачка, криогенная температура.

# INVESTIGATION OF THERMO-OPTICAL DISTORTIONS IN ACTIVE MEDIA OF CRYOGENIC MULTIDISC DIODE-PUMPED AMPLIFIER

#### Victor V. Petrov

Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Ph. D., Senior Researcher, phone: 330-98-36, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

#### Gleb V. Kuptsov

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia; Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: 330-98-36, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

#### Alexei V. Laptev

Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: 330-98-36, e-mail: alex\_laptev@ngs.ru

#### Vladimir A. Petrov

Novosibirsk State Technical University, Pr. K. Marksa 20, Novosibirsk, 630073, Russia; Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: 330-98-36, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

#### Efim V. Pestryakov

Institute of Laser Physic SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: 330-98-36, e-mail: pefvic@laser.nsc.ru

In the Institute of laser physics of the Siberian Branch of RAS femtosecond laser system with pulse repetition rate up to 1 kHz is developed. It consists of a master oscillator and two optically synchronized parallel channels: parametric amplification channel and laser amplification channel. Design of high power laser systems gives significant attention to thermooptical distortions in active elements. The experimental thermal lens power measurement scheme based on Shack-Hartmann sensor in the active elements of cryogenic multidisk amplifier in the laser amplification channel is implemented. The multidisk amplifier is pumped with high power laser diodes. The criterion of exposure and gain tuning of the wavefront sensor is established. The optical system's detuning influence to measurement results is estimated. The results of experimental thermal lens power measurement at thermal lens power measurement at thermal lens power measurement at thermal lens power measurement and gain tuning influence to measurement results is estimated. The results of experimental thermal lens power measurements are given. The data is in a good agreement with the theoretical calculations.

Key words: high power laser, laser amplifier, thermal lens, wavefront sensor, diode pump, cryogenic temperature.

## Введение

Активно развивающимся направлением в лазерной физике является разработка и создание лазерных систем с высокой средней и пиковой мощностью на основе иттербиевых активных сред [1-4]. Такие системы находят широкое применение для накачки параметрических усилителей [5], а также для создания компактных источников когерентного излучения рентгеновского и гамма диапазонов [6], для генерации аттосекундного излучения с большим потоком и ускорения заряженных частиц [7].

В Институте Лазерной Физики СО РАН разрабатывается мощная фемтосекундная лазерная система, работающая с высокой частотой повторения импульсов до 1 кГц [8-11], состоящая из задающего генератора импульсов и двух оптически синхронизованных каналов: канала параметрического усиления чирпованных фемтосекундных импульсов на нелинейно-оптических кристаллах LBO/BBO и канала лазерного усиления на охлаждаемых до криогенных температур диодно-накачиваемых Yb-лазерных средах, излучение которого после частотного удвоителя формирует мощные импульсы для накачки параметрического усилителя. Канал накачки включает два диодно-накачиваемых многопроходных лазерных усилителя. Первый - шестипроходный Yb:YAG усилитель с водяным охлаждением наращивает энергию импульсов с 0,5 мДж до 15 мДж. Второй - 32-проходный Yb: YAG лазерный усилитель, активные элементы которого охлаждаются до криогенных температур при помощи безжидкостных гелиевых криостатов с замкнутым циклом, способный увеличивать энергию в импульсе до 300 мДж. Полная длина оптического пути внутри усилителя около 30 м. Суммарная средняя мощность диодной накачки составляет 800 Вт. Рабочая температура активных дисков криогенного усилителя при полной мощности накачки составляет 120 К [12].

При создании мощных лазерных систем особое внимание уделяется термооптическим искажениям в активных элементах [13-17], которые влияют на пространственный и фазовый профиль выходного излучения [18-20], а также стабильность оптической системы [21]. В представленной работе проведены экспериментальные данные по величине термической линзы в активных элементах криогенного мультидискового усилителя с мощной диодной накачкой.

# Эксперименты и обсуждение

Геометрический метод определения фокусного расстояния термической линзы, принцип которого состоит в определении изменения расходимости излучения тестового лазера, проходящего через активный элемент, а также метод расстройки лазерного резонатора [22] имеют ряд недостатков: низкую точность и отсутствие данных о фазовом профиле излучения.

Современными прецизионными методами, для регистрации фазовых искажений волнового фронта, позволяющими определить фокусное расстояние термической линзы, являются метод голографической интерферометрии [23] и метод, использующий датчик Шака-Хартмана [24].

Принцип работы датчика Шака-Хартмана состоит в следующем: излучение, поступающее на датчик, проходит через маску микролинз и далее фокусируется на матрицу цифровой камеры. По величине смещения пучков на матрице, с помощью специального алгоритма, основанного на разложении фазовых искажений по полиномам Цернике, восстанавливается его фазовый профиль.

Для отработки методики определения величины термической линзы в кристалле Yb:YAG (10 ат. % Yb) охлаждаемом до температуры 120 К, сначала были проведены эксперименты с тестовой линзой с известным фокусом. На рис. 1 представлена оптическая схема для определения фокусного расстояния тестовой линзы с помощью датчика волнового фронта Basler A601f.



Рис. 1. Оптическая схема по определению фокусного расстояния тестовой линзы с помощью датчика волнового фронта Basler A601f: *f* – тестовая линза; *f*<sub>1</sub> = 28 мм и *f*<sub>2</sub> = 627 мм линзы телескопа Галилея

Диаметр входной апертуры датчика составляет 4.5 мм, динамический диапазон по дефокусировке порядка 25 длин волн, что соответствует минимальному радиусу кривизны волнового фронта ~160 мм. Верхнее значение ограничено ошибкой измерения C[2,0] - коэффициента Цернике (~ $\lambda/20$ ), что соответствует радиусу кривизны волнового фронта ~ 40 м. В качестве источника излучения использовался непрерывный лазер Nd:YLF ( $\lambda = 1053$  нм).

Проводилось относительное измерение радиуса кривизны волнового фронта: сначала, при отсутствии тестовой линзы, записывался опорный фронт, который примерно соответствует плоскому, далее, перед телескопом помещалась тестовая линза и записывался тестовый фронт. Из выражения (1) следует, что фокусное расстояние помещаемой тестовой линзы определяется измеренным радиусом кривизны волнового фронта в фокальной плоскости телескопа и коэффициентом увеличения телескопа:

$$R_{u_{3M}} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \cdot f \tag{1}$$

Радиус кривизны волнового фронта рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{D^2}{16 \cdot C[2,0] \cdot \lambda} \tag{2}$$

где *D* – диаметр пучка, λ - длина волны, *C*[2,0] – коэффициент в разложении по полиномам Цернике, отвечающий за дефокусировку.

Величина ошибки в определении R с помощью сенсора волнового фронта Basler A601f составляет менее 1 мм. Основной вклад в ошибку определения фокусного расстояния тестовой линзы определяется точностью настройки расстояний между оптическими элементами. Для определения фокусного расстояния тестовой линзы с погрешностью менее 10 %, необходимо устанавливать расстояния в телескопе с точностью ~ 1 мм.

Восстановление волнового фронта происходит по полиномам Цернике. Установлено, что основной вклад в изменение волнового фронта вносит эффект дефокусировки.

В программном обеспечении для сенсора волнового фронта Basler A601f, отсутствует режим автоматической настройки параметров АЦП матрицы: времени экспозиции, коэффициента усиления и яркости. Яркость влияет на фоновый уровень. При произвольном выборе настроечных параметров ошибка определения радиуса кривизны волнового фронта для тестовой линзы достигала 100%. Для определения критерия настройки параметров АЦП матрицы было проведено компьютерное моделирование по сбору сигнала для гауссова пучка. На рис. 2 представлены промоделированные изображения с матрицы и гистограммы для гауссова пучка при различных коэффициентах усиления.



Рис. 2. Промоделированное изображения с матрицы (в левом верхнем углу) и гистограммы для гауссова пучка при различных коэффициентах усиления: *а*) 25; *б*) 30

Видно, что изображения с матрицы практически не различаются, но гистограммы имеют качественно разное распределение. Наличие большого количества пикселов, которые находятся в насыщении, приводит к большой ошибке при обработке данных эксперимента, т.к. алгоритм разложения по полиномам Цернике критически чувствителен к отношению интенсивностей. Для автоматизации процесса регулировки настроечных параметров было создано программное обеспечение, позволяющее в реальном времени получать гистограмму изображения с матрицы. На рис. 3 приведено экспериментально полученное изображение с датчика волнового фронта и гистограмма полученных данных с АЦП.



Рис. 3. Изображение с камеры Basler A601f и гистограмма данных с АЦП: по горизонтали - уровень сигнала, по вертикали - число пикселов в процентах

Для проверки критерия подбора настроечных параметров, при которых распределение гистограммы сигнала с матрицы сенсора волнового фронта соответствует распределению, приведенному на рис. 3, без смены тестовой линзы, было проведено несколько измерений для разных мощностей излучения, падающего на датчик. При этом относительная ошибка определения величины фокусного расстояния тестовой линзы составляет около 10%, что подтверждает правильность выбора критерия по регулировке настроечных параметров датчика.

На рис. 4 представлена схема эксперимента по определению величины термической линзы в кристалле Yb:YAG (10 ат. % Yb), охлаждаемом до температуры 120 К.



Рис. 4. Схема измерения величины термической линзы:

1 – пробный лазер Nd:YLF ( $\lambda$  = 1053 нм), 2 – вакуумная камера с охладителем, к которому присоединен медный куб с кристаллами Yb:YAG [1], 3 – поворотные зеркала, 4 – датчик волнового фронта Basler A601f;  $F_1$  и  $F_2$  - линзы телескопа

Зависимость фокусного расстояния термически наведенной линзы в кристалле Yb:YAG при охлаждении до температуры 120 К от поглощенной мощности накачки представлена на рис. 5.



Рис. 5. Фокусное расстояние термической линзы как функция поглощенной мощности накачки для кристалла Yb:YAG при температуре 120 К

Из рис. 5 следует, что при средней мощности накачки в диапазоне (50÷100) Вт фокусное расстояние термической линзы находится в интервале (20÷10) м.

# Заключение

Реализована экспериментальная схема по измерению фокусного расстояния термической линзы в активном элементе Yb:YAG, охлаждаемом до температуры 120 К, при мощной диодной накачке. Для уровня накачки (50÷100) Вт фокусное расстояние образуемой линзы составило (20÷10) м, что согласуется с теоретическим расчетом. Измерение фазового профиля осуществлялось методом Шака-Хартмана. Определено, что основной вклад в изменение волнового фронта вносит эффект дефокусировки. Полученные данные будут использованы для оптимизации энергетических, пространственных и фазовых параметров излучения мультидискового лазерного усилителя.

Работа поддержана программами Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» и СО РАН.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown D.C., Tornegard S., Kolis J. Cryogenic nanosecond and picosecond high average and peak power (HAPP) pump lasers for ultrafast applications // High Power Laser Science and Engineering. – 2016. – Vol. 4(e15). – PP. 1-31. https://doi.org/10.1017/hpl.2016.12.

2. Puppin M. [et al.] 500 kHz OPCPA delivering tunable sub-20 fs pulses with 15 W average power based on an all-ytterbium laser // Optics Express. – 2015. – Vol. 23(2). – PP. 1491-1497. https://doi.org/10.1364/OE.23.001491.

3. Baumgarten C. [et al.] 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41(14). – PP. 3339-3342.

4. Zapata L.E, Reichert F., Hemmer M., Kartner F.X. 250 W average power, 100 kHz repetition rate cryogenic Yb:YAG amplifier for OPCPA pumping // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41(3). – PP. 492-495.

5. Emaury F., Diebold A., Saraceno C.J., Keller U. Compact extreme ultraviolet source at megahertz pulse repetition rate with a low-noise ultrafast thin-disk laser oscillator // Optica. – 2015. – Vol. 2(11). – PP. 980-984. https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000980.

6. Chvykov V. [et al.] High peak and average power Ti:sapphire thin disk amplifier with extraction during pumping // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41(13). – PP. 3017-3020. https://doi.org/10.1364/OL.41.003017.

7. Wu Y. [et al.] Generation of high-flux attosecond extreme ultraviolet continuum with a 10 TW laser // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 102. – P. 201104. https://doi.org/10.1063/1.4807395.

8. Petrov V. V., Pestryakov E. V., Laptev A. V., Petrov V. A., Kuptsov G. V., Trunov V. I., Frolov S. A. Multiterawatt femtosecond laser system with kilohertz pulse repetition rate // Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 44(5). – PP. 452-457. http://dx.doi.org/10.1070/QE2014v044n05ABEH015438.

9. Kuptsov G.V., Petrov V.V., Petrov V.A., Laptev A.V., Pestryakov E.V. The modeling of supercontinuum generation in photonic-crystal fibre in the spectral broadening unit of high-intensity laser system // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9810. – PP. 98101S-1-98101S-6. doi: 10.1117/12.2228451.

10. Kuptsov G.V., Petrov V.V., Laptev A.V., Petrov V.A., Pestryakov E.V. Simulation of picosecond pulse propagation in fibre-based radiation shaping units // Quantum Electronics. – 2016. – Vol. 46(9). – PP. 801-805.

11. Petrov V.A., Kuptsov G.V., Petrov V.V., Kirpichnikov A.V., Laptev A.V., Pestryakov E.V The modeling of thermal fields in high power multi-disk cryogenic laser amplifier // AIP Conf. Proc. – 2017. – Vol. 1893. – P. 030121-5. https://doi.org/10.1063/1.5007579.

12. Kuptsov G.V., Petrov V.V., Petrov V.A., Laptev A.V., Kirpichnikov A.V., Pestryakov E.V. The multidisk diode-pumped high power Yb:YAG laser amplifier of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate // JPCS. – 2018 *(in press )*.

13. Kwon G. P., Lee J. Self-adaptive thermal-lensing compensation for a high-power laser // Journal of the Korean Physical Society. – 2016. – Vol. 69(10). – PP. 1531-1536. doi: 10.3938/jkps.69.1531.

14. Kim M., Kwon G.P., Lee J. Fully analytic approach to evaluate laser-induced thermal effects // Current Optics and Photonics. – 2017. – Vol. 1(6). – PP. 649-654. https://doi.org/10.3807/COPP.2017.1.6.649.

15. Nagisetty S.S. [et al.] Lasing and thermal characteristics of Yb:YAG/YAG composite with atomic diffusion bonding // Laser Phys. Lett. – 2017. – Vol. 14(1). – PP. 015001-015006.

16. Isidro-Ojeda M. A., Alvarado-Gil J. J., Zanuto V. S., Baesso M. L., Astrath N. G.C., Malacarne L. C. Laser induced wavefront distortion in thick-disk material: an analytical description // Optical Materials. – 2018. – Vol. 75. – PP. 574-579. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.11.015.

17. El-Daher M.S. Finite Element Analysis of Thermal Effects in Diode End-Pumped Solid-State Lasers // Advances in Optical Technologies. – 2017. – Vol. 2017. – PP. 1-15.

18. Waritanant T., Major A. Thermal lensing in Nd:YVO<sub>4</sub> laser with in-band pumping at 914 nm // Appl. Phys. B. – 2016. – Vol. 122(135). – PP. 1-4. doi 10.1007/s00340-016-6417-9.

19. Mahdieh M. H., M. Jafarabadi A., Ahmadinejad E. Thermal lens effect induced by high power diode laser beam in liquid ethanol and its influence on a probe laser beam quality // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9255. – PP. 925531-1 - 925531-7. doi: 10.1117/12.2065656.

20. Nadimi M., Waritanant T., Major A. High power and beam quality continuous-wave Nd:GdVO4 laser in-band diode-pumped at 912 nm // Photonics Research. – 2017. – Vol. 5(4). – PP. 346-349. https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000346.

21. Kim D.L., Kim B.-T. Laser output power losses in ceramic Nd:YAG lasers due to thermal effects // Optik. – 2016. – Vol. 127. – PP. 9738-9742. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.07.068.

22. Ozygusa B., Zhang Q. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers using primary degeneration modes // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 71(18). – PP. 2590-2592.

23. Di J., Yu Y., Wang Z., Qu W, Yuen C. C., Zhao J. Quantitative measurement of thermal lensing in diode-side-pumped Nd:YAG laser by use of digital holographic interferometry // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(25). – PP. 28185-28193. http://dx.doi.org/10.1364/OE.24.028185.

24. Bell T., Naidoo D., Ngcobo S., Forbes A. Thermal lensing measurement from the coefficient of defocus aberration using Shack-Hartmann wavefront sensor // Proc. of SPIE. – 2017. – Vol. 9727. – PP. 9727 L-1-8. doi:10.1117/12.2205141.

#### REFERENCES

1. Brown, D.C., Tornegard, S. & Kolis, J. (2016). Cryogenic nanosecond and picosecond high average and peak power (HAPP) pump lasers for ultrafast applications. High Power Laser Science and Engineering, 4, e15. 1-31. https://doi.org/10.1017/hpl.2016.12.

2. Puppin, M., Deng, Y., Prochnow, O., Ahrens, J., Binhammer, T., Morgner, U., ... Ernstorfer, R. (2015). 500 kHz OPCPA delivering tunable sub-20 fs pulses with 15 W average power based on an all-ytterbium laser. Optics Express, 23(2), 1491-1497. https://doi.org/10.1364/OE.23.001491.

3. Baumgarten, C., Pedicone, M., Bravo, H., Wang, H., Yin, .L, Menoni, C.S., ... Reagan, B.A. (2016). 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser. Optics Letters, 41(14), 3339-3342.

4. Zapata, L.E, Reichert, F., Hemmer, M., & Kartner, F.X. (2016). 250 W average power, 100 kHz repetition rate cryogenic Yb:YAG amplifier for OPCPA pumping. Optics Letters, 41(3), 492-495.

5. Emaury, F., Diebold, A., Saraceno, C. J., & Keller, U. (2015). Compact extreme ultraviolet source at megahertz pulse repetition rate with a low-noise ultrafast thin-disk laser oscillator. Optica, 2(11), 980-984. https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000980.

6. Chvykov, V., Cao, H., Nagymihaly, R., Kalashnikov, M. P., Khodakovskiy, N., Glassock, ... Osvay, K. (2016). High peak and average power Ti:sapphire thin disk amplifier with extraction during pumping. Optics Letters, 41(13), 3017-3020. https://doi.org/10.1364/OL.41.003017.

7. Wu, Y., Cunningham, E., Zang, H., Li, J., Chini, M., Wang, X., ... Chang, Z. (2013). Generation of high-flux attosecond extreme ultraviolet continuum with a 10 TW laser. Appl. Phys. Lett., 102, 201104 -1-4. https://doi.org/10.1063/1.4807395.

8. Petrov, V. V., Pestryakov, E. V., Laptev, A. V., Petrov, V. A., Kuptsov, G. V., Trunov, V. I., & Frolov, S. A. (2014). Multiterawatt femtosecond laser system with kilohertz pulse repetition rate. Quantum Electronics, 44(5), 452-457. http://dx.doi.org/10.1070/QE2014v044n05ABEH015438.

9. Kuptsov, G.V., Petrov, V.V., Petrov, V.A., Laptev, A.V., & Pestryakov, E.V. (2015). The modeling of supercontinuum generation in photonic-crystal fibre in the spectral broadening unit of high-intensity laser system. Proc. of SPIE, 9810, 98101S-1-6. doi: 10.1117/12.2228451.

10. Kuptsov, G.V., Petrov, V.V., Laptev, A.V., Petrov, V.A., & Pestryakov, E.V. (2016). Simulation of picosecond pulse propagation in fibre-based radiation shaping units," Quantum Electronics, 46, 801-805.

11. Petrov, V.A., Kuptsov, G.V., Petrov, V.V., Kirpichnikov, A.V., Laptev, A.V., & Pestryakov, E.V. (2017). The modeling of thermal fields in high power multi-disk cryogenic laser amplifier. AIP Conf. Proc., 1893, 030121-5. https://doi.org/10.1063/1.5007579.

12. Kuptsov, G.V., Petrov, V.V., Petrov, V.A., Laptev, A.V., Kirpichnikov, A.V., & Pestryakov, E.V. (2018 in press). The multidisk diode-pumped high power Yb:YAG laser amplifier of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate. JPCS.

13. Kwon, G. P., & Lee, J. (2016). Self-adaptive thermal-lensing compensation for a high-power laser. Journal of the Korean Physical Society, 69(10), 1531-1536. doi: 10.3938/jkps.69.1531.

14. Kim, M., Kwon, G. P., & Lee, J. (2017). Fully analytic approach to evaluate laser-induced thermal effects. Current Optics and Photonics, 1(6), 649-654. https://doi.org/10.3807/COPP.2017.1.6.649.

15. Nagisetty, S. S., Severova, P., Miura, T., Smrž, M., Kon, H., Uomoto, M., ... Mocek, T. (2017). Lasing and thermal characteristics of Yb:YAG/YAG composite with atomic diffusion bonding. Laser Phys. Lett., 14(1), 015001-015006.

16. Isidro-Ojeda, M. A., Alvarado-Gil, J. J., Zanuto, V. S., Baesso, M. L., Astrath, N. G.C., & Malacarne, L. C. (2018). Laser induced wavefront distortion in thick-disk material: an analytical description. Optical Materials, 75, 574-579. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.11.015.

17. El-Daher, M.S. (2017) Finite Element Analysis of Thermal Effects in Diode End-Pumped Solid-State Lasers. Advances in Optical Technologies, 2017, 1-15.

18. Waritanant, T., & Major, A. (2016). Thermal lensing in Nd:YVO<sub>4</sub> laser with in-band pumping at 914 nm. Appl. Phys. B, 122:135, 1-4. doi 10.1007/s00340-016-6417-9.

19. Mahdieh, M. H., M. Jafarabadi, A., & Ahmadinejad, E. (2015) Thermal lens effect induced by high power diode laser beam in liquid ethanol and its influence on a probe laser beam quality. Proc. of SPIE, 9255, 925531-1 - 925531-7. doi: 10.1117/12.2065656.

20. Nadimi M, Waritanant, T., & Major A. (2017). High power and beam quality continuouswave Nd:GdVO4 laser in-band diode-pumped at 912 nm. Photonics Research, 5(4), 346-349. https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000346.

21. Kim, D. L., & Kim, B.-T. (2016). Laser output power losses in ceramic Nd:YAG lasers due to thermal effects. Optik, 127, 9738-9742. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.07.068.

22. Ozygusa, B., & Zhang, Q. (1997) Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers using primary degeneration modes. Appl. Phys. Lett., 71(18), 2590-2592.

23. Di, J., Yu, Y., Wang, Z., Qu, W, Yuen C. C., & Zhao, J. (2016). Quantitative measurement of thermal lensing in diode-side-pumped Nd:YAG laser by use of digital holographic interferometry. Optics Express, 24(25), 28185-28193. http://dx.doi.org/10.1364/OE.24.028185.

24. Bell, T., Naidoo, D., Ngcobo, S., & Forbes, A. (2017). Thermal lensing measurement from the coefficient of defocus aberration using Shack-Hartmann wavefront sensor. Proc. of SPIE, 9727, 9727 L-1-8. doi:10.1117/12.2205141.

© В. В. Петров, Г. В. Купцов, А. В. Лаптев, В. А. Петров, Е. В. Пестряков, 2018

# ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛООБМЕН СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ КИПЕНИИ И ИСПАРЕНИИ В ТОНКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ

## Владимир Иванович Жуков

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химической технологии, тел. (383)346-08-01, e-mail: vizh@inbox.ru

## Дмитрий Анатольевич Швецов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, механико-технологический факультет, тел. (383)346-08-01, e-mail: shvetsov.kh301@ya.ru

# Александр Николаевич Павленко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зав. лабораторией низкотемпературной теплофизики, тел. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

Выполнен анализ влияния на теплообмен структур, образующихся при испарении и кипении в горизонтальном тонком слое жидкости (н–додекана). В слоях выше капиллярной постоянной при низком давлении под действием реактивной силы фазового перехода образовывались структуры в форме "воронок" и "кратеров". При повышении давления возникало пузырьковое кипение. Визуализация структур осуществлялась высокоскоростной видеосъемкой. Присутствие структур в форме "воронок" и "кратеров" при низком приведенном давлении увеличивает коэффициент теплоотдачи примерно на 70% по сравнению с пузырьковым кипением при более высоком приведенном давлении.

Ключевые слова: тонкий слой жидкости, реактивная сила фазового перехода, критический тепловой поток, интенсификация теплообмена, коэффициент теплоотдачи.

# EFFECT ON HEAT TRANSFER OF STRUCTURAL FORMATION DURING BOILING AND EVAPORATION IN THIN HORIZONTAL LAYERS OF LIQUID

## Vladimir I. Zhukov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department Chemistry and Chemical Technologies, phone: (383)346-08-01, e-mail: vizh@inbox.ru

## **Dmitry** A. Shvetsov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies, phone: (383)346-08-01, e-mail: shvetsov.kh301@ya.ru

## Aleksandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Corresponding Member of RAS, Head of Low Temperature Thermophysics Laboratory, phone: (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru The effect on the heat transfer of structures formed during evaporation and boiling in a horizontal thin liquid layer of n-dodecane is analyzed. The structures in the shape of "funnels" and "craters" tend to form at low pressure in the films beyond the capillary constant limit while being induced by the vapor recoil force. The rise in pressure leads to bubble boiling. Visualization of structures was carried out by high-speed video. The presence of structures in the form of "funnels" and "craters" at a low reduced pressure increases the heat transfer coefficient by about 70% compared to bubble boiling at a higher reduced pressure.

Key words: thin layer of liquid, vapor recoil force, critical heat flux, enhanced heat transfer, heat transfer coefficient.

Тонкие пленки применяются для охлаждения поверхностей нагрева, когда необходимо обеспечить отвод высоких плотностей теплового потока при малых температурных напорах. Для понижения температуры охлаждаемых поверхностей используют низкое давление. При низком приведенном давлении существенно снижаются критические тепловые потоки, которые ограничивают сверху область рабочих тепловых потоков. К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал, обобщенный в [1], где показано, что при кипении жидкости в большом объеме при низких приведенных давлениях критические тепловые потоки значительно выше, чем расчет по формуле Кутателадзе [2]. В [3] исследовался теплообмен и критические тепловые потоки к тонкому горизонтальному слою вакуумного масла при пониженном давлении. Показано, что плотность критического теплового потока увеличивается в узком диапазоне изменения высоты слоя более чем на порядок и в слоях выше капиллярной постоянной его величина может быть на порядок больше, чем расчет по формуле Кутателадзе [2]. В слоях с толщиной больше капиллярной постоянной температурный напор слабо зависит от плотности теплового потока. В [4] представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и высокоскоростной видеосъемки процессов испарения и кипения в горизонтальных пленках жидкости при изменении в широких диапазонах высоты слоя и давления. При низких приведенных давлениях реализовывались режимы испарения, когда в слоях образуются сухие пятна и структуры в форме "воронок" (углубления на поверхности слоя с полусферическим днищем) и "кратеров". Поверхность "кратеров", в отличие от сухих пятен, покрыта остаточным слоем жидкости. Построены карты режимов, в которых для каждой высоты слоя в зависимости от приведенного давления и плотности теплового потока определены области, где наблюдались сухие пятна, "воронки", "кратеры", пузырьковое кипение. Из выполненных в [4] расчетов по модернизированной модели [5] следует, что в области низких приведенных давлений формула Кутателадзе описывает в слоях с высотой равной капиллярной постоянной и выше смену гидродинамического режима, когда в слое присутствуют "воронки" и "кратеры", режимом, когда в слое остаются только "кратеры". В данной работе приводятся результаты исследования теплообмена в слоях н-додекана при пониженном давлении, а также некоторые результаты визуализации характерных структур с помощью высокоскоростной видеосъемки.

Исследования проводились на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в [3, 4]. Рабочая камера представляет собой цилиндрический сосуд из стали 12X18H10T с внутренним диаметром 120 мм, высотой 300 мм и толщиной стенок 1 мм. На наружной поверхности верхней части расположен змеевик охлаждения. В нижней части к днищу установки крепился электронагреватель. Установка оснащена смотровыми окнами, через которые велась видеозапись процессов кипения и испарения слоя жидкости. Для фиксации результатов наблюдений применялась видеокамера, позволяющая снимать видео с частотой 240 кадр/с. Температура измерялась термопарами. Давление в рабочей камере измерялось деформационно-ионизационным датчиком вакуума и поддерживалось постоянным регулировкой с помощью натекателя и вентиля. Погрешность измерения давления ±0.3% от текущего значения. В качестве рабочей жидкости использовался н-додекан. В экспериментах получали кривые кипения при постоянном значении давления. Основная часть экспериментов проводилась при давлениях над слоем  $P(P/P_{cr})$ : 33 (1.8·10<sup>-5</sup>), 67 (3.7·10<sup>-5</sup>), 133 (7.4·10<sup>-5</sup>), 10<sup>3</sup> (5.5·10<sup>-4</sup>), 10<sup>4</sup> (5.5·10<sup>-3</sup>), 2·10<sup>4</sup> (0.011). Высота слоя, при которой проводились эксперименты, была примерно равна капиллярной постоянной ( $l_{\sigma} = 1.78$  мм) или выше:  $h(h/l_{\sigma})$ : 1.7 (0.99), 2.5 (1.45), 4 (2.32), здесь h – высота слоя, мм;  $(h/l_{\sigma})$  – безразмерная высота слоя.

При низких давлениях (33–10<sup>3</sup> Па) пузырьковое кипение отсутствовало. Теплообмен осуществлялся за счет интенсивного испарения с верхнего слоя жидкости при образовании в нем, под действием реактивной силы фазового перехода, структур в форме "воронок" и "кратеров" (рис. 1).



Рис. 1. Фотографии структур, наблюдавшихся в слоях н-додекана: *a*) «воронки» h = 4,0 мм; давление в объеме  $P_s = 67$  Па, q = 9070 Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta$ ) «кратеры» h = 2,5 мм, давление в объеме  $P_s = 133$  Па, q = 8000 Вт/м<sup>2</sup>

"Кратеры" обычно образовывались на месте массива "воронок". "Кратеры" имеют в центре протяженный плоский остаточный слой жидкости конечных размеров, покрытый в данном случае капельками жидкости (рис. 1,  $\delta$ ). При низких тепловых потоках наблюдались "воронки" и "кратеры", при высоких тепловых потоках – "кратеры". При давлении 10<sup>4</sup> Па и выше во всех слоях наблюдалось пузырьковое кипение. Подробные карты гидродинамических режимов кипения и испарения, на которых в зависимости от приведенного давления и теплового потока для разных высот слоя показаны области существования различных структур, приведены в [4].

На рис. 2 приведено сравнение коэффициентов теплоотдачи для слоев с высотой порядка капиллярной постоянной жидкости и выше при двух значениях давления. Не закрашенными символами обозначены результаты соответствующие давлению над слоем  $P_s = 133$  Па, когда в слое присутствуют "воронки" и "кратеры", закрашенные символы соответствуют давлению над слоем  $P_s = 10^4$  Па, когда в слое наблюдалось пузырьковое кипение. Линиями 1 и 2 показан расчет по формуле Кутателадзе [2]:

$$q_{cr} = 0.16h_{LG}\sqrt{\rho_v \sqrt[4]{g(\rho_l - \rho_v)\sigma}}$$



Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока. 1, 2 – расчет по (1) для давлений насыщения над слоем  $P_s = 133$  Па,  $(P_s/P_{cr}) = 7.4 \cdot 10^{-5}$  и  $P_s = 10^4$  Па,  $(P_s/P_{cr}) = 5.5 \cdot 10^{-3}$ , соответственно

Из данных, представленных на рис. 2, следует, что появление в слое жидкости "воронок" и "кратеров" при приведенном давлении  $(P_s/P_{cr}) = 7.4 \cdot 10^{-5}$ , позволяет увеличить коэффициенты теплоотдачи для тонких слоев жидкости высотой порядка капиллярной постоянной примерно на 70% по сравнению с режимами, когда в слоях той же высоты происходит пузырьковое кипение при приведенном давлении ( $P_s/P_{cr}$ ) = 5.5  $\cdot$  10<sup>-3</sup>. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока при пузырьковом кипении в данном случае описывается уравнением  $\alpha \sim q^{0.92}$ . Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока при давлении 133 Па  $(P_s/P_{cr}) = 7.4 \cdot 10^{-5}$ , когда в слое присутствуют "воронки" и "кратеры", описывается уравнением  $\alpha \sim q^{0.86}$ . Более низкий показатель степени в этом случае, связан с тем, что на кривой зависимости (рис. 2) имеется легкий излом. Наличие излома связано со сменой режима испарения при тепловых потоках  $q > 1.8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> (расчет по (1)), когда в слое перестают образовываться "воронки" и остаются только "кратеры" [4, 5]. Показатели степени  $n \sim 0.86-0.92$  в зависимости  $\alpha \sim q^n$  типичны для процессов кипения и испарения жидкости в тонких пленках и характеризуют слабую зависимость плотности теплового потока q от температурного напора  $(T_w - T_s)$ .

Таким образом, в данной работе показано, что изменение механизма теплоотдачи, вызванное при понижении давления появлением в тонком слое жидкости структур в форме "воронок" и "кратеров", приводит к интенсификации теплообмена примерно на 70% по сравнению с пузырьковым режимом кипения.

Обозначения:

g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_{LG}$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; n – показатель степени; P,  $P_s$ ,  $P_{cr}$  – давление, давление насыщения над слоем, критическое давление, соответственно, Па; q – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_w$ ,  $T_s$  – температура поверхности нагрева и температура насыщения, соответственно, К;  $\alpha = q/(T_w - T_s)$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\rho_v$ ,  $\rho_l$  – плотность пара и жидкости, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14–49–00010).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yagov V.V. Is a crisis in pool boiling actually a hydrodynamic phenomenon? // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 73. – P. 265-273.

2. Кутателадзе С.С. Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // ЖТФ. – 1950. – Т. 20. № 11. – С. 1389–1392.

3. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Nagaitseva Yu.V., Weiss D. Effect of the layer height on heat transfer and the critical heat flux in evaporation of a fluid under low pressures // High Temperature. – 2015. - Vol. 53 (5). - P. 690-696.

4. Zhukov V.I., Pavlenko A. N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Int. J. Heat and Mass Transfer. -2018. - Vol. 117. - P. 978–990.

5. Zhukov V.I., Pavlenko A. N. Critical Phenomena at Evaporation in a Thin Liquid Layer at Reduced Pressures // J. Eng. Thermophys. – 2013. – Vol. 22 (4). – P. 257-287.

#### REFERENCES

1. Yagov, V.V. (2014). Is a crisis in pool boiling actually a hydrodynamic phenomenon? Int. J. Heat and Mass Transfer, 73, 265-273. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.076

2. Kutateladze, S.S. (1950). Hydrodynamic model of heat transfer crisis in free-convection boiling. Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki [Zh. Tekh. Fiz.], 20(11), 1389–1392. [in Russian]

3. Zhukov, V.I., Pavlenko, A.N., Nagaitseva, Yu.V., & Weiss, D. (2015). Effect of the layer height on heat transfer and the critical heat flux in evaporation of a fluid under low pressures. High Temperature, 53(5), 690-696. doi: 10.1134/S0018151X15050284

4. Zhukov, V.I., & Pavlenko, A. N. (2018). Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures. Int. J. Heat and Mass Transfer, 117, 978–990. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.060

5. Zhukov, V.I., & Pavlenko, A. N. (2013). Critical Phenomena at Evaporation in a Thin Liquid Layer at Reduced Pressures. J. Eng. Thermophys., 22(4), 257-287. doi: 10.1134/S1810232813040012.

© В. И. Жуков, Д. А. Швецов, А. Н. Павленко, 2018

# КАПИЛЛЯРНО-ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АППАРАТАХ С БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

#### Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделом, тел. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

#### Алишер Сезгирович Шамирзаев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)316-5731, e-mail: alisham@ngs.ru

Обсуждены основные закономерности развития капиллярно-гравитационной неустойчивости при противоточном газожидкостном течении в сложных канальных системах микроструктурированных аппаратов. Определены критические скорости газа, при которых нарушается равномерность течения жидкости, и возникают крупномасштабные структуры.

**Ключевые слова:** микроструктурированный аппарат, газожидкостное течение, конвективные течения, капиллярно-гравитационное захлебывание.

# MULTISCALE GAS-LIQUID FLOW SELF-ORGANIZATION IN MICROSTRUCTURED APPARATUS WITH HIGH CAPACITY

#### Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Head of Laboratory of Multiphase Systems, phone: (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

#### Alisher S. Shamirzaev

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)316-57-31, e-mail: alisham@ngs.ru

The main regularities of the development of capillary-gravity instability in the counter-current gas-liquid flow in complex channel systems of microstructured apparatuses are discussed. Critical gas velocities are determined at which the uniformity of the fluid flow is disturbed and large-scale structures appear.

Key words: microstructured apparatus, gas-liquid flow, convective flows, capillary-gravity flooding.

Одной из важнейших причин, снижающих эффективность разделения смеси газов в двухфазных микроструктурированных аппаратах большой производительности является возникновение неоднородности концентраций компонент [1]. В данной работе рассмотрены закономерности локального распределения фаз в поперечном сечении элемента ректификационной колонны, заполненной структурной насадкой, при противоточном газожидкостном течении, изучено влия-

ние конвективных течений и гравитационно-капиллярного захлебывания на эффективность разделения смеси газов.

Экспериментальные исследования капиллярно-гравитационного захлебывания были проведены для многослойной насадки Mellapak 500Y в практически реализуемом при дистилляции диапазоне параметров течения. Эксперименты проводились, используя прямоугольную колонну с поперечными размерами 800 и 400 мм. Колонна заполнена девятью слоями насадки с девятью листами в каждом слое. При проведении экспериментов, рабочая жидкость подогревается до нужной температуры и закачивается насосом в верхнюю часть колонны, где расположен распределитель жидкости. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода с добавкой поверхностно-активного вещества и антивспенивателя, подогретая до температуры 24-26 градусов. Воздух поступает в нижнюю часть колонны, где расположен распределитель газа – безпровальная решетка, имеющая 1650 отверстий диаметром 2.2 мм. Суммарный расход жидкости измеряется турбинным датчиком расхода, температуры жидкости и газа измеряются в термопарами, расположенными в нижней части колонны. Коэффициент поверхностного натяжения измеряется методом взвешивания капли для пробы жидкости, отобранной в нижней части колонны, и равен примерно 0.03 Н/м (коэффициент поверхностного натяжения σ зависит от концентрации ПАВ и температуры жидкости). Измерения локальных расходов жидкости в нижней части колонны производились измерительными кюветами.

На основе проведенных экспериментов выявлены закономерности течения жидкости по поверхности структурной насадке при различных расходных характеристиках жидкости. На рис. 1 приведено изменение локального расхода жидкости по ширине колонны после 9-ти слоёв насадки Mellapak 500Y, отнесённое к среднему расходу, для различных массовых расходов жидкости. Как видно, течение жидкости в колонне сопровождается повышенным расходом в области насадки вблизи стенки колонны, способствующим накоплению жидкости в этой области.

Для установления критической скорости газа, при которой возникает капиллярно-гравитационное захлебывание, проведены измерения перепадов давления для равномерного орошения жидкостью верхнего слоя насадки при различных отношениях мольных расходов жидкости и газа. Установлено, что при  $k_v > 0,066$ , где  $k_v = U_{gas} \sqrt{\rho_{gas}} / (\rho_{liq} - \rho_{gas})$ , происходит расслоение данных по перепадам давления для различного отношения расходов жидкости и газа, и наблюдается увеличение темпа роста перепада давления при увеличении расхода газа. Скоростная видеосъемка и лазерное сканирование показали, что причиной роста перепада давления является последовательное затопление слоев насадки, которое начинается в нижней части колонны и распространяется на всю колонну. Накопление жидкости в слоях насадки вызывает ее неравномерное стекание и макроскопические неоднородности в потоках жидкости и газа. При увеличении скорости газа, капиллярно-гравитационное захлебывание возникает в нижней части вышележащих слоев насадки и распространяется на всю колонну,
приводя к росту фактора трения после его минимума, что было использовано для определения условий захлебывания. Скоростная видеосъемка процесса захлебывания при подсветке лазерным ножом показала, что при скоростях газа, соответствующих перегибу в факторе трения, происходит накопление жидкости над верхним срезом слоя насадки и стекание жидкости вниз становится нерегулярным. Развитие капиллярно-гравитационной неустойчивости наблюдается при  $k_v > 0,07$  и зависит от отношения мольных расходов жидкости и газа L/V.



Рис. 1. Изменение локального расхода жидкости по ширине колонны с насадкой

Для обобщения полученных данных развита физическая модель захлебывания при противоточном течении газа и жидкости в колонне со структурированной насадкой, основанная на механизме капиллярно-гравитационной неустойчивости слоя жидкости в поле силы тяжести. Модель основана на подходе С. С. Кутателадзе и Ю.Л. Сорокина [2] в котором использованы уравнения, определяющие наступление критических режимов захлебывания в трубах при встречном течении жидкости и газа. Учитывая геометрические особенности течения газа в каналах структурной насадки, предложено обобщающее уравнение в координатах Кутателадзе-Сорокина *K* и *N* для нахождения параметров потока, при которых наступает взвешивание слоя жидкости при восходящем потоке газа в виде:

$$K = \frac{k_V}{\varepsilon (\cos\theta/2)^{1.25} \sqrt{\delta_c g}}$$
(1)

$$N = \frac{cL\delta_c}{4D_h\sqrt{gD_h}\cos^2\theta/2}\sqrt{\frac{(\rho_{liq}-\rho_{gas})}{\rho_L}} \left(1 + \frac{31}{Ga^{0.55}(\cos\theta/2)^{0.55}}\right)$$
(2)

где  $\Theta$  угол между направлением каналов в листах насадки,  $\delta_c = \sqrt{2\sigma/g(\rho_{liq} - \rho_{gas})}$  - капиллярная постоянная жидкости,  $D_h$  – гидравлический диаметр насадки, Ga – число Галилея,  $\varepsilon$  – пористость насадки.

Для N >  $6 \cdot 10^{-4}$ , критическое значение К, при котором возникает капиллярно-гравитационное захлёбывание, было определено при обработке экспериментальных данных следующим образом:

$$Kv_{cr,1} = 0.0812 \cdot \varepsilon (\cos\frac{\theta}{2})^{1.25} \sqrt[4]{\frac{\sigma g}{(\rho_{liq} - \rho_{gas})}} \left(\frac{\sigma}{4gD_h^3\rho_{liq}}\right)^{-0.174} cL^{-0.347}$$
(3)

На рис. 2 приведено сравнение экспериментальных данных по началу накопления жидкости в колонне при противоточном течении жидкости и газа, определённому по точке перегиба фактора трения, с расчётной зависимостью (3), показанной сплошной линией. На рис. 2 представлены также экспериментальные данные [3] по началу накопления жидкости в колонне с упаковкой Mellapak 500 и Mellapak 250 для течения воды и воздуха, полученные ёмкостным методом. Как видно, наблюдается достаточно хорошее согласие экспериментальных данных с расчетом по уравнению (3), которое учитывает также физические свойства газа и жидкости.



Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных по критическому значению параметра К с расчетом по уравнению (3)

Представленные результаты количественно характеризуют сложную картину развития капиллярно-гравитационной неустойчивости в аппаратах, заполненных структурной насадкой, для практически реализуемого в ректификации диапазоне параметров течения. Определены условия и последовательность развития крупномасштабных структур вследствие капиллярно-гравитационного захлебывания в слоях насадки, что приводит к снижению эффективности разделения бинарных смесей. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке высокоэффективных компактных тепломассообменных аппаратов большой производительности, заполненных структурными насадками.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pavlenko A., Zhukov V., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE. -2014. -V. 60. -P. 690–705.

2. Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л. Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред, Л.: Госэнергоиздат, 1961, С. 315-324.

3. Brunazzi E., Paglianty A., Pintus S., A capacitance probe and a new model to identify and predict the capacity of columns equipped with structured packings // Ind. Eng. Chem. Res. 2001, V.40, P. 1205-1212.

#### REFERENCES

1. Pavlenko, A., Zhukov, V., Pecherkin, N., Chekhovich, V., Volodin, O., Shilkin, A., & Grossmann, C. (2014). Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing. AIChE Journal, 60(2), 690-705.

2. Kutateladze, S. S., & Sorokin, Y. L. (1961). O gidrodinamicheskoy ustoychivosti nekotoryh gazojidkostyh sistem. Voprosy teplootdachi i gidravliki dvuhphaznyh sred. M-. L: Gosenergoizdat, 315-324. [in Russian].

3. Brunazzi, E., Paglianti, A., & Pintus, S. (2001). A capacitance probe and a new model to identify and predict the capacity of columns equipped with structured packings. Industrial & engineering chemistry research, 40(4), 1205-1212.

© В. В. Кузнецов, А. С. Шамирзаев, 2018

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АППАРАТАХ

#### Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделом, тел. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

#### Герман Васильевич Барткус

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, аспирант, инженер-исследователь, тел. (913)750-13-11, e-mail: germanbartkus@gmail.com

#### Игорь Анатольевич Козулин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (923)182-08-97, e-mail: i.a.kozulin@yandex.ru

В работе рассмотрено применение оптических методов для исследования локальных характеристик теплообмена в сложных канальных системах современных тепломассообменных аппаратов. На основе детальной информации о структуре течений выявлены закономерности тепло- и массопереноса в структурных насадках и двухфазных компактных теплообменниках.

Ключевые слова: компактные микроструктурированные аппараты, оптические методы, тепло- и массоперенос.

# APPLYING OPTICAL METHODS TO INVESTIGATION OF HEAT EXCHANGE LOCAL CHARACTERISTICS IN MICROSTRUCTURED DEVICES

#### Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Head of Multiphase Systems Laboratory, phone: (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

## German V. Bartkus

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, Engineer-researcher, phone: (913)750-13-11, e-mail: germanbartkus@gmail.com

#### Igor A. Kozulin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (923)182-08-97, e-mail: i.a.kozulin@yandex.ru

The optical methods application for local characteristics studying of heat exchange in complex channel systems of modern heat and mass transfer devices are considered. Based on detailed data about flow structure the heat and mass transfer mechanisms in structural packing and twophase compact heat-exchangers are identified.

Key words: compact microstructure devices, optical methods, heat and mass transfer.

Теплофизические исследования процессов теплообмена в сложных канальных системах микроструктурированных теплообменных аппаратов интенсивно проводятся в ведущих мировых научных центрах и университетах, что обусловлено их рекордными характеристиками по удельной поверхности и интенсификации процессов тепломассопереноса. Основным направлением в данной области является использование результатов экспериментальных работ, и разработка математических моделей. Представляют интерес физические процессы в сложных канальных системах микроструктурированных устройств с рекордной удельной поверхностью [1], активно развиваются экспериментальные исследования по изучению процессов тепломассообмена в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках [2].

В работе рассмотрено применение инфракрасной термометрии для измерения локальных коэффициентов теплообмена в структурных насадках, и применение лазерного ножа и лазерно-индуцированной флюоресценции для измерения локальной толщины пленки жидкости в каналах пластинчато-ребристых теплообменников.

Одним из перспективных методов увеличения площади контакта фаз и интенсификации процессов теплообмена является применение структурных насадок. Схема течения жидкости на поверхности корругированных листов структурной насадки показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема течения жидкости в структурной насадке

Газ или пар движется в каналах насадки сложной формы, обеспечивая высокие значения коэффициентов тепло- и массообмена. Для определения коэффициентов теплоотдачи со стороны потока газа проведены измерения локальной температуры стенки с использованием метода инфракрасной термометрии при отсутствии течения жидкости. Экспериментальный участок представлял собой два корругированных листа из нержавеющей стали, плотно прижатые друг к другу. На внешнюю поверхность листов было нанесено термочувствительное покрытие на основе жидких кристаллов, температура которого измерялась тепловизионной камерой. Нагрев листов проводился электрическим током.

На рис. 2, *а* представлено распределение температуры по периметру насадки в сечении, перпендикулярном к направлению течения газа в канале. Как видно, наибольшая температура листа насадки наблюдается в ее долине, а наименьшая температура наблюдается вблизи вершины листа насадки. Таким образом, поток газа неравномерно охлаждает поверхность листов насадки, что свидетельствует о значительной неравномерности локальных коэффициентов теплоотдачи по ее поверхности. Измерения профиля компонент скорости с помощью лазерного допплеровского анемометра показали, что газ движется главным образом вдоль каналов, расположенных под углом друг к другу, и потоки взаимодействуют в тонком слое смешения, при этом в соседних каналах образуется два вихревых течения с интенсивным обменом.



Рис. 2. Распределение температуры по поверхности для Re<sub>G</sub> = 3100 (*a*) и сравнение измеренного коэффициента теплоотдачи с расчетом для насадки Koch 1Y (б)

Используя установленные закономерности течения газа, разработан метод расчета локального теплообмена и массообмена в сложных канальных системах структурированных насадок, основанный на детальной структуре течения газа, полученной с использованием оптических методов. Расчёт теплоотдачи (массоотдачи) проведем с учётом влияния массовых сил и высокой степени турбулентности потока в каналах структурированной насадки. Соотношениями классической теории пограничного слоя определяется напряжение трения на стенке канала с учетом относительной функции, учитывающей фактор влияния степени турбулентности. Напряжение трения в слое смешения, вызывающее закрутку потока, рассчитывалось для слоя смешения по известному соотношению [3]. Безразмерный средний коэффициент теплоотдачи на поверхности листов насадки определяется как суперпозиция коэффициентов теплоотдачи:

$$Nu_{D_h} = D_h / l_w (Nu_l + Nu_s).$$

Коэффициенты теплоотдачи  $Nu_l$  и  $Nu_s$  в пограничных слоях до и после разделения потоков используем относительные законы массообмена [4] с поправкой на влияние степени внешней турбулентности.

Сравнение расчета коэффициента теплоотдачи для структурированной насадки Koch 1Y с экспериментальными данными, полученными на основе инфракрасной термометрии для угла раскрытия каналов 45 градусов, приведено на рис. 2, б. Как видно, построенная модель теплообмена в каналах структурной насадки, учитывающая самопроизвольную закрутку потока из-за взаимодействия потоков в слое смешения, достаточно хорошо описывает экспериментальные данные в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Одним из методов увеличения поверхности контакта фаз является применение пластинчато-ребристых теплообменников с каналами, показанными на рис. 3, *а*. Для поддержания высоких значений коэффициента теплоотдачи в канальных системах теплообменников необходима малая толщина пленки жидкости. Схема измерения локальной толщины пленки жидкости с использованием лазерно-индуцированной флюоресценции ( $\mu$ -LIF) показана на рис. 3, *б*. В качестве красителя выбран Родамин 6Ж. Для определения интенсивности переизлученного света использовался светофильтр OC-12 (3) и видеокамера Optronis CX600x2 (2).



Рис. 3. Каналы пластинчато-ребристого теплообменника (*a*) схема измерения толщины пленки (б)

На рис. 4, *а* приведено изменение формы поверхности жидкости по длине стеклянного миниканала с сечением 2x7 мм при опускном течении керосина без потока воздуха при Re<sub>L</sub>=14. Регистрация формы поверхности жидкости проводилась с использованием лазерного ножа и фотосъемки через нижнее прозрачное дно канала. Как видно, влияние капиллярных сил приводит к стягиванию жидкости в углы канала и формированию тонкой пленки жидкости на длинной стороне канала.

На рис. 4, б приведена динамика изменения толщины пленки во времени, полученная методом лазерно-индуцированной флюоресценции при течении смеси вода-воздух в канале с сечением  $0.72 \times 1.50$  мм для приведенных скоростей жидкости и газа  $J_L=0.08$  м/с и  $J_G=0.23$  м/с. Как видно, толщина пленки жидкости существенно неравномерна по периметру канала и ее толщина не превышает 14 микрон. Под воздействием капиллярных сил поверхность изгибается и жидкость стягивается в углы канала. В центре канала толщина жидкости имеет максимальное значение, измерение толщина пленки жидкости вблизи боковых стенок требует проведения дополнительных экспериментов.



Рис. 4. Изменение формы поверхности жидкости по длине канала (*a*) и локальная толщина пленки для смеси вода-воздух, J<sub>L</sub>=0.08 м/с и J<sub>G</sub>=0.23 м/с (б)

Использование лазерных методов, позволило количественно охарактеризовать теплофизические процессы в микроструктурированных тепломассообменных аппаратах. Выявленные механизмы течения газа в каналах структурной насадки позволили разработать модель тепломассообменных процессов, хорошо соответствующую экспериментальным данным. Экспериментальные данные по влиянию капиллярных сил на локальную толщину пленки жидкости показывают значительное изменение толщины пленки и определяют достижимую толщину пленки в двухфазных компактных теплообменниках на основе миниканалов.

Работа выполнена в ИТ СО РАН за счет гранта РНФ (№ 14-49-00010).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hanley B., Chen C. C. New mass transfer correlations for packed towers // AIChE journal.  $-2012. - T. 58. - N_{\odot}$ . 1. - C. 132-152.

2. Robertson J. M., Lovegrove P. C. Boiling heat transfer with Freon 11 (R11) in brazed aluminum, plate-fin heat exchangers //Journal of Heat Transfer.  $-1983. - T. 105. - N_{\odot}. 3. - C. 605-610.$ 

3. Бадатов Е.В., Слинько М.Г., Накоряков В.Е. Математическое моделирование процессов переноса в отрывных течениях с турбулентной областью смешения // ТОХТ. –1970. – Т. 4, № 6. – С. 868-874.

4. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах // М.: Машиностроение. –1982. – С. 200.

#### REFERENCES

1. Hanley, B., & Chen, C. C. (2012), New mass transfer correlations for packed towers. AIChE journal, 58(1), 132-152.

2. Robertson, J. M., & Lovegrove, P. C. (1983). Boiling heat transfer with Freon 11 (R11) in brazed aluminum, plate-fin heat exchangers. Journal of heat transfer, 105(3), 605-610.

3. Badatov, E. V., Slinko, M. G., Nakoryakov, V. E. (1970). Mathematical modelling of the transport processes in the detachment flows with a turbulent mixing region. TOHT' [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 4(6), 868-874 [in Russian].

4. Shukin, V. K., Khalatov, A. A. (1982) Heat transfer, mass transfer and hydrodynamics of swirling in axisymmetric channels. Moscow: Mashinostroenie, 200 [in Russian].

© В. В. Кузнецов, Г. В. Барткус, И. А. Козулин, 2018

# ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОЛОННЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАСАДКАХ

### Николай Иванович Печеркин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)316-50-49, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

#### Александр Николаевич Павленко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зав. лабораторией низкотемпературной теплофизики, тел. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

#### Владимир Егорович Жуков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: zhukov@itp.nsc.ru

#### Александр Дмитриевич Назаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-60, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

#### Георг А. Мески

Аэр Продактс энд Кэмикэлс, Инк., 7201 Хэмилтон Булевар, Аллентаун, Пенс. 18195-1501, США, e-mail: MESKIGA@airproducts.com

#### Патрик А. Хоуптон

Аэр Продактс энд Кэмикэлс, Инк., 7201 Хэмилтон Булевар, Аллентаун, Пенс. 18195-1501, США, e-mail: HOUGHTPA@airproducts.com

В статье представлены результаты исследования разделения бинарной смеси в дистилляционной колонне на структурированных насадках с круглой, полуцилиндрической и квадратной формой поперечного сечения. Показано, что эффективность разделения и гидравлическое сопротивление в большей степени зависят от конструктивных особенностей насадки (в частности, от угла наклона ребер), чем от формы колонны. Основные закономерности по влиянию расходов жидкости и пара, других режимных параметров, полученные для круглых колонн, действительны и для колонн с некруговой геометрией.

Ключевые слова: дистилляция, эффективность разделения, бинарная смесь, структурированная насадка, перепад давления.

# INFLUENCE OF THE DISTILLATION COLUMN CROSS SECTION SHAPE ON THE SEPARATION EFFICIENCY OF THE BINARY MIXTURE ON STRUCTURED PACKINGS

## Nikolay I. Pecherkin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)316-50-49, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

#### Aleksandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Corresponding Member of RAS, Head of Low Temperature Thermophysics Laboratory, phone: (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

### Vladimir E. Zhukov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-87-00, e-mail: zhukov@itp.nsc.ru

### Aleksandr D. Nazarov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Senior Researcher, phone: (383)330-64-60, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

## George A. Meski

Air Products and Chemicals, Inc., 7201 Hamilton Boulevard, Allentown, PA 18195-1501, USA, e-mail: MESKIGA@airproducts.com

#### Patrick A. Houghton

Air Products and Chemicals, Inc., 7201 Hamilton Boulevard, Allentown, PA 18195-1501, USA, e-mail: HOUGHTPA@airproducts.com

The article presents the results of the investigation of a binary mixture separation in distillation column on structured packings with a round, semi-cylindrical and square cross-sectional shape. It is shown that the efficiency of separation and hydraulic resistance depend more on the design features of the structured packing (in particular, on the corrugation angle) than on the shape of the column. The main regularities in terms of the influence of the liquid and vapor flows, other operating parameters obtained for round column, are also valid for columns with noncircular geometry.

Key words: distillation, separation efficiency, binary mixture, structured packing, pressure drop.

Дистилляционные колонны с разделительными стенками (DWC) являются интенсивно развивающимися системами для разделения многокомпонентных смесей. Они имеют огромный потенциал для сохранения энергии и уменьшения капитальных затрат. Большая часть публикаций по этой тематике посвящена разработке и анализу термодинамических схем всего технологического цикла разделения многокомпонентных смесей, включая вопросы тепловой интеграции [1–4]. Вопросам разработки систем для проектирования и методов расчета процесса массопереноса и гидродинамики в нецилиндрических насадках посвящено значительно меньше работ [5–7].

Конструирование раздельных колонн предполагает разделение внутреннего пространства колонны как минимум на две части с установкой разделительных стенок, а также производство и установку структурированных насадок, имеющих в сечении форму, соответствующую раздельным колоннам (сегменты, квадраты, треугольники и т. д.) [4, 8].

Эксперименты по разделению смеси хладонов R114 и R21 проводились в полуцилиндрической (0.8 м), квадратной (0.54×0.54 м) и круглой (0.6 м) колоннах с одинаковой площадью поперечного сечения. Вставки с различной формой поперечного сечения устанавливались в экспериментальную крупномасштабную модель ректификационной колонны диаметром 0.9 м [9, 10]. Высота насадки в колонне 2.2 м, угол наклона ребер листов насадки 45° и 60°, удельная поверхность  $\approx 500 \text{ м}^2/\text{M}^3$ . В статье представлены результаты исследования влияния расходов пара и жидкости на эффективность разделения, гидравлическое сопротивление, распределение локальных потоков жидкости и состава смеси по сечению.

Распределение локального расхода жидкости под насадкой  $(q, cm^3/(cm^2 \cdot c))$  показано на рис. 1.



Рис. 1. Распределение локального расхода жидкости (слева) и локального состава смеси (справа). Угол наклона ребер насадки 45°, *K*<sub>v</sub> = 0.046–0.049 м/с. *а*) круглая насадка; *б*) полуцилиндрическая насадка; *в*) квадратная насадка

Распределение жидкости по сечению характеризуется повышенным расходом в центральной части и пониженным расходом в пристенной зоне. В угловых зонах полуцилиндрической и квадратной колонн локальный расход жидкости резко уменьшается. Распределение состава смеси в жидкой фазе на выходе из исследуемых насадок характеризуется наличием в углах крупномасштабных зон с максимумом и минимумом концентрации летучего компонента. В работе также проведены измерения полей температур в различных сечениях по высоте исследуемых колонн с целью выявления взаимосвязи между эффективностью разделения и распределением локальных параметров потоков жидкости и пара.

Сравнение данных по эффективности разделения смеси, полученных на структурированных насадках с различной формой поперечного сечения, показано на рис. 2. В диапазоне низких значений параметра  $K_v = U_0 \rho_{\pi}^{1/2} / (\rho_{\pi} - \rho_{\pi})^{1/2}$ , где  $U_0$  – приведенная скорость пара, величина НЕТР, характеризующая эффективность разделения, для всех форм поперечного сечения насадки с углом наклона ребер 45° оказывается примерно одинаковой. При низких значениях расходов пара и жидкости в условиях их слабого взаимодействия, коэффициенты массоотдачи в каждой фазе определяются только их расходами и геометрическими характеристиками насадки. При  $K_v \approx 0.052$  м/с наблюдается резкий рост НЕТР, так называемый «кризис массоотдачи». До этого момента наименьшие значения НЕТР, т. е. наибольшая эффективность разделения, наблюдались для круглой насадки, наибольшие значения НЕТР были получены для насадки квадратной формы. Эффективность разделения на полуцилиндрической насадке слабо меняется с увеличением нагрузки колонны по пару в этом диапазоне. Резкое увеличение перепада давления, свидетельствующее о наступлении гидравлического кризиса, происходит при  $K_v > 0.056$  м/с, т. е. после наступления режима ухудшения массообмена. Величина НЕТР при этом значении К<sub>v</sub> достигает локального максимума. После наступления гидравлического кризиса эффективность разделения также слабо зависит от формы поперечного сечения насадки.



Рис. 2. Влияние формы поперечного сечения на эффективность разделения и перепад давления на структурированных насадках с углом наклона ребер 45° (слева) и 60° (справа):

1 – круглая насадка; 2 – квадратная насадка; 3 – полуцилиндрическая насадка

Величина НЕТР для насадки с углом наклона ребер 60° в круглой и в квадратной вставках оказывается примерно одинаковой. С увеличением расхода пара в диапазоне  $K_v = 0.032-0.042$  м/с величина НЕТР уменьшается, затем наблюдается широкая область с практически постоянной эффективностью разделения. При  $K_v > 0.08$  м/с величина НЕТР в круглой колонне начинает возрастать. По сравнению с насадкой с меньшим углом наклона ребер НЕТР увеличилась на 40–50%, но при этом во всем диапазоне изменения нагрузки колонны сохраняет примерно постоянное значение.

Данные по эффективности разделения и гидравлического сопротивления на насадках с различным углом наклона ребер в круглой колонне приведены на примере сравнения с инженерными расчетными моделями «Delft» [11] и «SRP» [12, 13]. В экспериментах наблюдается более сильное влияние угла наклона ребер на эффективность разделения, чем это предсказывают обе модели, рис. 3. На этом рисунке параметр  $F_v = U_0 \rho_{\pi}^{1/2}$ . Модель «SRP» удовлетворительно предсказывает нижнюю границу диапазона изменения величины НЕТР для насадки с углом 45°, а модель «Delft» – верхнюю границу. Экспериментальные значения НЕТР для насадки с углом 60° лежат в промежутке между расчетными зависимостями «SRP» и «Delft». Ухудшение массоотдачи на насадке с углом наклона ребер 45° начинается при меньшей нагрузке по пару, чем резкий рост перепада давления, а на насадке с углом наклона ребер  $60^{\circ}$  при большей нагрузке. Характер изменения перепада давления с изменением расхода пара верно предсказывается обеими моделями. В области до начала гидравлического кризиса более близкие результаты дает модель «SRP», а при больших расходах пара – модель «Delft». На этом рисунке также видно, что насадка с углом наклона ребер  $60^{\circ}$ имеет значительно меньшее гидравлическое сопротивление, чем насадка с углом наклона ребер 45°. Кризис гидравлического сопротивления на насадке с углом наклона ребер  $60^{\circ}$  начинается при существенно больших расходах пара.



Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных по эффективности разделения (слева) и перепаду давления (справа) на структурированных насадках с различным углом наклона ребер с расчетными моделями для круглой колонны:

1 – угол наклона ребер 45°; 2 – угол наклона ребер 60°

Получены новые опытные данные по эффективности разделения смеси и перепаду давления на структурированной насадке для круглой, квадратной и полуцилиндрической колонн. На насадке с углом наклона ребер 45° при малой плотности орошения эффективность разделения не зависит от формы поперечного сечения колонны при отношении мольных расходов жидкости и пара L/V = 1. Форма поперечного сечения колонны также не влияет на эффективность разделения и перепад давления на насадке с углом наклона ребер 60°. В области, предшествующей гидравлическому кризису, наименьшие значения НЕТР наблюдаются на круглой колонне. Наибольшие значения НЕТР получены для квадратной насадки.

Важнейшим результатом проведенного исследования является то, что в практическом диапазоне работы дистилляционных колонн для высокоэффективной насадки с низким гидравлическим сопротивлением эффективность разделения в колонне с квадратным поперечным сечением сравнима с эффективностью разделения в традиционных круглых колоннах.

Основные закономерности по влиянию высоты насадки, отношения расходов жидкости и пара, других режимных параметров, полученные для круглых колонн, действительны и для колонн с некруговой геометрией.

Работа выполнена в рамках научно-технического сотрудничества Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе и компании «Аэр Продактс энд Кэмикэлс, Инк.» США и при финансовой поддержке ФАНО России по Программе ФНИ ГАН на 2013-2020 годы (тема III.18.2.3, АААА-17-117030310025-3).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yildirim Ö., Kiss A. A., Kenig E. Y. Dividing wall columns in chemical process industry: A review on current activities // Separation and Purification Technology. – 2011. – Vol. 80. – P. 403–417.

2. Staak D., Grützner T., Schwegler B., Roederer D. Dividing wall column for industrial multipurpose use // Chem. Eng. and Processing. – 2014. – Vol. 75. – P. 48–57.

3. Wang S.-J., Wong D. S. H. Controllability and energy efficiency of a high-purity divided wall column // Chem. Eng. Sci. – 2007. – Vol. 62. – P. 1010–1025.

4. Dejanović I., Halvorsen I. J., Skogestad S. et al. Hydraulic design, technical challenges and comparison of alternative configurations of a four-product dividing wall column // Chem. Eng. and Processing. -2014. -Vol. 84. -P. 71–81.

5. Olujić Ž., Jödecke M., Shilkin A. et al. Equipment improvement trends in distillation // Chem. Eng. and Processing. – 2009. – Vol. 48. – P. 1089–1104.

6. Kiss A. A., Olujić Ž. A review on process intensification in internally heat-integrated distillation columns // Chem. Eng. and Processing. – 2014. – Vol. 86. – P. 125–144.

7. Chen W., Huang K., Chen H. et al. Design and operation of dividing-wall distillation columns. 1. Diminishing the black-hole problem through overdesign // Chem. Eng. and Processing. – 2014. - Vol. 75. - P. 90-109.

8. Wilson J., Sunder S., Houghton P. Structured packing. US Patent: US 2013/0233016 A1. – Sep. 12, 2013.

9. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Chekhovich V.Yu., Zhukov V.E., Sunder S., Houghton P., Serov A.F., Nazarov A.D. Separation of mixtures and distribution of a liquid on a structured pack-

ing in a large-scale model of a distillation column // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. -2006. - V. 40 (4). - P. 329-338.

10. Pavlenko A., Zhukov V., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O., Shilkin A., Grossmann C. Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // AIChE Journal. -2014. -V. 60, Issue 2. -P. 690–705.

11. Olujić Ž., Kamerbeek A. B., de Graauw J. A corrugation geometry based model for efficiency of structured distillation packing // Chem. Eng. and Processing. – 1999. – Vol. 38 (4–6). – P. 683–695.

12. Bravo J. L., Rocha J. A., Fair J. R. Mass transfer in gauze packings // Hydrocarbon Processing. – 1985. – Vol. 64 (1). – P. 91–95.

13. Fair J. R., Seibert A. F., Behrens M. et al. Structure packing performance – Experimental evaluation of two predictive models // Ind. Eng. Chem. Res. – 2000. – Vol. 39 (6). – P. 1788–1796.

© Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко, В. Е. Жуков, А. Д. Назаров, Г. Мески, П. Хоуптон, 2018

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ S<sub>i</sub>O<sub>2</sub> НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЭПОКСИДНОГО ЛАКА

#### Айнура Сергазыевна Бахтаулова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, аспирант, научный сотрудник, тел. (906)909-76-00, e-mail: neka010191@mail.ru

Проведено исследование оптических свойств не модифицированных и модифицированных связующих соединений на основе эпоксидного лака ЭП-730 до и после облучения ультрафиолетом. Произведен анализ спектров диффузного отражения и расчет интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения. Установлено, что модифицирование эпоксидного лака ЭП-730 наночастицами SiO<sub>2</sub> приводит к существенному увеличению стабильности оптических свойств.

Ключевые слова: эпоксидный лак, диоксид кремния, радиационная стойкость, спектры диффузного отражения, интегральный коэффициент поглощения, модифицирование.

# INVESTIGATION INFLUENCE OF UV RADIATION ON THE RADIATION RESISTANCE OF EPOXY LACQUER MODIFIED BY NANOPARTICLES SiO<sub>2</sub>

#### Ainura S. Bakhtaulova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Prospect Lenina St., Tomsk, 634050, Russia, Ph. D. Student, Researcher, (906)909-76-00, e-mail: neka010191@mail.ru

The optical properties of unmodified and modified binder compounds based on epoxy lacquer EP-730 before and after irradiation with ultraviolet have been studied. The analysis of diffuse reflection spectra and the calculation of the integrated absorption coefficient of solar radiation are carried out. It was found that the modification of epoxy lacquer EP-730 with SiO<sub>2</sub> nanoparticles leads to a significant increase in the stability of optical properties.

**Key words:** epoxy lacquer, silicon dioxide, radiation resistance, diffuse reflection spectra, integral absorption coefficient, modification.

## Введение

В последнее десятилетие большое внимание уделяется разработке и созданию новых терморегулирующих покрытий для космических аппаратов. Эпоксидный лак ЭП-730 применяется в покрытиях в качестве связующего соединения. Повышение его радиационной стойкости является актуальной задачей. Одним из таких способов может быть его модифицирование наночастицами. Поэтому исследовали влияние типа и концентрации наночастиц, введённых в лак, на его радиационную стойкость представляет научный интерес [1].

Лак ЭП-730 представляет собой двухкомпонентную систему состоящую из эпоксидной смолы и отвердителя. Используется эпоксидный лак ЭП-730 для защиты от коррозии стальных, алюминиевых изделий и неметаллов. Готовое

защитное покрытие обладает достаточно высокой стойкостью во влажной атмосфере и устойчиво к атмосферной коррозии [2].

Целью работы является исследование влияния УФ излучения на радиационную стойкость эпоксидного лака ЭП-730, модифицированого наночастицами SiO<sub>2</sub>, в сравнении с не модифицированным.

# Эксперимент

Модифицирование лака наночастицами SiO<sub>2</sub> осуществляли следующим образом: наночастицы диоксида кремния 0,5 мас. % добавляли в эпоксидную смолу, перемешивали в магнитной мешалке, добавляли отвердитель и снова перемешивали до получения гомогенной массы. Смесь наносили на алюминиевые подложки из сплава АМГ-6 диаметром 28 мм сушили при комнатной температуре в течение 24 часов.

Приготовленные образцы устанавливали в установке «Спектр» [3], получали вакуум 5·10<sup>-7</sup> тор, термостатировали при Т=300К, регистрировали спектры отражения в исходном состоянии ( $\rho_{\lambda 0}$ ), облучали ксеноновой дуговой лампой в течение 2, 5 и 10 часов. Регистрировали спектры отражения облученных образцов ( $\rho_{\lambda t}$ ) на месте облучения (in situ). Анализировали разностные спектры отражения ( $\Delta \rho_{\lambda}$ ), получаемые вычитанием спектров после облучения  $\rho_{\lambda t}$  из спектров до облучения  $\rho_{\lambda 0}$  и представляющих собой спектры поглощения, наведенного действием квантов солнечного спектра. Интенсивность излучения лампы (Es) в УФ области в 3,1 раза превышала интенсивность излучения заатмосферного Солнца: Es=3,1 эсо-эквивалент солнечного облучения, 1 эсо=139 BT/см<sup>2</sup>.

Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ) и его изменение после облучения ( $\Delta a_s$ ) рассчитывали из спектров отражения лака по 24 точкам, соответствующим равноэнергетическим участкам в спектре излучения Солнца согласно стандарта [4].

# Результаты и их обсуждение

Разностные спектры диффузного отражения (рисунок) лака ЭП-730 не модифицированного и модифицированного 0,5 мас. % наночастицами SiO<sub>2</sub> после 10 часов облучения показывают, что облучение приводит к появлению полосы поглощения в области 200-850 нм с максимумом при 360 нм.

В диапазоне 200-850 нм при облучении значения  $\Delta \rho$  модифицированного образца меньше по сравнению с  $\Delta \rho$  не модифицированного. В области от 850 до 2200 нм регистрируется спад  $\Delta \rho$  до отрицательных значений у обоих образцов. Значения  $\Delta \rho$  в этой области не значительные, они близки к ошибке измерения [3]. Поэтому можно принять, что изменение спектров происходят только в области полосы поглощения с максимумом при 380 нм.

Рабочей характеристикой лаков, используемых в терморегулирующих покрытиях (ТРП) космических аппаратов является интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (а<sub>s</sub>). Мерой радиационной стойкости лаков является изменение коэффициента поглощения  $a_s$  после облучения ( $\Delta a_s$ ). Его определение осуществляли по разности значений коэффициента поглощения до ( $a_{s0}$ ) и после облучения ( $a_{s\phi}$ ):



Разностные спектры диффузного отражения эпоксидного лака ЭП-730: 1 - после облучения в течение 10 часов светом ксеноновой лампы не модифицированного; 2 - модифицированного 0,5 мас. % наночастицами SiO<sub>2</sub>.

В таблице представлены результаты расчета изменений коэффициента по-глощения  $\Delta a_s$ .

Лак ЭП-730	$\Delta a_s$		
	t = 2 ч	t = 5 ч	t = 10 ч
не модифицированный	0,093	0,052	0,041
модифицированный	0,008	0,020	0,022

Значений не модифицированного и модифицированного 0,5 мас. % наночастицами SiO<sub>2</sub> от времени облучения ультрафиолетом лака ЭП-730

Из таблицы следует, что значения изменения коэффициента поглощения -  $\Delta a_s$  эпоксидного лака ЭП-730 модифицированного наночастицами SiO<sub>2</sub>, намного меньше по сравнению с не модифицированным лаком.

## Заключение

Выполненные исследования показали, что модифицирование эпоксидного лака наночастицами SiO<sub>2</sub> в количестве 0,5 масс.% приводит к существенному увеличению стабильности оптических свойств, а именно радиационной стойкости, при облучении квантами солнечного спектра с интенсивностью в 3,1 раз превышающей солнечную в течение до 10 час.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов М.М., Соколовский А.Н. Синтез и свойства соединений BaSrTiO3 // Доклады ТУСУР. – 2007. – Т. 2. – С. 198–203.

2. Кочнова З.А., Жаворонок Е.С., Чалых А.Е. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. – М.: Пэйнт-Медиа, 2006. – 200 с.

3. Косицын Л.Г., Михайлов М.М., Кузнецов Н.Я., Дворецкий М.И. Установка для исследования спектров диффузного отражения и люминесценции твердых тел в вакууме // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – № 4. – С. 176–180.

4. ASTM E490 - 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. 2005.

## REFFERENSES

1. Mikhailov M.M, Sokolovsky A.N (2007) Synthesis and properties of BaSrTiO3 compounds // Journal "Reports TUSUR".- Vol. 2. - P. 198-203. [in Russian]

2. Koschnova Z.A, Zhavoronok E.S, Chalykh A.E (2006) Epoxy resins and hardeners: industrial products. - M .: Painting Media. [in Russian]

3. Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Ya., Dvoretsky M.I. (1985) A device for studying the spectra of diffuse reflection and luminescence of solids in vacuum // Devices and Experimental Techniques. - 1985. - No. 4. - P. 176-180. [in Russian]

4. ASTM E490 - 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2005.

© А. С. Бахтаулова, 2018

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ПОЛОСКОВОГО МИКРОВОЛНОВОДА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕГО В КАЧЕСТВЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

## Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой фотоники и приборостроения, тел. (923)240-44-45, e-mail: dimflint@mail.ru

#### Валерий Андреевич Райхерт

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности, тел. (913)959-15-44, e-mail: vreichert@yandex.ru

#### Сергей Леонидович Шергин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой физики, тел. (953)862-97-88, e-mail: serkron@mail.ru

Исследован макетный образец (в дальнейшем макет) с полосковыми микромеханическими волноводами в свободном состоянии с пьезоэлектрическим возбуждением колебаний. Разработана методика исследования основных функциональных характеристик макета с полосковыми микромеханическими волноводами в свободном состоянии. Изготовлен экспериментальный стенд. С использованием микроскопа, проведен визуальный осмотр макетного образца и оценено его качество. Проведены испытания макетного образца. Получены дифракционные картины отраженного света от изгибной волны в волноводах при различных частотах механического возбуждения. Проведен анализ дифракционных картин.

**Ключевые слова:** полосковый волновод, упругие акустические изгибные волны, акустооптика, электроуправляемые дифракционные решетки.

# STUDY OF THE PROTOTYP OF STRIP MIKRO WAVEGUIDE FOR USE AS A TUNABLE DIFFRACTION GRATING

## **Dmitry M. Nikulin**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Acting Head of Department of Photonics and Device Engineering, phone: (923)240-44-45, e-mail: dimflint@mail.ru

## Valery A. Raychert

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Senior Lecturer, Department of Information Security, phone: (913)959-15-44, e-mail: vreichert@yandex.ru

#### Sergey L. Shergin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Acting Head of Department of Physics, phone: (953)862-97-88, e-mail: serkron@mail.ru

The model sample (model) with strip micromechanical waveguides in free state with piezoelectric excitation of oscillations is investigated. The technique of research of the basic functional characteristics of the model with strip micromechanical waveguides in the free state is developed. The experimental stand is made. With the use of a microscope, a visual inspection of the model and evaluated its quality. Tests of the model sample were carried out. Diffraction patterns of reflected light from a bending wave in waveguides at different frequencies of mechanical excitation are obtained. The analysis of diffraction patterns.

Key words: strip waveguide, elastic acoustic bending waves, acousto-optics, electrocontrolled diffraction gratings.

# Введение

Одним из устройств оптических спектральных систем являются перестраиваемые дифракционные решетки, функционирующие на принципах взаимодействия световых волн с упругими поверхностными или изгибными волнами в тонкопленочных мембранах или микромеханических волноводах. Длина упругой поверхностной волны в таких устройствах составляет от десяти до нескольких сотен мкм, что позволяет создавать перестраиваемые решетки в соответствующем диапазоне периодов (длин волн).

Для достижения оптимальных характеристик функционирования микромеханических полосковых волноводов, основанных на принципах акустооптики упругих волн, необходим комплекс мер, в том числе исследование образцов подобных устройств [1, 2].

В данной статье приведены результаты экспериментального исследования функциональных характеристик макета с полосковыми микромеханическими волноводами в свободном состоянии, представленного на рис. 1.



Рис. 1. Макетный образец с полосковыми микромеханическими волноводами в свободном состоянии

# Эксперименты

В исследуемом макете волноводы выполнены на основе полиимида с нанесенным металлическим покрытием. Толщина металлического покрытия 100 нм, а общая толщина волновода составила 1,9 мкм. При помощи микроскопа определена бездефектная зона волноводов, состоящая из 8 полос (волноводов), имеющих ровные края и отсутствие нахлестов, см. рис. 2. При ширине волновода 100 мкм, разброс величины зазоров между волноводами составляет от 10 до 20 мкм.



Рис. 2. Увеличенный размер бездефектной зоны полосковых волноводов

При визуальном осмотре волноводов на микроскопе, в процессе изменения глубины резкости микроскопа, обнаружено, что все полосы имеют в сечении достаточно плоскую форму и ориентированы в одной плоскости.

Для оценки основных функциональных характеристик макета с полосковыми микромеханическими волноводами в свободном состоянии разработан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема экспериментального стенда:

1 — макет полосковых волноводов, 2 — лазер, 3 — персональный компьютер; 4 — матрица ТВ-камеры, 5 — объектив, 6 — пьезовозбудитель, 7 — генератор возбуждения, 8 — щель для выделения облучаемой зоны микроволноводов Макет приклеивался к пьезоэлектрическому преобразователю. Возбуждение пьезоэлектрического преобразователя осуществлялось перестраиваемым генератором сигналов синусоидальной формы. В результате обратного пьезоэлектрического эффекта возникала деформация в пьезоэлектрическом преобразователе, что вызывало вибрацию макета вместе с полосковыми микроволноводами. Стоячие изгибные волны, возникающие в микроволноводе, представляют собой дифракционную решетку с периодом равным половине длины стоячей волны. Дифракционная картина, возникающая в отраженном свете при взаимодействии лазерного излучения с периодическим рельефом микроволноводов, через объектив направлялась на матрицу ТВ-камеры.

Щель шириной 1 мм была установлена над бездефектной зоной волноводов и устанавливалась параллельно волноводам, горизонтально. Излучение направлялось на бездефектный участок волноводов, где наблюдалась дифракция в отраженном свете. Далее, дифрагированное излучение поступало в объектив, в фокальной плоскости которого располагалась матрица ТВ-камеры. ТВ-камера подключалась к персональному компьютеру через USB-порт.

Результаты, в виде изображения дифракционных картин, регистрировались в ПК. Мощность лазера составляла до 5 мВт и не изменялась, длина волны 532 нм. Размер пикселя ТВ-камеры составлял 2,8 мкм [3].

Настройка камеры выполнялась следующим образом: изначально, камера автоматически настраивалась (режим «авто»). При этом возникала сильная засветка картины и ограничивался динамический диапазон. Для устранения этого недостатка режим «авто» в дальнейшем отключался, а далее уменьшалась мощность лазера до получения качественной картины.

На рис. 4 представлены картины: *a*) в свободном положении (без пьезоэлектрического возбуждения); *б*) при наличии изгибных волн (с пьезоэлектрическим возбуждением) на частоте генератора 336 кГц.



Рис. 4. Пример изображений, получаемых матрицей ТВ-камеры, расположенной в фокальной плоскости объектива

Для 491 (центральной) горизонтальной строки дифракционной картины получен график распределения относительной интенсивности. По вертикали откладывается относительная интенсивность излучения, по горизонтали – геометрическое местоположение падающего излучения в пикселях.

При использовании в эксперименте объектива с фокусным расстоянием 50 мм и лазера с длиной волны 0,532 мкм, получено ТВ-камерой изображение главного максимума, центр которого соответствует 56-му пикселю (рис. 5). Минус первый максимум отстоит на 43 пикселя от главного, а плюс первый максимум на 42 пикселя, что в пересчете составляет 120,4 мкм до каждого максимума. Расчеты показывают, что полученная дифракционная картина, по расчетам, формируется дифракционной решеткой с периодом 220 мкм. [4, 5].



Рис. 5. Распределение относительной интенсивности излучения, падающего на среднюю строку матрицы ТВ-камеры

## Результаты

Исследования подтвердили устойчивое функционирование макетного образца и позволили определить его параметры:

- диапазон используемых частот возбуждения макетного образца, на котором наблюдали дифракционную картину, от 196 до 336 кГц;

- диапазон полученных при пьезовозбуждении изгибных волн составил (220÷525) мкм, что соответствует перестраиваемому диапазону периода дифракционной решетки; - максимальная частота возбуждения, при которой наблюдалась дифракция, составила 336 кГц;

- минимальная длина изгибной волны волноводов составила 220 мкм, при частоте возбуждения 336 кГц;

- оценка амплитуды изгибной волны, при которой возможно наблюдение дифракционной картины при отражении света в видимом диапазоне спектра, составляет (100÷200) нм [6].

## Заключение

Выполненные авторами экспериментальные исследования определили основные функциональные характеристики макетного образца с полосковыми микромеханическими волноводами в свободном состоянии с пьезоэлектрическим возбуждением колебаний. Подтверждена принципиальная возможность использования полосковых микромеханических волноводов в качестве перестраиваемых дифракционных решеток.

В дальнейшем предполагается совершенствование методики в направлении количественной оценки амплитуды возбужденной изгибной волны волноводов и оценки распределения интенсивности в получаемой дифракционной картине.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Райхерт В. А. Пьезоэлектрическое возбуждение упругих изгибных волн в свободных тонкоплёночных структурах // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 55–63.

2. В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. М. Никулин. Электроуправляемое дифракционное устройство. Патент 2377702 РФ, МПК Н 01 L 41/08, G 02 F 1/29. /- № 2008112955/28 ; заявл. 03.04.2008 ; опубл. 27.12.2009. Бюл. № 36.

3. http://www.evs.ru/d\_sheet/VEC-245.pdf (дата обращения: 20.03.3018).

4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М. : Высш. Шк., 2002. – 718 с.

5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.

6. Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков, Д.М. Никулин. Дифракция света на упругих волнах в тонкопленочных мембранных структурах // ГЕО-Сибирь-2007. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1.: сб. матер. III Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007». – Новосибирск: СГГА, 2007.- С.201-203.

## REFERENCES

1. Chesnokov V.V., Chesnokov D. V, Raychert V.A. (2011) Piezoelectric excitation of elastic flexural waves in a free thin-film structures. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 6. SibOptika-2011 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. SibOptics-2011] (pp. 55–63). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

2. Chesnokov V.V., Chesnokov D. V, Nikulin D.M. (2008). Patent RF No 2377702. Novosibirsk: IP Russian Federation.

3. http://www.evs.ru/d\_sheet/VEC-245.pdf (date of access: 20.03.3018).

4. Detlaf A.A., Yavorsky B.M. (2002). ). Physics course. Moscow: Higher school [in Russian].

5. Stafeev S.K., Boyarskiy K.K., Bashnina G.L. (2006) Basics of optics. Saint Petersburg: Piter [in Russian].

6. Chesnokov V.V., Chesnokov D. V, Nikulin D.M. (2007) Diffraction of light on elastic waves in thin-film membrane structures. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2007: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 4. SibOptika-2007 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2007: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2007] (pp. 201–203). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

© Д. М. Никулин, В. А. Райхерт, С. Л. Шергин, 2018

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ТЕЧЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕМ ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

#### Олег Александрович Володин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: volodin@ngs.ru

#### Николай Иванович Печеркин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)316-50-49, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

#### Александр Николаевич Павленко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зав. лабораторией низкотемпературной теплофизики, тел. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

#### Николай Николаевич Зубков

МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, доктор технических наук, профессор, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена при пленочном течении бинарной смеси хладонов на вертикальных цилиндрах с различным образом микроструктурированной наружной поверхностью. Исследовались три типа упорядоченных трехмерных микроструктур поверхности, полученных методом деформирующего резания. Показано, что коэффициенты теплоотдачи в режиме кипения на поверхностях с микроструктурой, имеющей меньшие геометрические параметры, превышают значения для поверхностей с более крупными характеристиками. Поверхности с частично закрытыми микропорами в режиме кипения дают преимущество в теплоотдаче по сравнению с микроструктурированной поверхностью без полузамкнутых пор.

**Ключевые слова:** микроструктурированная поверхность, стекающие пленки, интенсификация теплоотдачи, пузырьковое кипение, кризис кипения, хладоны.

# HEAT TRANSFER ENHANCEMENT AT GRAVITATIONAL FLOW OF LIQUID FILM BY MICROSTRUCTURING OF HEAT-RELEASING SURFACE

## Oleg A. Volodin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-87-00, e-mail: volodin@ngs.ru

## Nikolay I. Pecherkin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)316-50-49, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

#### Aleksandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Corresponding Member of RAS, Head of Low Temperature Thermophysics Laboratory, phone: (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

### Nikolay N. Zubkov

Moscow State Technical University Named After N. E. Bauman, 5, 2-nd Bauman St., Moscow, 105005, Russia, D. Sc., Professor, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

The experimental results on the study of heat transfer at the film flow of a binary mixture of refrigerants on vertical cylinders with a differently microstructured outer surface are presented. Three types of ordered three-dimensional surface microstructures obtained by the deformational cutting were investigated. It is shown that the heat transfer coefficients in the boiling regime on surfaces with a microstructure having smaller geometric parameters exceed values for surfaces with larger characteristics. Surfaces with partially enclosed micropores in boiling regime give an advantage in heat transfer compared to a microstructured surface without semiclosed pores.

Key words: microstructured surface, falling films, heat transfer enhancement, nucleate boiling, boiling crisis, refrigerants.

С целью интенсификации теплообмена в режиме кипения теплоносителя применяются различные методы обработки металлических поверхностей [1]. Полученные в результате использования таких методов структуры поверхности, как правило, способствуют увеличению плотности центров парообразования и снижению температурных напоров закипания жидкости [2]. Данный подход особенно эффективен для случая жидкостей, обладающих высокой смачиваемостью (хладоны, криогенные жидкости и т. д.).

Одним из современных высокопроизводительных и экономичных методов формирования микроструктурированных поверхностей (т. е. теплообменных поверхностей с характерными размерами структуры в диапазоне 1-1000 мкм), является метод деформирующего резания (МДР). Применяемый в настоящей работе метод ДР позволяет создавать теплообменные поверхности сложной геометрии с возможностью увеличения площади поверхности по сравнению с исходной до 12 раз [3].

Новизна предлагаемого авторами подхода также связана с тем, что для случая пленочного течения маловязких высокосмачивающих жидкостей на поверхностях с различным характером микроструктурирования достаточно общирных и систематических исследований не проводилось.

Данная работа расширяет и дополняет ранее полученные авторами результаты по применению структурированных поверхностей для интенсификации теплообмена [4-6].

Описание экспериментальной установки приведено в [4, 5]. Выбранная в качестве рабочей жидкости смесь хладонов R114/R21 15%-й концентрации позволяет моделировать процессы, имеющие место в тепломассообменных аппаратах с близкими по физическим свойствам теплоносителями (фреоны и их смеси, криогенные жидкости). Такая смесь хладонов, являющихся высокосмачивающими веществами с низкими температурами кипения (соответственно 3,5 и 8,7 °C при атмосферном давлении), хорошо подходит в качестве рабочей жидкости при проведении исследований по интенсификации теплообмена при кипении на микропористых поверхностях.

В работе исследовались два основных типа микроструктур:

1) микрооребрение с полузакрытыми подповерхностными порами, полученными за счет накатки роликом (рис. 1, a,  $\delta$ );

2) микроштырьковая структура, при формировании которой с помощью накатки создавался разрыв ребер в поперечном направлении (глубина разрыва – 100 мкм), в результате чего формировался массив вертикальных штырьков, рис. 1, *в*.



Рис. 1. Исследуемые микроструктуры, фронтальный вид: *а*) микроструктура № 1 (вертикальные полосы – области накатки); *б*) микроструктура № 2; *в*) микроструктура № 3

Параметры исследуемых микроструктур приведены в таблице.

N⁰	Тип	Шаг ребер, мкм	Высота ребер, мкм	Шаг накатки, мкм
1	Микроструктура с полузакрытыми порами	100	220	318
2		200	440	318
3	Микроштырьки	150	250	318

# Параметры микроструктурированных поверхностей

На рис. 2 приведены характерные данные по зависимости осредненного по длине коэффициента теплоотдачи (КТО) от плотности теплового потока, полученные для микроструктурированных поверхностей № 1, 2 в диапазоне изменения числа Рейнольдса 300–1500. Здесь  $Re = 4Q/(\pi \cdot d \cdot v)$ , где Q – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с; d – диаметр трубы, м; v – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.



Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока: *а*) поверхность № 1; *б*) поверхность № 2

Из рис. 2, *а* видно, что коэффициент теплоотдачи для поверхности № 1 слабо возрастает с ростом *q* в режиме испарения (q < 1 Вт/см<sup>2</sup>), влияния плотности орошения не наблюдается. В режиме пузырькового кипения КТО увеличивается с увеличением числа Re, расхождение значений КТО становится заметным при больших тепловых потоках – в околокризисных режимах, – когда появление на поверхности замываемых сухих пятен снижает коэффициент теплоотдачи (в первую очередь для малых расходов жидкости).

Для поверхности № 2 кипение начинается при заметно меньших тепловых потоках, чем для поверхности №1 ( $q = 0.65 \text{ Bt/cm}^2$  против  $q \approx 1 \text{ Bt/cm}^2$ ), на рис. 2,  $\delta$  практически отсутствует характерная «полочка» испарения. Однако

в режиме кипения на поверхности № 2 получены более низкие значения КТО (примерно на 25 % в области развитого кипения). Это может быть связано с различной плотностью центров парообразования на данных поверхностях. В режиме развитого пузырькового кипения на поверхности № 2 наблюдаются разрозненные кипящие струи, в то время как на поверхности № 1 при тех же тепловых нагрузках активировано гораздо большее количество плотно «сидящих» центров парообразования.

На рис. 3 приведено сравнение полученных результатов по зависимости КТО от теплового потока для поверхностей № 1-3 с КТО эталонной гладкой поверхности.



Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для поверхностей с различной микроструктурой

Видно, что коэффициент теплоотдачи для поверхности № 1 примерно в 3 раза превышает коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности (в области развитого кипения), значения КТО для поверхности № 2, как отмечалось, находятся заметно ниже. Интенсификации теплоотдачи на микроштырьковой поверхности № 3 в сравнении с гладкой поверхностью в режиме кипения не наблюдается, что можно связать с отсутствием полузакрытых микропор, способствующих увеличению плотности центров парообразования. Развитая по сравнению с гладкой поверхностью площадь поверхности № 3, тем не менее, приводит к увеличению КТО в режиме испарения пленки жидкости (примерно в 2 раза по сравнению с гладкой поверхностью).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-08-00489) и РНФ (проект № 14-49-00010: изучение интенсификации теплообмена в стекающих пленках с использованием микроштырьковых структур тепловыделяющей поверхности)

248

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов И. А., Махянов Х. М., Гуреев В. М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена. – Казань: Центр инновац. технологий, 2009. – 560 с.

2. Webb R. L. Odyssey of the enhanced boiling surface // J. Heat Transf. – 2004. Vol. 126 (6). – P. 1051–1059.

3. Thors P., Zoubkov N. Method for making enhanced heat transfer surfaces. Patent No. US 8573022 B2, Int. B21D53/01. – November 5, 2013.

4. Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // Int. J. Heat and Mass Transfer. -2015. - Vol. 90 (11). - P. 149–158.

5. Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Володин О. А. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 196 с.

6. Влияние типа структурирования поверхности на теплоотдачу при испарении и кипении в стекающих пленках / О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко, Н. Н.Зубков, Ю. Л. Битюцкая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 157–162.

#### REFERENCES

1. Popov I. A., Mahyanov H. M., Gureev V. M. Physical basis and industrial application of heat transfer intensification: Heat transfer intensification. – Kazan: Innovative technologies center, 2009. – 560 p. [in Russian].

2. Webb R. L. Odyssey of the enhanced boiling surface // J. Heat Transf. – 2004. Vol. 126 (6). – P. 1051–1059.

3. Thors P., Zoubkov N. Method for making enhanced heat transfer surfaces. Patent No. US 8573022 B2, Int. B21D53/01. – November 5, 2013.

4. Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Volodin O. A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces // Int. J. Heat and Mass Transfer. -2015. - Vol. 90 (11). - P. 149–158.

5. Pavlenko A. N., Pecherkin N. I., Volodin O. A. Heat transfer and crisis phenomena in the falling liquid films at evaporation and boiling. – Novosibirsk: SB RAS Press, 2016. – 196 p. [in Russian].

6. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N., Zubkov N. N., Bityutskaya Yu. L. Influence of surface structuring type on heat transfer at evaporation and boiling in falling films // In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2017 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2014] (pp. 157–162). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

© О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко, Н. Н. Зубков, 2018

# ДИНАМИКА ВЗРЫВНОГО КИПЕНИЯ ВОДЫ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ

#### Игорь Анатольевич Козулин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (923)182-08-97, e-mail: kozulin@itp.nsc.ru

#### Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, зав. отделом, тел. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

## Владимир Иванович Орешкин

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (3822)49-29-88, e-mail: oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru

Исследована динамика пузырькового распада воды на микронагревателе с использованием оригинального оптического метода, основанного на измерении интенсивности лазерного излучения, диффузно отраженного от области фазового перехода. Для скорости роста температуры больше 250 МК/с, получено значительное изменение характеристик взрывного фазового перехода, вызванное превышением количества тепла, подводимого к поверхности нагревателя, по сравнению с затратами тепла на образование новой фазы.

Ключевые слова: взрывное вскипание, метастабильная жидкость, МЭМС, микрона-греватель.

# DYNAMIC OF EXPLOSIVE EVAPORATION OF WATER DURING SUPERHIGH SPEED OF TEMPERATURE GROWTH RATE

#### Igor A. Kozulin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (923)182-08-97, e-mail: kozulin@itp.nsc.ru

#### Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Division, phone: (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

## Vladimir I. Oreshkin

Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3, Prospect Akademichesky St., Tomsk, 634055, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (3822)49-29-88, e-mail: oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru

In the paper has been investigated the dynamics of explosive vaporization of water on a microheater using an original optical method based on measuring of the intensity of laser beam reflected from resistor surface. A significant change in the characteristics of the explosive phase transition is obtained for the temperature growth rate more than 250 MK/s, caused by excess amount of heat supplied to the heater surface, as compared with the heat spending for formation of a new phase.

Key words: explosive boiling, metastable liquid, MEMS systems, microheater.

В последнее время в различных областях техники применяются микроэлектромеханические системы (МЭМС системы) с размером рабочих элементов меньше 100 микрон. Принцип работы таких МЭМС систем может осуществляться на управляемом распаде метастабильной жидкости [1]. Перспективным направлением является применение наножидкостей в МЭМС системах, что может быть использовано для контроля температуры взрывного вскипания жидкости.

Целью данной работы является исследование взрывного кипения воды с добавками наночастиц диоксида кремния на плоском микронагревателе. На начальном этапе работ использована вода без добавок наночастиц, как базовая жидкость. Для исследования взрывного кипения воды применен оптический метод, основанный на измерении интенсивности лазерного излучения, диффузно отражённого от поверхности микронагревателя [2, 3]. Схема установки показана на рис. 2. Нагревателем для исследования взрывного кипения микрообъема жидкости являлся многослойный тонко-плёночный резистор 100х110 мкм, изготовленный по технологии Hewlett Packard [4]. Электрическое сопротивление микронагревателя составляло 57.4 Ом.



Рис. 2. Схема установки для исследования взрывного кипения на микронагревателе

Для проведения экспериментов микрочип с микронагревателями (1) погружался в камеру (2) с деионизированной водой без добавления наночастиц диоксида кремния. Эксперименты проведены при комнатной температуре, начальная температура жидкости менялась в диапазоне от 19 до 23 <sup>0</sup>С. Для нагрева микронагревателя (1) с генератора подавались одиночные прямоугольные импульсы тока. Для регистрации зародышеобразования при вскипании, использована оптическая методика, которая заключалась в измерении интенсивности лазерного излучения (3), отражённого от поверхности микронагревателя (1). Свет, после отражения от поверхности микронагревателя, попадал в объектив микроскопа (4), с помощью диафрагмы (5) отраженный свет собирался только с поверхности того микронагревателя, на который подавался нагревательный импульс. Интенсивность лазерного излучения измерялась фотодиодом (6).

Схема оптического метода приведена на рис. 2, а. При появлении на поверхности микропузырьков происходит рассеяние света, и наблюдается уменьшение интегрального коэффициента отражения. Это позволило применить данный метод для исследования динамики заполнения поверхности микронагревателя паровыми пузырьками. В экспериментах была проведена визуализация процесса вскипания воды, на рис. 2, б приведена фотография поверхности нагревателя при вскипании воды спустя 4.5 мкс после начала нагрева.

С ростом температуры на микронагревателе появляются микропузырьки, неравномерно распределенные по поверхности, их число мало, но с ростом температуры их число экспоненциально растет. На заключительной стадии пузырькового распада поверхность микронагревателя покрыта паром.



100х110 мкм

Рис. 2: *a*) Схема оптического метода;  $\delta$ ) фотография пузырькового распада воды при плотности теплового потока  $q_{eff} = 539.7 \text{ MBt/m}^2$ 

Динамика взрывного вскипания воды для различной скорости роста температуры на микронагревателе 100х110 мкм представлена на рис. 3. На рис. 3, а тонкой линией представлен импульс с генератора, нормированный на единицу. Темной линией представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени при взрывном вскипании воды для приведенной плотность тепловыделения  $q_{eff} = 330.33 \text{ MBt/m}^2$ , скорости роста температуры dT/dt = 19.98 МК/с и длительность нагревающего импульса t<sub>имп</sub> = 9.118 мкс. Сигнал с фотодиода нормирован таким образом, чтобы время начало сигнала с фотодиода начиналось с единицы и совпадало
со временем подачи нагревающего импульса с генератора. На рис. 3,  $\delta$  представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени при взрывном вскипании воды для приведенной плотность тепловыделения  $q_{eff}$ =1318.63 MBt/m<sup>2</sup>, скорости роста температуры dT/dt=158.72 MK/c и длительность нагревающего импульса  $t_{имn}$ =1.802 мкс. На рис. 3,  $\epsilon$  тонкой линией представлен импульс с генератора, нормированный на единицу. С ростом теплового потока фронт вскипания жидкости становится более резким, что может указывать о смене механизма вскипания жидкости. На рис. 3,  $\epsilon$  представлена зависимость интенсивности отраженного света в зависимости от времени при взрывном вскипании воды для приведенной плотность тепловыделения  $q_{eff}$ =2436.49 MBt/m<sup>2</sup>, скорости роста температуры dT/dt=341.81 MK/c и длительность нагревающего импульса  $t_{имn}$ =1.084 мкс.

Расчет теплового потока, скорость роста температуры жидкости, температура вскипания осуществлялся при численном решении уравнения теплопроводности для многослойного микронагревателя. Выделены основные стадии вскипания воды: стадия пузырькового распада, стадия пребывания основного парового пузыря, и стадия образования пузыря-сателлита, образующегося после схлопывания основного парового пузыря. Все стадии представлены на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость интенсивности отраженного света от времени для различных времен нагрева при вскипании воды:

*a*)  $q_{eff} = 330.33 \text{ MBt/m}^2$ , dT/dt = 19.98 MK/c,  $t_{\text{имп}} = 9.118 \text{ MKc}$ ;  $\delta$ )  $q_{eff} = 1318.63 \text{ MBt/m}^2$ , dT/dt = 158.72 MK/c,  $t_{\text{имп}} = 1.802 \text{ MKc}$ ;  $\epsilon$ )  $q_{eff} = 2439.49 \text{ MBt/m}^2$ , dT/dt = 341.81 MK/c,  $t_{\text{имп}} = 1.084 \text{ MKc}$ 

Определена зависимость температуры начала вскипания воды без добавления наночастиц кремния от скорости роста температуры на микронагревателе, рис. 4. На рисунке пунктирной линией приведена зависимость [5]: T<sub>lim</sub>/T<sub>cr</sub>=0.905+0.095.(T<sub>sat</sub>/T<sub>cr</sub>)<sup>8</sup> для предельной температуры перегрева жидкости, сплошной линией показана линия спинодали [6].



Рис. 4. Температуры начала пузырькового распада воды в зависимости от скорости роста температуры жидкости перед началом распада

Полученные данные показывают высокую эффективность применения оптического метода для исследования динамики взрывного кипения воды на микронагревателе. С использованием этого метода получены температура начала пузырькового распада жидкости, время жизни основного парового пузыря и пузыря-сателлита. Дальнейшим направлением исследований является получение характеристик пузырькового распада воды с добавками наночастиц диоксида кремния.

Исследование выполнено за счет средств КПФИ СО РАН Междисциплинарные интеграционные исследования, проект 5.3.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao Z., Glod S. and Poulikakos D. Pressure and Power Generation during Explosive Vaporization on a Thin-Film Microheater // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2000. - Vol. 43. - P. 281-296.

2. Hong J., Ashgriz N. and Andrews J. Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse heating // J. Heat Transfer. -2004. - Vol. 126 (2). - P. 259-271.

3. Kuznetsov V. V., Kozulin I. A. Explosive vaporization of a water layer on a flat microheater // Journal of Engineering Thermophysics. -2010. - V.19, (2). -P.102-109.

4. Bhaskar E. V. and Aden J. S. Development of the thin-film structure for the ThinkJet printhead // Hewlett-Packard Journal. – 1985. – Vol. 36. – N5. – P. 27-33.

5. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. – М.: Наука, – 1972. – 312 с.

6. Skripov P. V., Skripov A. P. The phenomenon of superheat of liquids: in memory of Vladimir P. Skripov // Int. J. Thermophys. – 2010. – Vol. 31 (4–5). – P. 816–830.

#### REFERENCES

1. Zhao, Z., Glod, S. & Poulikakos, D. (2000). Pressure and Power Generation during Explosive Vaporization on a Thin-Film Microheater. International Journal of Heat and Mass Transfer. 43 (2), 281-296.

2. Hong, J., Ashgriz, N. & Andrews, J. (2004). Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse heating. Journal of heat transfer. 126 (2), 259-271.

3. Kuznetsov, V. V., & Kozulin, I. A. (2010). Explosive vaporization of a water layer on a flat microheater. Journal of Engineering Thermophysics. 19 (2), 102-109.

4. Bhaskar, E. V. & Aden, J. S. (1985). Development of the thin-film structure for the ThinkJet printhead. Hewlett-Packard Journal. 36 (5), 27-33.

5. Skripov, V.P. (1974). Metastable liquids. John Wiley & Sons.

6. Skripov, P. V. & Skripov, A. P. (2010). The phenomenon of superheat of liquids: in memory of Vladimir P. Skripov. International Journal of Thermophysics. 31 (4–5), 816–830.

© И. А. Козулин, В. В. Кузнецов, В. И. Орешкин, 2018

### СОДЕРЖАНИЕ

1. В. Н. Легкий, С. А. Буднов, О. В. Санков, И. В. Борисова,
В. Г. Эдвабник. Адаптивные оптоэлектронные приборы летательных
аппаратов
2. Е. В. Иванова, А. В. Шабурова. Вопрос участия оптометрии
в сохранении зрения
3. О. К. Ушаков, П. В. Петров, В. А. Павленко, Е. Г. Бобылева.
Контроль параллакса в телескопических системах
4. К. В. Генералов, В. М. Генералов, М. В. Кручинина, Г. В. Шува-
лов, Г. А. Буряк, А. С. Сафатов, О. В. Минин, И. В. Минин. Способ оп-
ределения массы частицы методом диэлектрофореза
5. Г. В. Шувалов. Разработка, создание и применение приборов
контроля и мониторинга качества нефтепродуктов
6. О. В. Гриикевич, Е. О. Ушакова. Исследование направлений
снижения времени на предпроизводственную стадию жизненного
шикла технических систем
7. Г. В. Шувалов. И. В. Минин. О. В. Минин. М. Г. Клековкина.
Т. В. Васильева. О. А. Ясырова. Метрологическое обеспечение экс-
пресс-анализа параметров нефтепродуктов
8. М. П. Егоренко. В. С. Ефремов. Возможность применения жил-
костей в оптических системах для видеокамер нанодронов
9. Г. В. Шувалов, И. В. Минин, О. В. Минин, В. М. Генералов,
М. В. Кручинина, А. С. Сафатов. Метрологическое обеспечение био-
и нанотехнологий
10. М. П. Егоренко, В. С. Ефремов. Двухспектральная оптическая
система для видеокамер нанодронов-квадрокоптеров
11. А. С. Толстиков, А. В. Блукке. Компенсация эффектов от тем-
пературных дрейфов антенного поля ФГУП СНИИМ на основе при-
менения спутниковых навигационных технологий
12. В. П. Ющенко, В. А. Блинов, В. Н. Легкий, С. А. Литвиненко,
Л. В. Шебалкова. Прямолинейный апертурый синтез в томографии
13. Г. В. Симонова, С. А. Степанова, Е. П. Хлебникова. Разработ-
ка метода статистических цифровых эталонов для контроля микро-
структуры функциональных керамических материалов
14. Н. А. Вихарева. Исследование характеристик теплометриче-
ской установки по измерению коэффициента черноты 75
15. А. Д. Безпалый, А. С. Перин, А. Е. Мандель, В. М. Шандаров.
Исследование формирования канальных волноводных структур с раз-
личной топологией в приповерхностной области электрооптических
кристаллов

16. Р. К. Насыров. Разработка дифракционной оптики для на-	84
17. А. В. Бритвин, Н. С. Никитенко, В. Ф. Плюснин, А. В. Пова-	
жаев, Б. В. Поллер. Исследования по полимерной нанофотонике для	
синтеза сенсорных и телекоммуникационных устройств	
18. С. Л. Микерин, А. И. Плеханов, А. Э. Симанчук, А. В. Якиман-	
ский, В. В. Шелковников, Н. А. Валишева. Компактный планарный	
волноводный модулятор на основе электрооптических полимеров	
19. С. Л. Микерин, В. Д. Угожаев. Интерферометрическая систе-	
ма для записи двумерных фотонных кристаллов с независимо варьи-	
руемыми периодами	101
20. Д. И. Деревянко, В. П. Корольков, В. В. Шелковников. Иссле-	
дование механических свойств нового гибридного фотополимерного	
материала для фоторепликации	108
21. М. С. Хайретдинов, Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Д. Я. Машни-	
ков. Акустооптическое взаимодействие на инфранизких частотах	113
22. А. Д. Назаров, В. Г. Приходько, И. В. Ярыгин. Измерение вол-	
новых характеристик пристенной пленки этанола при ее истечении	
с высокоскоростным спутным потоком газа из осесимметричного ка-	
нала в вакуум	123
23. Д. А. Белоусов, В. П. Корольков, Р. К. Насыров. Формирование	
и характеризация тестовых синусоидальных решеток для производст-	
венного контроля конформальных элементов	129
24. Р. К. Насыров. А. Г. Седухин. Исследование устойчивости	
к разъюстировке сверхразрешающего зеркально-дифракционного объ-	
ектива	134
25. А. Г. Седухин. Организация лвухволнового режима работы вы-	
сокоапертурного зеркально-лифракционного объектива	138
26. Р. В. Шиманский, В. П. Корольков, А. Е. Качкин, Оптический	
профилометр на основе интерферометра линника для измерения тол-	
шины пленок глубины и формы рельефа	144
27 Л А Белоусов В П Корольков Контроль лифракционной эф-	
фективности в отраженном свете лифракционных структур рассчи-	
танных на пропускание	151
28 Ю II Батомункуев П С Оргов Разработка лифракционного	101
элемента с уменьшенными неравномерностями пространственного	
паспреления интенсивности	156
29 Н Ж Жерибара Г Ж Лорусура Спектральный метол	150
	162
$30 \Gamma A Пенкова Бинарине структуры в лифракционно-$	102
лефпакционных упустациках глаза	166
31 C H IIIanau 2000 K R Sautu vo Unotenuto Notenuto Pour	100
л. С. 11. Ширипсович, М. Б. Зийчко. инслепное моделирование репиции затухация оптинеского ролокиа при розлейстрии различни у	
воли инизгранулания оптического волокпа при возденствии различных	172
	173
0.57	

32. М. П. Егоренко, В. С. Ефремов. Особенности оптической сис-	
темы при использовании технологии 3D печати	178
33. В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, О. В. Киселёва. Устройство	
для исследования оптических свойств жидкостных элементов	183
34. А. С. Шамирзаев, В. В. Кузнецов. Теплофизические исследо-	
вания конденсации хладагента R-21 в условиях опускного течения	
в микроструктурированном теплообменнике	187
35. А. Н. Павленко, А. С. Суртаев, В. С. Сердюков, О. А. Володин.	
Особенности пленочного течения жидкого азота по единичным эле-	
ментам структурированных насадок	193
36. В. В. Петров, Г. В. Купиов, А. В. Лаптев, В. А. Петров,	
Е. В. Пестряков. Исследование термооптических искажений в актив-	
ных элементах криогенного мультилискового усилителя с мошной	
лиолной накачкой	199
37 В И Жуков Л А Швенов А Н Павленко Влияние на тепло-	177
обмен структурообразования при кипении и испарении в тонких гори-	
зонтальных слоях жилкости	209
38 В В Кузнешов А С Шамирзаев Капиппярно-гравитационная	207
неустойчивость в микроструктурированных аппаратах с большой	
произволительностью	215
$39 \ R \ K_{V24PUOP} \ \Gamma \ R \ Барткус \ И \ A \ K_{O2V7U4} \ Применение оп-$	213
THERE WE METODO THE RECEPTOR THE TOTAL THE STREET THE THERE THE THE THE THE THE THE THE THE THE TH	
обмена в микроструктурированных аппаратах	220
AO + U = Dayapray A + Dagaparo B + Wyyog A = Hazapog	220
40. П. И. Печеркин, А. П. Пивленко, В. Е. Муков, А. Д. Пизиров, $\Gamma$ Маски П. Уоримон Влияние формы поперенного сенения колонны	
из эффектириости разделения бинарной смеси на стриктирирораниих	
на эффективность разделения бинарной смеси на структурированных	226
A1 A C Farmana Dauguno Northering house	220
41. А. С. Вилтиулови. Блияние модифицирования наночастицами	222
$A_2 = M$ $H_{\mu\nu}$ $B_1 = A$ $B_2$ $H_{\mu\nu}$ $C_2 = H_{\mu\nu}$ $H_{\mu\nu}$	233
42. Д. М. Никулин, В. А. Раихерт, С. Л. Шергин. Исследование	
макета полоскового микроволновода для использования его в качестве	227
перестраиваемой дифракционной решетки	237
43. О. А. Волооин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко, Н. Н. Зуоков.	
Интенсификация теплооомена при гравитационном течении пленки	244
жидкости микроструктурированием теплоотдающеи поверхности	244
44. И. А. Козулин, В. В. Кузнецов, В. И. Орешкин. Динамика взрыв-	0.50
ного кипения воды при сверхвысоких скоростях роста температуры	250

### CONTENTS

1. V. N. Legkiy, S. A. Budnov, O. V. Sankov, I. V. Borisova,	
V. G. Edvabnik. Adaptive Optoelectronic Devices for Aircraft	3
2. E. V. Ivanova, A. V. Shaburova. Question of Participation of Op-	
tometry in Viewing the Vision	12
3. O. K. Ushakov, P. V. Petrov, V. A. Pavlenko, E. G. Bobyleva. Con-	
trol Parallax in Telescopic Systems	16
4. K. V. Generalov, V. M. Generalov, M. V. Kruchinina,	
G. V. Shuvalov, G. A. Buryak, A. S. Safatov, O. V. Minin, I. V. Minin. Parti-	
cles Masses Measurement Method Using Dielectrophoresis	21
5. G. V. Shuvalov. Development, Creation and Use of Devices of Con-	
trol and Monitoring of Quality of Oil Products	27
6. O. V. Gritskevich, E. O. Ushakova. Research of Time Decrease	
Methods for the Preproduction Life Cycle of Technical Systems	33
7. G. V. Shuvalov, I. V. Minin, O. V. Minin, M. G. Klekovkina,	
T. V. Vasyljva, O. A. Yasyrova. Metrological Support of the Express Analy-	
sis of Parameters of Oil Products	37
8. M. P. Egorenko, V. S. Efremov. The Possibility of Application	
of Liquids in Optical Systems for Cameras Andronov	43
9. G. V. Shuvalov, I. V. Minin, O. V. Minin, V. M. Generalov,	
M. V. Kruchinina, A. S. Safatov. Metrological Support of Biot- and Nano-	
technologies	47
10. M. P. Egorenko, V. S. Efremov. Two Spectral Optical System	
for Video Cameras Nanodrons-quadcopters	52
11. A. S. Tolstikov, A. V. Blukke. Compensation of Effects of Tem-	
perature Grafov Antenna Field of the Fsue Sniim Based on the Use of Sat-	
ellite Navigation Technologies	56
12. V. P. Yushchenko, V. A. Blinov, V. N. Legky, S. A. Litvinenko,	
L. V. Chebelkova. Rectilinear apertury synthesis in tomography	62
13. G. V. Simonova, S. A. Stepanova, E. P. Khlebnikova. Development	
the Method of Digital Measurement Standards for the Control Microstruc-	
ture of Functional Ceramic Materials	69
14. N. A. Vikhareva. Investigation of the Characteristics of a Thermo-	
metric Installation as Measured by Coefficient of Blackness	
15. A. D. Bezpaly, A. S. Perin, A. E. Mandel, V. M. Shandarov. Inves-	
tigation of Formation of Channel Waveguide Structures with Different To-	
pology in Surface Area of Electro-optical Crystals	80
16. R. K. Nasyrov. Development of Diffractive Optics for Alignment	
of Optical Systems.	84

17. A. V. Britvin, N. S. Nikitenko, V. F. Plyusnin, A. V. Povazhaev,	
B. V. Poller. Research on Polymer Nanophotonic for Synthesis of Sensor	
and Telecommunication Devices	
18. S. L. Mikerin, A. I. Plekhanov, A. E. Simanchuk, A. V. Yakimansky,	
V. V. Shelkovnikov, N. A. Valisheva. Compact Planar Waveguide Modula-	
tor Based on Electro-optic Polymers	
19. S. L. Mikerin, V. D. Ugozhaev. Interferometric System for Recording	
of Two-Dimensional Photonic Crystals with Independently Variable Periods	101
20. D. I. Derevyanko, V. P. Korolkov, V. V. Shelkovnikov. Study	
of Mechanical Properties of a New Hybrid Photopolymeric Material	
for Photoreplication	108
21. M. S. Khairetdinov, B. V. Poller, A. V. Britvin, D. Y. Mashnikov.	
Acoustooptic Interaction on Low Frequencies	113
22. A. D. Nazarov, V. G. Prikhodko, I. V. Yarygin. Wave Characteris-	
tics Measurement of Near-wall Ethanol Film Under Ejecion into Vacuum	
with High-Velocity Co-current Gas Flow from the Axisymmetric Channel	123
23. D. A. Belousov, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov. Manufacturing and	
Characterization of Sinusoidal Grating Test Patterns for Production Inspec-	
tion of Conformal Elements	129
24. R. K. Nasyrov, A. G. Sedukhin. Investigation of the Stability	
to Misalignment of a High-resolution Mirror-diffraction Objective	134
25. A. G. Sedukhin. Implementing the Two-wavelength Operation	
of a High-numerical-aperture Mirror-diffractive Objective Lens	138
26. R. V. Shimansky, V. P. Korolkov, A. E. Kachkin. Optical	
Profilometer Based on the Linnik Interferometer for Measuring the Films,	
Depths and the Form of the Relief	144
27. D. A. Belousov, V. P. Korolkov. Diffractive Efficiency Control	
in Reflected Radiation for Diffraction Structures Designed for Transmis-	
sion Mode	151
28. Yu. Ts. Batomunkuev, P. S. Orlov. Design of a Diffraction Element	
with Reduced Non-measurements of Spatial Distribution of Intensity	156
29. N. J. Jeenbaev, G. J. Dorjueva. Spectralmethod for Natural	
Water of Grand Chui Channel Analysis	162
30. G. A. Lenkova. Binary Structure in Time-Refraction Lens Eyes	166
31. S. N. Sharangovic, K. V. Zaichko. Numerical Simulation of the	
Size of Difficulty of the Optical Fiber Under Influence of Various Doses	
of Ionizing Radiation	173
32. M. P. Egorenko, V. S. Efremov. Features of the Optical System	
Using 3D Printing Technology	178
33. V. S. Efremov, D. G. Makarova, O. V. Kiseleva. Device for Re-	
search the Optical Properties of Liquid Elements	183
34. A. S. Shamirzaev, V. V. Kuznetsov. Thermophysical Study	
of Heat Transfer During Downflow Condensation Refrigerant R-21	
in Microstructured Heat Exchanger	187

35. A. N. Pavlenko, A. S. Surtaev, V. S. Serdyukov, O. A. Volodin. Fea-	
tures of Liquid Nitrogen Film Flow on Single Elements of Structured	
Packings	193
36. V. V. Petrov, G. V. Kuptsov, A. V. Laptev, V. A. Petrov,	
E. V. Pestryakov. Investigation of Thermo-Optical Distortions in Active	
Media of Cryogenic Multidisc Diode-Pumped Amplifier	199
37. V. I. Zhukov, D. A. Shvetsov, A. N. Pavlenko. Effect on Heat	
Transfer of Structural Formation During Boiling and Evaporation in Thin	
Horizontal Layers of Liquid	209
38. V. V. Kuznetsov, A. S. Shamirzaev. Multiscale Gas-Liquid Flow	
Self-Organization in Microstructured Apparatus with High Capacity	215
39. V. V. Kuznetsov, G. V. Bartkus, I. A. Kozulin. Applying Optical	
Methods to Investigation of Heat Exchange Local Characteristics in	
Microstructured Devices	220
40. N. I. Pecherkin, A. N. Pavlenko, V. E. Zhukov, A. D. Nazarov,	
G. A. Meski, P. A. Houghton. Influence of the Distillation Column Cross	
Section Shape on the Separation Efficiency of the Binary Mixture on Struc-	
tured Packings	226
41. A. S. Bakhtaulova. Investigation Influence of UV Radiation on the	
Radiation Resistance of Epoxy Lacquer Modified by Nanoparticles SiO <sub>2</sub>	
42. D. M. Nikulin, V. A. Ravchert, S. L. Shergin, Study of the Prototyp	
of Strip Mikro Waveguide for Use as a Tunable Diffraction Grating	
43. O. A. Volodin. N. I. Pecherkin. A. N. Pavlenko. N. N. Zubkov. Heat	
Transfer Enhancement at Gravitational Flow of Liquid Film by	
Microstructuring of Heat-Releasing Surface	
44 I A Kozulin V V Kuznetsov V I Oreshkin Dynamic of Explo-	
sive Evaporation of Water During Superhigh Speed of Temperature	
Growth Rate	250

Научное издание

# ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

## XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

## «СИБОПТИКА-2018»

T. 1

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка Н. Ю. Леоновой

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997. Подписано в печать 18.10.2018. Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 15,23. Тираж 100 экз. Заказ 160. Гигиеническое заключение № 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.