

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

СибОптика-2016

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2016

УДК 535
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГУГиТ, Новосибирск
А. В. Шабурова

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем
и оплотехники СГУГиТ, Новосибирск
Д. В. Чесноков

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии
и технологии оптического производства СГУГиТ, Новосибирск
О. В. Минин

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля
2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. ма-
териалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 256 с.

ISBN 978-5-87693-925-8 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-924-1

ISBN 978-5-87693-901-2

В сборнике опубликованы материалы XII Международного научного конгресса «Ин-
терэкспо ГЕО-Сибирь-2016», представленные на Международной научной конференции
«СибОптика-2016».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-925-8 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-924-1

ISBN 978-5-87693-901-2

© СГУГиТ, 2016

Сборник включен в систему РИНЦ.

СИСТЕМА СБОРА ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ

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

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

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

Николай Богданович Миськив

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, лаборант; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, тел. (383)330-64-66, e-mail: nikerx@gmail.com

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)330-87-00, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

Гао Синь

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: gaoxin@tju.edu.cn

Хонг Суй

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: suihong@tju.edu.cn

Бен Цзян

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: binjiang@tju.edu.cn

В работе описывается автоматизированный комплекс регистрации, сбора и хранения данных с системой позиционирования датчиков в заданные координаты измерительного сечения ($0,64 \text{ м}^2$) крупномасштабной экспериментальной дистилляционной установки, работающей с агрессивной смесью фреонов R114 и R21. Приведено описание разработанного расходомера локального капельно-струйного потока под структурированной насадкой и уровнемера течения пленки по внутренней стенке колонны.

Ключевые слова: устройство позиционирования, ректификация, струйно-капельный поток, автоматизация эксперимента, расходомер, высокоскоростная видеосъемка структуры потока.

COLLECTION SYSTEM OF LOCAL FLOW CHARACTERISTICS IN EXPERIMENTAL DISTILLATION COLUMN

Alexandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Sc., Head. the low temperature of the Laboratory of Thermal Physics, tel. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

Alexandr D. Nazarov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., tel. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Vladimir E. Zhukov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Nikolay B. Miskiv

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, assistant; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, K. Marks pr., 20, Student, tel. (383)330-64-66, e-mail: nikerx@gmail.com

Nikolay I. Pecherkin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

Gao Xin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: gaoxin@tju.edu.cn

Hong Sui

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: binjiang@tju.edu.cn

Bin Jiang

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Leading Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: binjiang@tju.edu.cn

The paper describes the automated system with the coordinate sensor positioning system at predetermined coordinates of the measuring section of the large-scale distillation column.

Key words: rectification, jet-droplet stream, movement position device, automation of experiment, flowmeter, high-speed video of stream structure.

Введение

В ряде технологий, использующих оросительные системы, распределение потоков орошающей жидкости по сечению аппарата существенно влияет на его эффективность. Неравномерное распределение жидкости по сечению может привести к ухудшению теплообмена в градирнях, контактных теплообменниках, оросительных конденсаторах, к неравномерному протеканию реакций в химических реакторах, к ухудшению массообмена в насадочных ректификационных колоннах [1 – 3]. Следствием этого является снижение эффективности и надежности работы тепломассообменных аппаратов. Поэтому разработка и создание приборов и методик исследования потоков в таких системах является актуальной задачей.

При диаметре массообменной колонны порядка 1 метра необходимо было в выбранной точке обеспечить сбор локального капельно-струйного потока приемником круглого сечения диаметром не более 30 мм. Условия эксперимента определяли позиционирование приемника с достаточно малым шагом, при котором время эксперимента в зависимости от затрат на перемещение датчиков и набор статистики могло занимать до нескольких десятков часов. Оснащение экспериментальным оборудованием крупномасштабной массообменной установки позволяет проводить исследования по максимально полной экспериментальной программе, не затрачивая время на переборку колонны, и получать полный набор измерительной информации для анализа.

Экспериментальное оборудование

Экспериментальная установка представляет собой массообменную фреоновую колонну со сменными структурированными насадками (рис. 1) высотой 6 метров и диаметром 0.9 метра. Режимы течения потоков задаются системой распределения [3], состоящей из 128 электромагнитных клапанов, открытие и закрытие которых осуществляется индивидуально по программе. Многоканальная система измерения, установленная в трех, различных по высоте сечениях насадки, регистрирует распределение температуры в режиме реального времени. Для исследования локальных параметров потока в колонне после структурированной насадки установлена измерительная секция, включающая в себя комплекс датчиков на устройстве позиционирования.

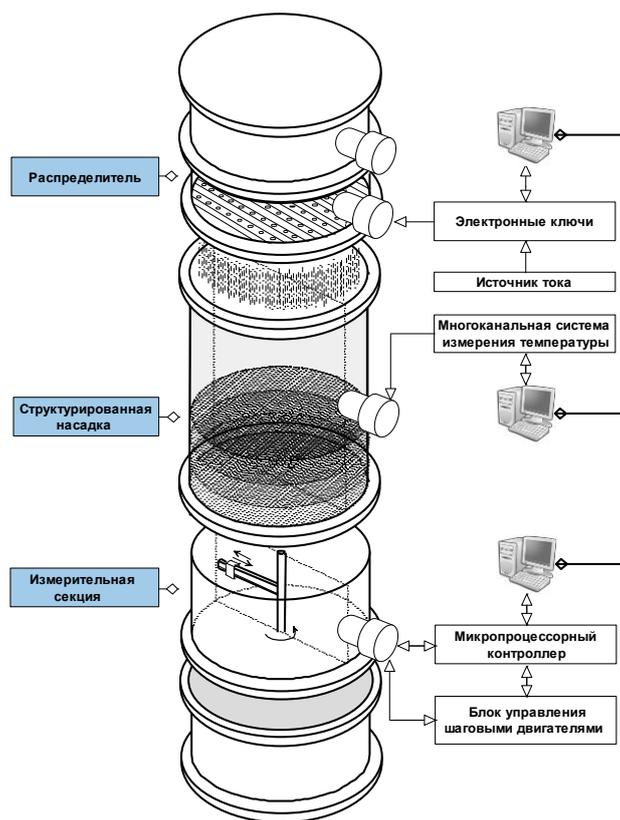


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Система позиционирования представляет собой подвижную каретку, перемещающуюся по направляющим флюгера, который имеет полную ось вращения на 360° в центре колонны. Каретка с датчиками может перемещаться от стенки колонны до оси вращения флюгера. Движение каретки вдоль радиуса и флюгера по азимуту осуществляется двумя шаговыми двигателями ШД-4М с помощью цифрового привода по программе из компьютера. Шаговые приводы соединены с системой редукторов и передают вращательное движение посредством тросовой передачи. Перемещение каретки вдоль радиуса на один шаг двигателя составляет $0,01$ мм, по азимуту – $0,02^\circ$. Для ограничения движения флюгера и каретки, а так же задания их начального и конечного положений в системе редукторов шаговых двигателей устанавливаются концевые выключатели. Положение каретки с измерительными приборами контролируется при помощи потенциометров, подвижные выводы которых вращаются с шаговыми двигателями. Путь обхода, минимальное перемещение между точками измерения по радиусу и углу задается с компьютера оператором эксперимента.

На подвижной каретке измерительной секции (рис. 2) установлен локальный измеритель пленочного потока, разработанный для регистрации жидкости, распространяющейся по внутренней стенке колонны; локальный расходомер струйно-капельного потока, предназначенный для измерения локального расхода жидкости, стекающей из нижней части насадки; отборник жидкости для спектрометра и электронный термометр, регистрирующий локальную температуру потока.

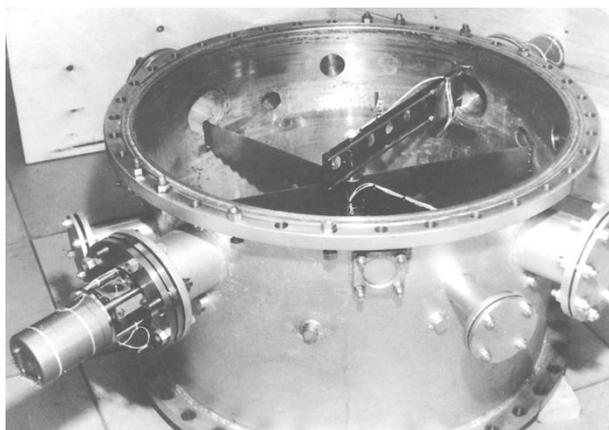


Рис. 2. Измерительная секция

Принцип действия расходомера локального потока основан на измерении средней скорости потока в трубопроводе с известной площадью поперечного сечения. Скорость жидкости в калиброванном трубопроводе определяется по времени дрейфа парового пузыря от генератора до оптоэлектронной пары регистратора метки. Диапазоны расхода для пузырькового расходомера и пристенного уровнемера составляют $10 \text{ см}^3/\text{с}$ и $1,5 \text{ см}^3/\text{с}$ соответственно. Погрешность измерения локального потока под насадкой и на стенке колонны составляет 3 %.

Для регистрации структуры и параметров паро-капельного потока на входе и выходе структурированной насадки также используется метод высокоскоростной видеосъемки с использованием камеры Phantom 7.0, осуществляемой через оптические окна, установленные в разных секциях дистилляционной колонны. Данная монохромная видеокамера дает возможность производить видеосъемку со скоростью 4800 кадров в секунду при разрешении 800×600 и разрядности 12 бит.

На рис. 3 приведена схема обхода сечения колонны под насадкой, датчиками, установленными на каретке системы позиционирования. На рис. 4 показано распределение локального расхода смеси под насадкой по сечению колонны.

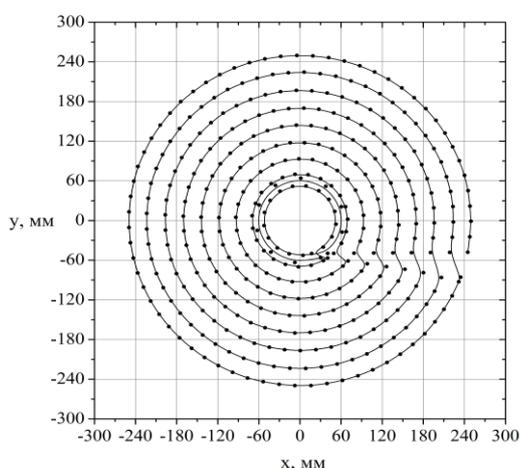


Рис. 3. График измерительных точек

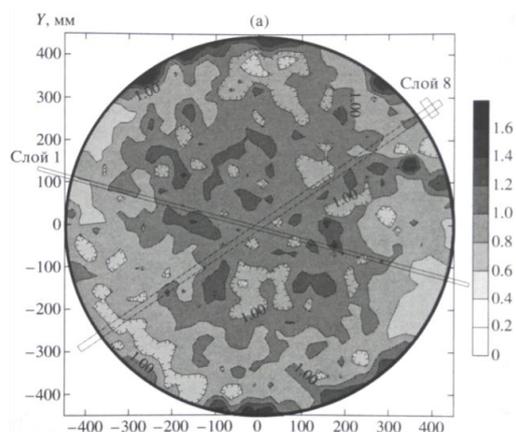


Рис. 4. Распределение локального расхода по сечению под насадкой

Заключение

В работе описан разработанный автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий исследовать параметры капельно-струйного потока и концентрации смеси рабочей жидкости в теплообменных аппаратах. Созданный комплекс позволяет автоматически проводить измерения параметров длительные промежутки времени, получать и хранить данные от единиц до тысячи измерений по выбранному оператором пути обхода и шагом по радиусу и углу.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Chekovich V.Yu., Zhukov V.E., Sunder S., Houghton P., Serov A.Ф., Nazarov A.D. Large industrial-scale model of structured packing distillation column // Journal of engineering thermophysics. 2005. Vol. 13. No.1. P. 1-18.
2. 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. Is. 2. P. 690-705.
3. Павленко А.Н., Жуков В.Е., Печеркин Н.И., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Миськив Н.Б., Li X., Jiang B., Sui H., Li H., Gao X. Экспериментальное исследование эффективности разделения смесей при дистилляции на структурированной насадке с использованием динамически управляемого распределителя жидкости // 2015. Сборник докладов “XXXII Сибирский теплофизический семинар”. P. 216-217.

© А. Н. Павленко, А. Д. Назаров, В. Е. Жуков, Н. Б. Миськив,
Н. И. Печеркин, Гао Синь, Хонг Суй, Бен Цзян, 2016

ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИСТЕННЫХ ПЛЕНОК ЖИДКОСТЕЙ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

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, тел. (383)330-70-50

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, тел. (383)330-70-50

Вячеслав Николаевич Ярыгин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, проф., главный научный сотрудник, тел. (383)330-86-15, e-mail: yarygin@itp.nsc.ru

В работе представлена методика измерения толщин и скоростей пристенных пленок жидкостей, истекающих с высокоскоростным (сотни метров в секунду) спутным газовым потоком из осесимметричных каналов в вакуум. Показано, что спутный газовый поток оказывает сильное воздействие на пристенную пленку, приводя к интенсивному волнообразованию, а также срыву капель с поверхности пленки.

Ключевые слова: емкостные датчики, пристенная пленка, толщина, скорость, спутный поток.

MEASUREMENTS OF NEAR-WALL LIQUID FILM LOCAL PARAMETERS IN THERMO-PHYSICAL EXPERIMENTS

Alexandr D. Nazarov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Senior Scientific Researcher, tel. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Victor G. Prikhodko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior Scientific Researcher, tel. (383)330-70-50

Igor V. Yarygin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior Scientific Researcher, tel. (383)330-70-50

Vyacheslav N. Yarygin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Chief Scientific Researcher, tel. (383)330-86-15, e-mail: yarygin@itp.nsc.ru

The method for measuring thickness and velocity of a near-wall liquid film flowing together with high-velocity (hundreds of meters per second) co-current gas flow from axially symmetric channels into vacuum is presented in the paper. It is shown that co-current gas flow has a strong impact on the near-wall film, leading to intense wave formation, as well as detachment of droplets from the film surface.

Key words: capacitive-type probes, near-wall film, thickness, velocity, co-current gas flow.

Течение жидкости в виде тонких пленок (толщиной менее 1 мм) широко используется в различных тепло- массообменных аппаратах и устройствах (конденсация неподвижного и движущегося пара, абсорбция и десорбция газа, сушка, дистилляция, фракционирование, транспорт природного газа по газопроводу и т.д.). Другое важное приложение пленочных течений – защита стенок от воздействия высокотемпературного газового потока (например, использование пристенной топливной пленки в жидкостных ракетных двигателях для тепловой защиты камеры сгорания и сверхзвукового сопла, инъекция жидкого охладителя в лобовую точку в условиях аэродинамического нагрева).

При экспериментальном моделировании взаимодействия пристенной пленки жидкости с газовым потоком большое значение имеют методы измерения локальных параметров пристенной пленки, таких как толщина и скорость. Именно эти параметры характеризуют силовое и тепловое воздействие газового потока на пристенную пленку. Даже при малых скоростях спутного потока пленка жидкости теряет устойчивость и на ее поверхности образуются капиллярные волны, в то время как без спутного потока течение пленки является ламинарным. Увеличение скорости спутного газового потока усиливает межфазное взаимодействие, приводя к формированию двух- и трехмерных волн на поверхности пленки.

К настоящему времени опубликовано большое количество работ по течениям пленок жидкостей [1]. Большинство из них посвящены исследованиям гравитационных пленок. Во многих работах также описывают стрессовые течения пленок, то есть течения, при которых пленка движется под действием касательного напряжения со стороны спутного газового потока. Однако, подавляющее большинство этих экспериментов проведено при относительно низких скоростях спутного потока, порядка 10 м/с. В данной работе исследования взаимодействия спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости выполнены при высоких, включая сверхзвуковые, скоростях газового потока. Так, при использовании сверхзвукового сопла с геометрическим числом Маха $M = 3$ в качестве рабочего участка скорость спутного потока на срезе сопла составляла около 540 м/с, а использование рабочего участка с цилиндрической трубкой

позволило провести измерения в диапазоне скоростей спутного газового потока от 10 до 300 м/с.

В настоящее время существует довольно много методов измерения локальных характеристик пристенных пленок, в первую очередь их толщин. Обзор этих методов можно найти, например, в [1]. В данной работе измерения локальных параметров пристенной пленки жидкости проводились с помощью зондов емкостного типа. Схема рабочего участка приведена на рис. 1.

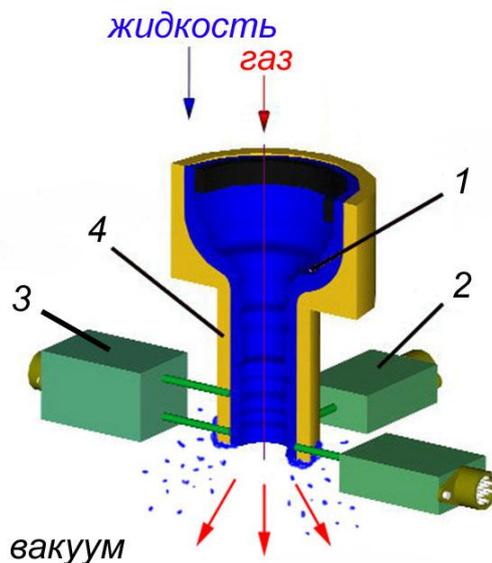


Рис. 1. Схема рабочего участка:

1 – пленка жидкости, 2 – датчик для измерения толщины,
3 – датчики для измерения толщины и скорости, 4 – корпус

Для измерения скорости движения пристенной пленки использовались два последовательно расположенных зонда 3, для измерения толщины – четыре зонда 2, расположенных через 90° вблизи выходного сечения канала. В данной работе использовались коаксиальные емкостные датчики с диаметром внешнего электрода 1,6 мм, внутреннего – 0,5 мм. Частота опроса каждого датчика составляла 1 кГц. Описание принципа работы и методики измерения можно найти в [2].

Измерения толщины и скорости пристенной пленки жидкости в рамках данной работы проводились вблизи выходного сечения цилиндрического канала (рис. 1) диаметром 10 мм и длиной 20 мм. В качестве рабочего газа использовался воздух, в качестве рабочей жидкости – этанол. Начальные температуры газа и жидкости составляли около 20°C . Работа проводилась на Вакуумном газодинамическом комплексе Института теплофизики СО РАН. Большой объем рабочей камеры установки ВИКИНГ (около 150 м³) обеспечивает широкие возможности для работы в импульсных режимах. Длительность импульса в экспериментах не превышала, как правило, 5 секунд, при этом давление в вакуумной камере поднималось на величину, не превышающую 0,1 Па. Рабочий участок устанавливался внутри вакуумной камеры вертикально, выходным се-

чением вниз. Скорость спутного потока менялась в диапазоне 10-300 м/с (путем измерения давления в вакуумной камере), массовый расход газа – от 0,5 до 20 г/с. Характерный расход жидкости составлял 0,6-2 г/с.

При проведении исследований большое внимание было уделено тарировке емкостных датчиков. Обычно тарировка таких датчиков проводится в стационарных условиях, когда над поверхностью зонда создается пленка определенной толщины (которую можно измерить, например, контактным способом). Такой способ тарировки не подходит для криволинейных поверхностей, в частности, цилиндрического канала. Поэтому была применена схема с использованием втулок из диэлектрика, которые плотно вставлялись в канал и имели проточку заданной глубины над зондом, заполняемую жидкостью. Этот способ позволил получить тарировочные кривые для датчиков с учетом их заделки относительно поверхности канала. В результате суммарная погрешность измерения толщин пленок не превышала 10%.

Использованная схема с двумя последовательно расположенными датчиками позволяет проводить измерения скорости пленки. На рис. 2 приведена типичная диаграмма толщины пленки в промежутке времени от 700 мс до 1200 мс по показаниям двух последовательных зондов.

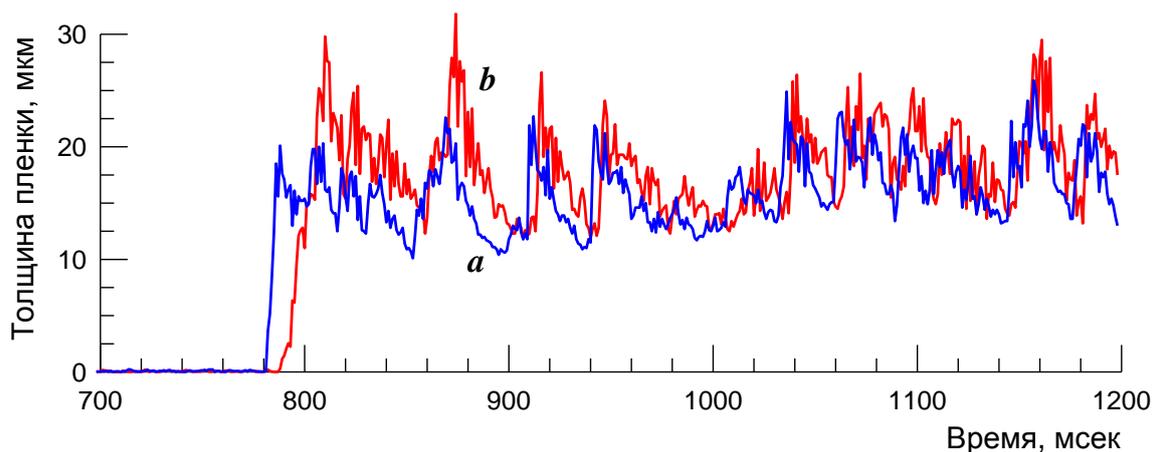


Рис. 2. Толщина пленки жидкости, измеренная двумя последовательными датчиками:

a – первый (верхний) датчик, *b* – второй (нижний) датчик

Наблюдается корреляция показаний по амплитуде и форме сигналов. По временному сдвигу между пиками волн при известном расстоянии между зондами (5 мм) можно определить скорость крупных волн на поверхности пленки, а по разнице между моментами прихода пленки на зонды – скорость переднего фронта пленки. На рис. 3а показана зависимость скоростей волн и переднего фронта для пленки этанола в зависимости от числа Рейнольдса спутного газового потока, на рис. 3б – толщины.

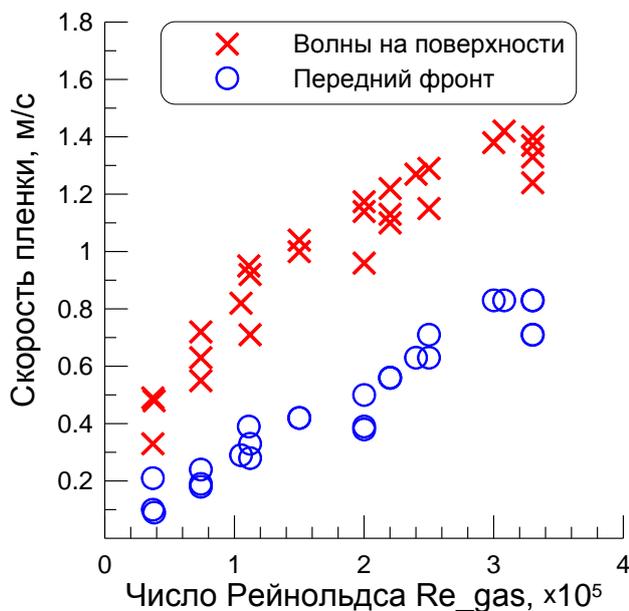


Рис. 3а. Скорость пленки этанола

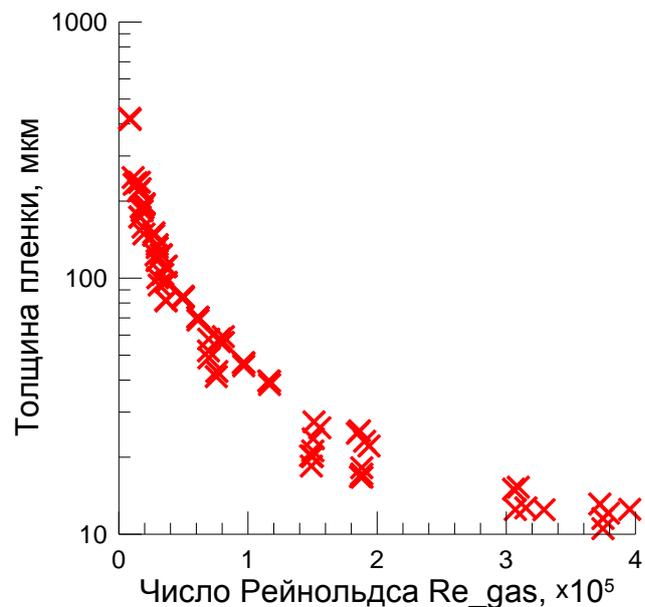


Рис. 3б. Толщина пленки этанола

Сделаем несколько комментариев по представленным данным. Из рис. 2 можно видеть наличие некоторой периодической волновой структуры с характерным временным масштабом ≈ 40 мс (частотой ≈ 25 Гц). Видно также, что волны имеют крутой фронт, а затем идет пологая часть, на поверхности которой движутся более мелкие волны. Из представленных на рис. 3а данных видно, что при одних и тех же значениях числа Рейнольдса спутного газового потока скорости волн на поверхности пленки примерно в 2 раза выше скорости переднего фронта. Это можно легко объяснить, если считать распределение скорости по толщине пленки линейным, а именно: скорость равна нулю на стенке (прилипание), и скорость на поверхности равна скорости крупных волн. В этом случае средняя скорость пленки жидкости (которую можно приравнять к скорости переднего фронта) будет равна половине от скорости на поверхности. Из рис. 3а и 3б видно, что спутный поток оказывает определяющее влияние на пристенную пленку. Так, при увеличении числа Рейнольдса спутного газового потока от $1 \cdot 10^4$ до $3,5 \cdot 10^5$ средняя скорость пристенной пленки жидкости возрастает примерно с 0,1 до 0,8 м/с, а толщина пленки уменьшается при этом с 300-400 мкм до примерно 15 мкм. Кроме того, было установлено, что наряду с ускорением пристенной пленки под действием спутного газового потока в экспериментах наблюдается и другой процесс – срыв жидкости с поверхности пленки в виде капель и их унос спутным потоком. При этом количество уносимой жидкости хорошо обобщается по числу Вебера спутного газового потока, и, в зависимости от условий эксперимента, может достигать 60 % от начального расхода жидкости.

В работе показана возможность использования датчиков емкостного типа для измерения локальных параметров пристенных пленок жидкостей, истекающих с высокоскоростным (в том числе и сверхзвуковым) спутным газовым потоком из осесимметричных каналов в вакуум. Проведенные исследования позволили измерить средние толщины и скорости пристенной пленки, а также установить особенности ее взаимодействия со сверхзвуковым градиентным потоком газа (волнообразование, срыв капель с поверхности пленки, их дробление и унос спутным потоком).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант 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. 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.

© А. Д. Назаров, В. Г. Приходько, И. В. Ярыгин, В. Н. Ярыгин, 2016

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ

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 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

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

Луонг Чжан

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, тел. (383)330-84-80, e-mail: zhanglvh@tju.edu.cn

Хонг Ли

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-84-80, e-mail: lihong.tju@163.com

В работе представлены результаты изучения особенностей течения и теплообмена в стекающих пленках бинарной смеси хладонов на вертикальных цилиндрах с сетчатыми покрытиями. Показано, что коэффициенты теплоотдачи в режиме испарения на поверхности с сетчатым покрытием возрастают по сравнению с гладкой поверхностью. Интенсификация теплообмена зависит от размера ячеек сетки и их ориентации на поверхности. Кипение на поверхности с сетчатым покрытием начинается при меньших температурных напорах.

Ключевые слова: стекающие пленки, теплообмен, интенсификация, кипение, испарение, сетчатые покрытия.

APPLICATION OF MESH COATING FOR HEAT TRANSFER INTENSIFICATION IN FALLING FILMS

Aleksandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Corresponding Member of RAS, D. Sc., head of Low Temperature Thermophysics Laboratory, tel. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

Nikolay I. Pecherkin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, senior researcher, tel. (383)316-50-49, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

Oleg A. Volodin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, senior researcher, tel. (383)330-87-00, e-mail: volodin@ngs.ru

Luhong Zhang

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Professor, tel. (383)330-84-80, e-mail: zhanglvh@tju.edu.cn

Hong Li

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., senior researcher, tel. (383)330-84-80, e-mail: lihong.tju@163.com

The paper presents the results of flow and heat transfer studying in falling films of binary mixtures of fluorocarbon refrigerants on vertical tubes with mesh coatings. It is shown that the heat transfer coefficients at evaporation on the surface with mesh coating increase as compared with a smooth surface. Heat transfer enhancement depends on the size of the grid cells and their orientation on the surface. Boiling on the surface with mesh coating begins at a lower temperature difference.

Key words: falling liquid film, heat transfer, intensification, evaporation, nucleate boiling, mesh coating.

Пленочные течения жидкости широко используются в различных технологических процессах (абсорбция, ректификация, выпаривание, тепловая защита, охлаждение и др.). Появляются новые приложения исследований, например, получение биотоплива при выпаривании растворов в пленочных аппаратах. Развиваются исследования кипения на поверхностях с нанорельефом, на структурированных поверхностях, а также на поверхностях с сетчатыми покрытиями.

В литературе имеются данные, которые показывают многократную интенсификацию теплообмена в стекающих пленках на структурированных поверхностях. В работах [1, 2] разработана модель теплоотдачи, основанная на испарении микрослоя жидкости на вершинах ребер в верхней части горизонтальной трубы. Результаты моделирования теплообмена и результаты экспериментов при течении пленки хладона R11 на поверхности горизонтальных труб с различной геометрией оребрения показывают, что коэффициенты теплоотдачи в ламинарно-волновом режиме течения увеличиваются с увеличением плотности орошения. Основным механизмом увеличения теплоотдачи является периодическое смачивание ребер на верхней части оребренной трубы волнами возмущения и испарением очень тонкой пленки, возникающей в результате этого процесса. Коэффициенты теплоотдачи в режиме пузырькового кипения на такой поверхности также существенно возрастают по сравнению с гладкой поверхностью. Согласно этой модели, интенсификация теплообмена в режиме испарения ламинарно-волновой пленки хладона R11 на горизонтальной оребренной трубе может достигать восьмикратной величины.

При больших тепловых потоках, в режиме развитого пузырькового кипения, эффективным средством увеличения коэффициентов теплоотдачи является нанесение сетчатого покрытия на оребренную поверхность [3]. Важную роль в интенсификации теплообмена играет комбинация шага и размеров ребер и характеристик металлических сеток.

Установка металлических сеток на поверхности гладких или структурированных труб может также способствовать интенсификации теплообмена. По аналогии с оребрением, толщина пленки на внешней поверхности проволочек сетки может значительно уменьшаться. Испарение микрослоя жидкости как на поверхности проволочек, так и внутри ячейки, при малых расходах жидкости может привести к увеличению коэффициентов теплоотдачи.

В работе приведены результаты экспериментального исследования теплообмена в пленках жидкости, стекающих по вертикальному цилиндру. В качестве рабочей жидкости использовалась смесь хладонов R114/R21. Описание экспериментальной установки и методики измерения приведено в работах [4, 5]. Течение пленки осуществляется по наружной поверхности вертикальных рабочих участков цилиндрической формы длиной 200 мм, диаметром 50 мм. Число Рейнольдса пленки изменялось в диапазоне от 30 до 270. В экспериментах измерялись расход жидкости в пленке, тепловой поток, давление, температура в жидкости и в паровом объеме, состав бинарной смеси, а также проводились визуальные наблюдения и высокоскоростная видеосъемка поверхности стекающей пленки. Жидкость в установке находилась в состоянии насыщения при давлении 2 бар.

Для исследования влияния геометрических характеристик сетчатых покрытий на теплообмен при гравитационном течении пленок жидкости использовались металлические сетки из латуни и нержавеющей стали с различными размерами и ориентацией ячеек. При прямоугольной ориентации ячеек (сетка из латуни и нержавеющей стали) проволочки сетки ориентированы в направлении течения пленки и поперек течения пленки. При ромбовидной ориентации ячеек (латунная сетка) проволочки сетки ориентированы под углом 45° к направлению течения пленки. Сетка из латуни имела размер ячейки 1.6×1.6 мм, из нержавеющей стали – 3×3.3 мм. Сетки устанавливались на рабочий участок из латуни с гладкой поверхностью.

Основное различие в форме расположения ячеек относительно направления течения пленки состоит в характере обтекания жидкостью контактных точек, т. е. точек прилегания узлов сетки к поверхности рабочего участка. На поверхности с ромбовидной формой ячеек контактные точки расположены в шахматном порядке, поэтому жидкость стекает вниз, периодически изменяя направление течения. На поверхности с прямоугольной формой ячеек жидкость в месте контакта сетки со стенкой натекает на горизонтально расположенную проволочку. Далее жидкость растекается в обе стороны и стекает в зазоры под проволочкой в контактных точках соседних ячеек. Различие в режимах течения жидкости в пленке в области контактных точек может влиять на интенсивность теплоотвода от стенки.

Для всех типов сетчатого покрытия при малых расходах жидкости в пленке капиллярные силы стягивают жидкость к проволочкам сетки. При этом по всему периметру ячеек сетки образуются мениски, а в центральной части ячейки происходит уменьшение толщины пленки. При больших расходах количество жидкости в месте натекания на горизонтально расположенную проволочку увеличивается. Жидкость стекает вниз не только в зазоре под проволочкой, но может также перетекать через проволочку. Толщина пленки внутри ячейки значительно возрастает. Для сеток с меньшим размером ячейки заполнение ячеек при увеличении числа Рейнольдса более равномерное.

Результаты экспериментов по теплоотдаче в стекающей пленке смеси хладонов на различных сетчатых покрытиях показаны на рис. 1. Данные представлены в виде зависимости теплового потока q от температурного напора ΔT .

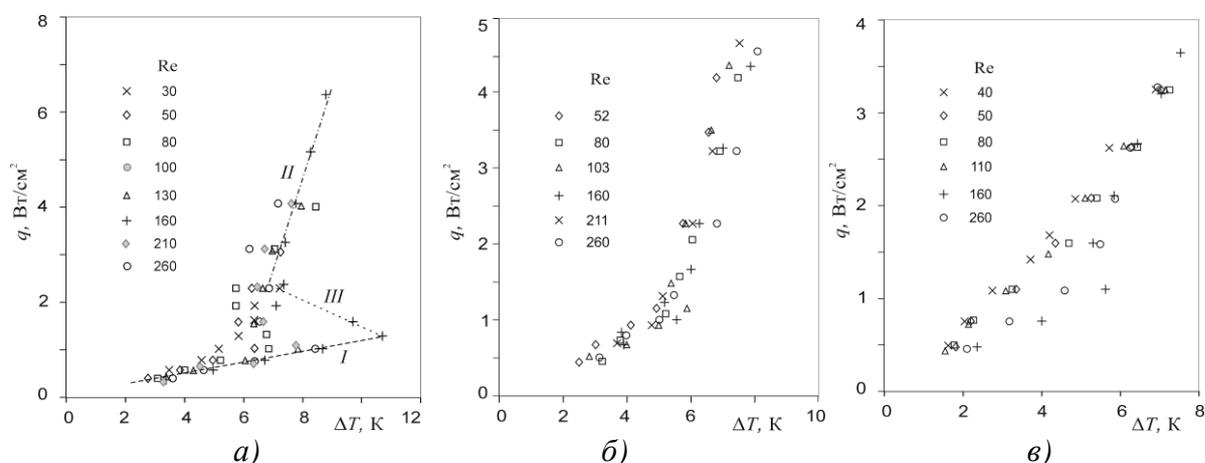


Рис. 1. Зависимость теплового потока от температурного напора между стенкой и жидкостью:

а) гладкая поверхность; б) сетка из латуни, ромбовидная; в) сетка из нержавеющей стали

На графике зависимости q от ΔT для гладкой поверхности, рис. 1а, отчетливо выделяется режим испарения I, режим пузырькового кипения II и переходная область III, сопровождающаяся резким падением ΔT . Характерной особенностью данных по теплообмену на поверхности с сетками является отсутствие падения температурного напора при переходе от режима испарения к пузырьковому кипению, рис. 1б. На поверхности с латунной сеткой переход к пузырьковому кипению начинается при температурном напоре примерно шесть градусов. Зависимость от числа Рейнольдса практически отсутствует и в режиме испарения при тепловых потоках до $1\text{--}1.5 \text{ Вт/см}^2$, и в режиме пузырькового кипения в пленке. На поверхности с сетчатым покрытием из нержавеющей стали, рис. 1в, зависимость теплового потока от температурного напора для чисел Рейнольдса 40–110 практически линейна, т. е. не изменяется при переходе от режима испарения к пузырьковому кипению. При больших числах Рейнольдса

160–260 характер изменения теплового потока от температурного напора становится таким же, как на гладкой поверхности, с небольшим скачком температуры при переходе к пузырьковому кипению. Величина температурного напора при переходе к пузырьковому кипению на всех сетчатых покрытиях оказывается примерно одинаковой, за исключением малых чисел Рейнольдса.

При малых расходах жидкости коэффициенты теплоотдачи для различных сетчатых покрытий в одинаковых условиях зависят от вида сетчатого покрытия, см. рис. 2а. Наибольшие коэффициенты теплоотдачи имеют место на сетке из нержавеющей стали с наибольшим размером ячейки. Наименьшие коэффициенты теплоотдачи получены на латунной сетке с наклонным расположением проволочек относительно течения пленки. При увеличении числа Рейнольдса разница в коэффициентах теплоотдачи на поверхности с различными типами сетчатого покрытия в режиме испарения уменьшается, см. рис. 2б.

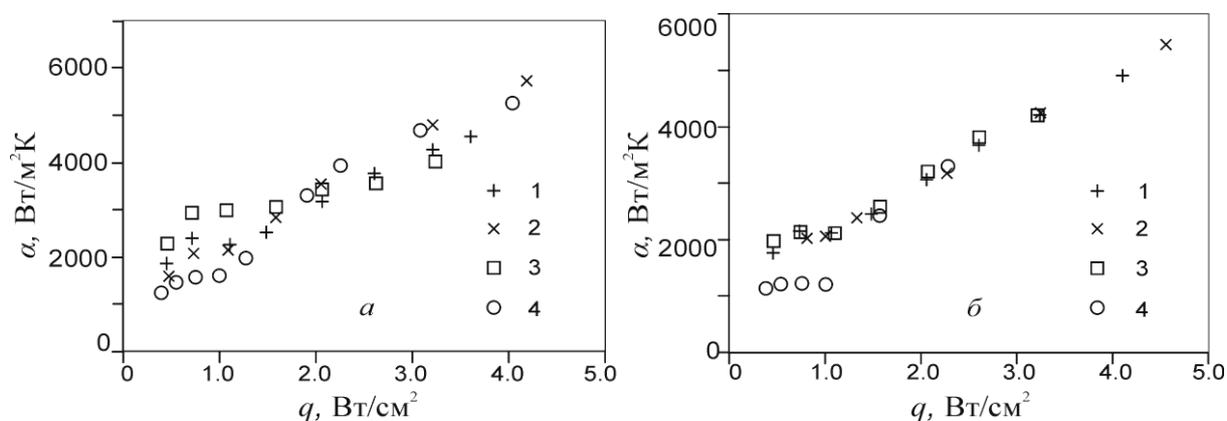


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока на поверхности с сетчатыми покрытиями: а – $\text{Re} = 80$; б – $\text{Re} = 260$:

1 – сетка из латуни, прямоугольная; 2 – сетка из латуни, ромбовидная; 3 – сетка из нержавеющей стали; 4 – гладкая поверхность

При увеличении расхода жидкость начинает перетекать через проволочки сетки, толщина пленки внутри ячеек также увеличивается. Увеличение коэффициентов теплоотдачи с увеличением размера ячейки вероятно обусловлено увеличением удельной поверхности с малой толщиной пленки внутри ячейки. Разница в коэффициентах теплоотдачи на сетке из одного материала с одинаковым размером ячеек, но с различной ориентацией проволочек к направлению течения пленки, обусловлена характером обтекания контактных точек узлов сетки со стенкой трубы. Обтекание горизонтальной проволочки может приводить к увеличению коэффициентов теплоотдачи.

Коэффициенты теплоотдачи на поверхности с сетчатым покрытием в режиме испарения увеличиваются в 1.5–2 раза по сравнению с гладкой поверхностью. Образование менисков вокруг проволочек приводит к увеличению поверхности испарения. Уменьшение толщины пленки внутри ячеек сетки снижа-

ет термическое сопротивление пленки жидкости. Эти факторы являются причинами увеличения теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью.

Опытные данные по кипению стекающей пленки смеси хладонов на поверхностях с сетчатым покрытием были обобщены по аналогии со структурированными поверхностями по модели Гогонина [6], рис. 3.

$$\text{Nu}^* = 0.01 \cdot \text{Re}^{*0.8} \text{Pr}^{1/3} b \cdot K^{0.4} \left(\frac{\lambda c_p \rho'}{\lambda_w c_w \rho_w} \right)^{-0.2} \bar{k}. \quad (1)$$

В качестве характерного масштаба в числах Нуссельта Nu^* и Рейнольдса Re^* в этой модели используется постоянная Лапласа. В качестве характерной скорости используется скорость парообразования. Параметр K характеризует рост паровых пузырей и является комбинацией числа Якоба и безразмерного диаметра пузыря. Коэффициент b учитывает влияние давления. Член в скобках, введенный Якобом, учитывает влияние теплофизических свойств материала стенки.

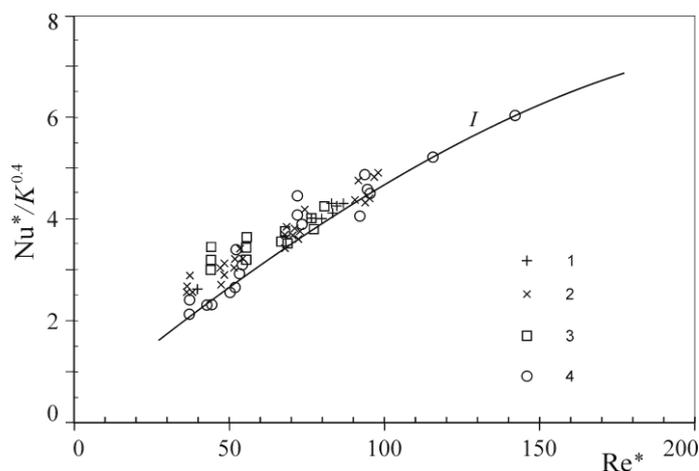


Рис. 3. Теплообмен при кипении на поверхности с сетчатыми покрытиями:

1 – сетка из латуни, прямоугольная; 2 – сетка из латуни, ромбовидная; 3 – сетка из нержавеющей стали; 4 – гладкая поверхность; I – расчет по формуле (1)

Наибольшее отклонение от расчетной модели наблюдается при малых значениях параметра Re^* , соответствующих неразвитому пузырьковому кипению. При больших тепловых потоках совпадение с расчетной моделью удовлетворительное. Наличие сетки на поверхности влияет на начало пузырькового, интенсивность отвода тепла при кипении не изменяется по сравнению с гладкой поверхностью. Для интенсификации теплообмена в режиме пузырькового кипения стекающих пленок необходимо разрабатывать новые поверхности со специальной структурой.

Работа выполнена в ИТ СО РАН за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010): блок исследований по теплообмену на поверхности

с ромбовидной формой ячеек сетки), и РФФИ (грант № 13-08-00527): блок исследований на поверхности с прямоугольной формой ячеек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gambaryan-Roisman T., Stephan P. Heat transfer analysis of falling film evaporation on structured surfaces // Proc. of the 12th International Heat Transfer Conference, Grenoble, France, August 2002. – V. 3. – P. 449–454.
2. Gambaryan-Roisman T., Stephan P. Analysis of falling film evaporation on grooved surfaces // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2003. – V. 10. – P. 445–448.
3. Pastuszko R. Pool boiling on micro-fin array with wire mesh structures // Int. Journal of Thermal Sciences. – 2010. – V. 49. – P. 2289–2298.
4. Печеркин Н. И., Павленко А. Н., Володин О. А. Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 605–616.
5. Павленко А. Н., Печеркин Н. И., Володин О. А. Теплообмен и кризисные явления при кипении в пленках смесей фреонов, стекающих по оребренной трубе // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 2. – С. 143–154.
6. Гогонин И. И. Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести // ИФЖ. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 821–826.

© А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, О. А. Володин,
Луонг Чжан, Хонг Ли, 2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРО- И МИНИКАНАЛЕ

Герман Васильевич Барткус

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, лаборант, 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, научный сотрудник, тел. (923)182-08-97, e-mail: igornt@yandex.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

В работе изучена структура течения смеси вода-азот в прямоугольном миниканале $0,72 \times 1,50$ мм и микроканале с прямоугольным сечением 420×280 мкм. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по визуализации и измерению характеристик газожидкостного течения методами высокоскоростной видеосъемки и методом лазерно-индуцированной флуоресценции.

Ключевые слова: газожидкостное течение, миниканал, микроканал, метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ).

EXPERIMENTAL RESEARCH OF UPWARD GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR MICRO- AND MINICHANNEL

German V. Bartkus

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, tel. (913)750-13-11, laboratory worker, e-mail: germanbartkus@gmail.com

Igor A. Kozulin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., tel. (923)182-08-97, e-mail: igornt@yandex.ru

Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Head Laboratory of multiphase systems, tel. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

The paper studied the flow structure of a water-nitrogen in a rectangular minichannel $0,72 \times 1,50$ mm and a microchannel with a rectangular cross-section 420×280 microns. A complex of experimental studies of visualization and measurements of gas-liquid flow characteristics was carried out using of high-speed video and laser-induced fluorescence method.

Key words: gas-liquid flow, minichannel, microchannel, method of laser-induced fluorescence (LIF).

В данной работе проведено комплексное исследование детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольном миниканале с сечением 0.72×1.50 мм и микроканале с сечением 420×280 мкм. Определены закономерности распределения фаз и волновой структуры газожидкостного течения вода-азот с использованием метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF). Метод лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) обеспечивает высокое пространственное разрешение без внесения гидродинамических возмущений в объект исследования [1].

Схема экспериментального стенда для определения параметров восходящего двухфазного потока в вертикальном миниканале 0.72×1.50 мм представлена на рис. 1 (а). Для исследования в качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода, в качестве газовой фазы использовался азот. В эксперименте газ (N_2) поступал из баллона (1) через расходомер газа (2) в экспериментальный участок (5). Вода поступала из бака (4), через термо-массовый регулятор расхода жидкости и далее попадала в смеситель, расположенный внизу перед экспериментальным участком. Формирование двухфазного потока происходило во внутреннем Т-образном миксере. Экспериментальный участок представлял собой прямоугольный стеклянный миниканал 0.72×1.50 мм и прямоугольный микроканал с сечением 420×280 мкм. На выходе из экспериментального участка газожидкостная смесь откачивалась насосом (9) в бак с водой (4). С лицевой стороны канала, проводилась визуализация течения при помощи высокоскоростной видеокамеры CR600x2. Частота видеосъемки составляла 1250 кадр/с, время экспозиции варьировалось от 2 до 50 мкс.

Для изучения толщины пленки применен метод лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), рис. 1 (б). Луч лазера от импульсного лазера (1) с длиной волны 532 нм под прямым углом падал на стекло исследуемого канала (2), в котором было организовано двухфазное газожидкостное течение. Высокоскоростная видеокамера (3) регистрировала отраженный свет, проходящий через оранжевый светофильтр ОС-12 (4). Весь экспериментальный стенд был накрыт светонепроницаемым кожухом, для исключения шума от ламп накаливания и дневного света. В настоящее время существует часть работ, посвященных тематике детальной структуры течения двухфазного течения, например, в работе [2] подробно представлено изучение процессов.

Используя высокоскоростную видеокамеру Optronis CX600x2, получена структура газожидкостного течения в области Т-образного смесителя. Получено, что при восходящем газожидкостном течении в микроканале формируются три основных режима течения: периодическое течение с удлиненными пузырями, переходное и кольцевое течение с волнами.

Для определения толщины пленки жидкости с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции использовалось течение с удлиненными пузырями и переходное течение при постоянной приведенной скорости жидкости $J_{\text{жид}} = 0.059$ м/с. Кадры, полученные методом ЛИФ, показаны на рис. 2. Для дан-

ных течений была определена интенсивность флуоресценции в центре канала и, с учетом калибровки, определена локальная толщина пленки жидкости.

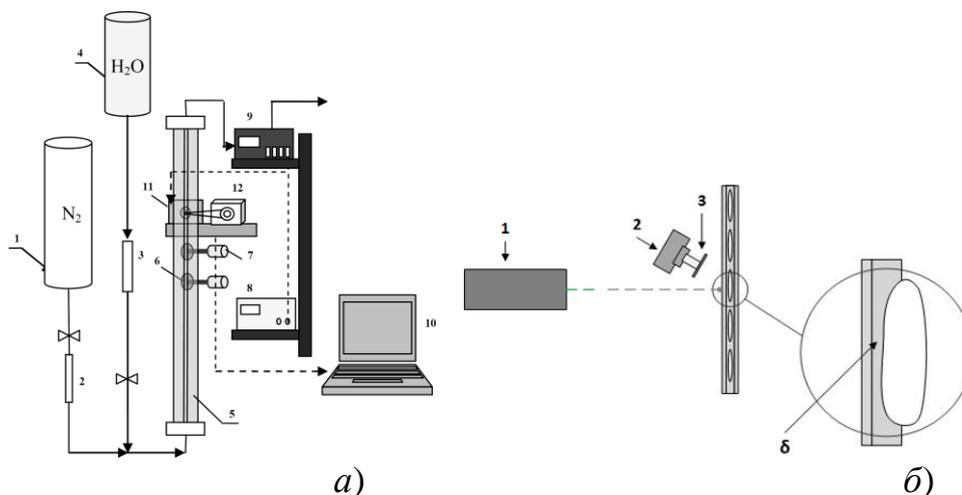


Рис. 1. *а)* экспериментальный стенд для изучения характеристик двухфазного газожидкостного течения; *б)* принципиальная схема измерения толщины пленки методом лазерно-индуцированной флуоресценции (μ -LIF)

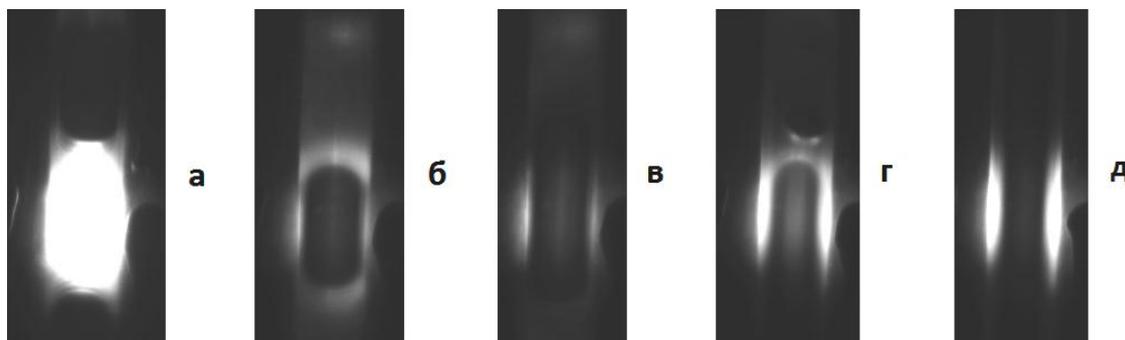


Рис. 2. Кадры, полученные методом LIF ($J_{\text{жид}} = 0,059$ м/с):

а) флуоресценция при попадании лазерного пучка на жидкую перемычку ($J_{\text{газ}}=0.06$ м/с), *б)* флуоресценция при попадании на газовый пузырь ($J_{\text{газ}}=0.06$ м/с), *в)* флуоресценция при попадании на газовый пузырь ($J_{\text{газ}}=0.148$ м/с); *г)* – переходной режим, *д)* кольцевой режим

Используя данные о толщине пленки, была построена зависимость безразмерной толщины пленки от капиллярного числа (рис. 3). В работе показано, что пленка жидкости δ уменьшается при удалении от начала пузыря.

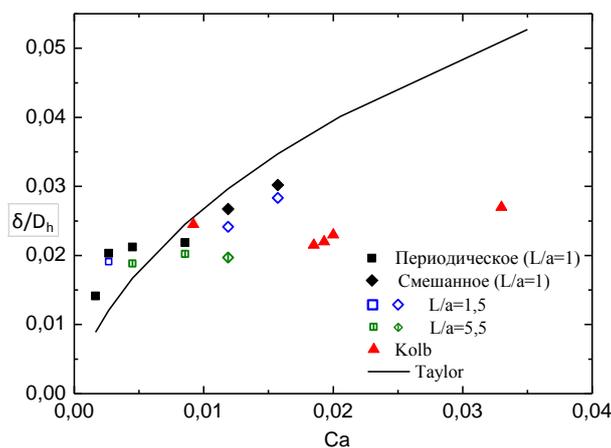


Рис. 3. Графики зависимости безразмерной толщины пленки от капиллярного числа

На рис. 4 представлено распределение локальной толщины пленки жидкости в сечении, перпендикулярном направлению течения вдоль широкой стороны микроканала 420x280 мкм для режима течения с удлиненными периодическими пузырями.

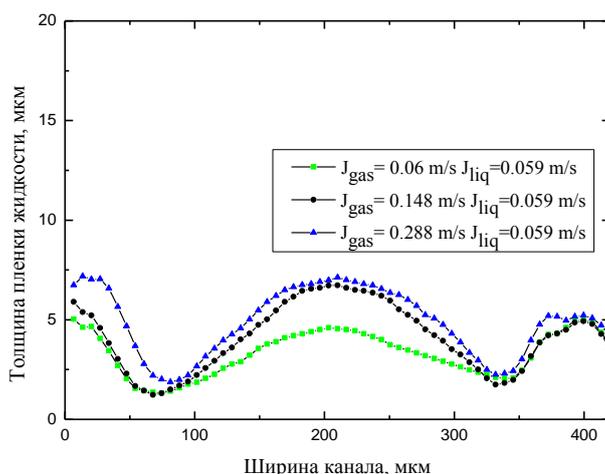


Рис. 4. Распределение локальной толщины пленки жидкости в сечении, перпендикулярном направлению течения вдоль широкой стороны канала

На рис. 5 представлены результаты для толщины пленки δ/D_h , нормированной на гидравлический диаметр в зависимости от капиллярного числа Ca , полученные методом лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) в микроканале с размером 0.72×1.50 мм. На рисунке светлыми треугольниками представлены данные по толщине пленки для режима течения с удлиненными пузырями. Темными треугольниками представлены данные для переходного режима течения. Экспериментальные результаты были сопоставлены с расчетной работой [4] и экспериментальной работой [5].

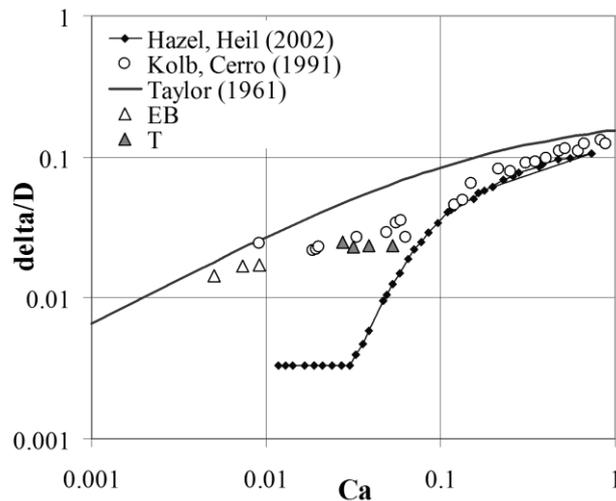


Рис. 5. Зависимость безразмерной толщины пленки от капиллярного числа

В результате выполненных работ экспериментально получена структура газожидкостного течения в прямоугольном миниканале 0.72×1.50 мм и прямоугольном микроканале с размерами 420×280 мкм. Изучена структура течения с помощью высокоскоростной видеосъемки газо-жидкостного течения. С помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) установлена толщина пленки жидкости для режима течения с удлинёнными пузырями и переходного режима течения.

Работа выполнена в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект РФФ № 14-49-00010).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oddy M., Santiago J., Mikkelsen J. Electrokinetic instability micromixing // *Analytical chemistry*. – 2001. – Vol. 73. – P. 5822–5832.
2. Козулин И.А., Кузнецов В.В. Статистические характеристики двухфазного газожидкостного потока в вертикальном микроканале // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. №6 (310). С.129-139.

© Г. В. Барткус, И. А. Козулин, В. В. Кузнецов, 2016

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСХОДЯЩЕГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Герман Васильевич Барткус

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, магистрант, лаборант, тел. (913)750-13-11, e-mail: germanbartkus@gmail.com

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

В работе изучена структура течения смеси вода-азот в канале с прямоугольным сечением 420×280 мкм. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по визуализации и измерению характеристик газожидкостного течения методами высокоскоростной видеосъемки, лазерно-индуцированной флуоресценции и методом лазерного сканирования.

Ключевые слова: газожидкостное течение, микроканал, метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), МЭМС технологии.

APPLICATION OF LASER-INDUCED FLUORESCENCE FOR STUDY OF UPWARD GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR MICROCHANNEL

German V. Bartkus

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, bachelor, assistant, tel. (913)750-13-11, e-mail: germanbartkus@gmail.com

Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Professor, Head Laboratory of Multiphase Systems, tel. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

In this paper the structure of mixture flow water-nitrogen in microchannel with rectangular cross section 420×280 μm was studied. A complex of experimental studies of visualization and measurements of gas-liquid flow characteristics was carried out using methods of high-speed video, laser induced fluorescence and laser scanning method.

Key words: gas-liquid flow, microchannel, method of laser-induced fluorescence (μ -LIF), MEMS technology.

Исследования газожидкостных течений в микроканалах широко развиваются в настоящее время применительно к разработке современных технологий в различных областях, включая МЭМС и биотехнологии, создание высокоинтенсивных систем охлаждения электронного оборудования. Примеры применения микроканалов детально рассмотрены в [1]. Режимы газожидкостного течения в вертикальном микроканале с поперечным сечением 670×2000 микрон

экспериментально получены в [2] с помощью двухлучевого лазерного сканирования. В данной работе оптическими методами проведено комплексное исследование детальной структуры стационарного и пульсирующего газожидкостного течения в прямоугольном микроканале с сечением 420×280 мкм, то есть в канале с существенно меньшим поперечным размером, чем в [2]. Выявлены основные режимы течения и их статистические характеристики, с использованием метода лазерно-индуцированной флуоресценции (μ -LIF) измерена локальная толщина пленки жидкости δ .

Схема экспериментального стенда для исследования восходящего газожидкостного течения в вертикальном микроканале представлена на рис. 1 (а). При проведении экспериментов в качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода, в качестве газовой фазы использовался азот, который поступал из баллона (1) через расходомер газа (2) в экспериментальный участок (5). Вода поступала из бака (4), через термо-массовый регулятор расхода жидкости и далее попадала на вход в микроканал. Формирование двухфазного потока происходило во внутреннем Т-образном миксере. Экспериментальный участок представлял собой прямоугольный стеклянный микроканал длиной 300 мм и сечением 420×280 мкм. На выходе из экспериментального участка газожидкостная смесь откачивалась насосом (9) в бак с водой (4). Измерения проводились, как для стационарного течения, так и при наличии внешних пульсаций расхода, вызванных полным перекрытием проходного сечения в трубке, подводящей жидкость к смесителю. Для генерации возмущений в микроканале по линии жидкости после регулятора расхода жидкости был установлен электромагнитный клапан, частоту работы которого можно было контролировать с помощью генератора. Структура потока была изучена при двух частотах работы электромагнитного клапана: 10 и 18 Гц.

В данной работе использовались три метода: метод высокоскоростной видеосъемки, двухлучевое лазерное сканирование и метод лазерно-индуцированной флуоресценции для определения толщины пленки жидкости. Схема измерения толщины пленки с использованием метода μ -LIF показана на рис. 1 (б). В качестве красителя был выбран Родамин 6Ж, так как он не вносит гидродинамических возмущений в поток, и его спектры поглощения и флуоресценции лежат в диапазоне, удобном для применения в качестве источника возбуждения флуоресценции импульсного твердотельного лазера (1) с длиной волны 532 нм. Для определения интенсивности переизлученного света использовался светофильтр ОС-12 (3), который не прозрачен для длины волны лазера, и высокоскоростная видеокамера Optronis CR600x2 (2).

С использованием высокоскоростной видеокамеры с частотой видеосъемки 1250 кадр/с и двухлучевого лазерного сканирования выявлена структура газожидкостного течения в области Т-образного смесителя и на расстоянии 13 см от смесителя, установлены статистические характеристики распределений длин газовых и жидких перемычек в предположении, что длины пузырей-снарядов соответствуют логнормальному распределению. Эксперименты проведены в

диапазоне приведенных скоростей жидкости от 0.024 до 0.094 м/с и газа от 0.064 до 3.21 м/с. Получено, что при стационарном восходящем газожидкостном течении в микроканале формируются три основных режима течения: периодическое течение с удлиненными пузырями, переходное и кольцевое течение с волнами, рис. 2 (а). При наличии внешних периодических возмущений расхода жидкости с частотой 10 и 18 Гц в микроканале наблюдается только два основных режима течения: неперриодический режим течения (Т) и кольцевое течение с волнами (AW), рис. 2 (б). Этот новый результат показывает возможность управления структурой газожидкостного течения в микроканале при наложении периодических внешних возмущений на расход жидкости.

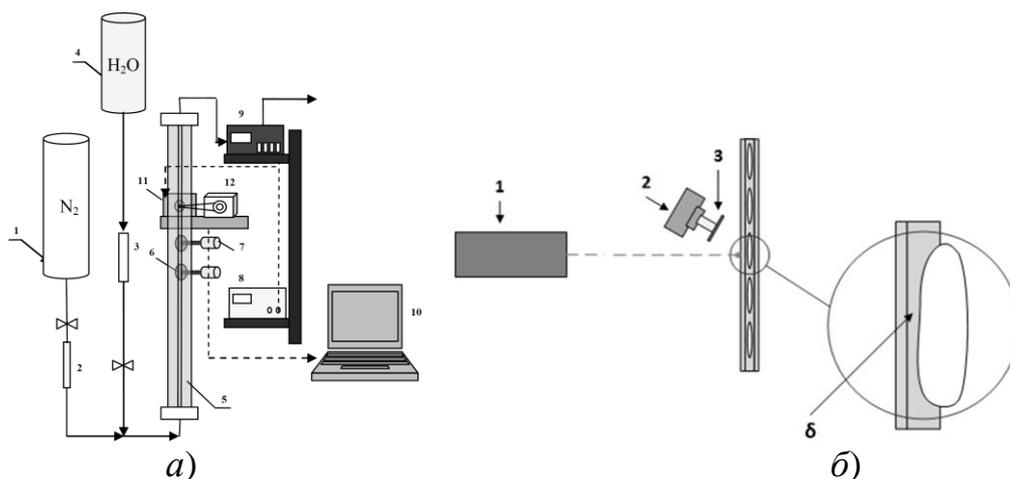


Рис. 1. а) экспериментальный стенд для изучения газожидкостного течения в прямоугольном микроканале; б) принципиальная схема измерения толщины пленки методом лазерно-индуцированной флуоресценции (μ -LIF)

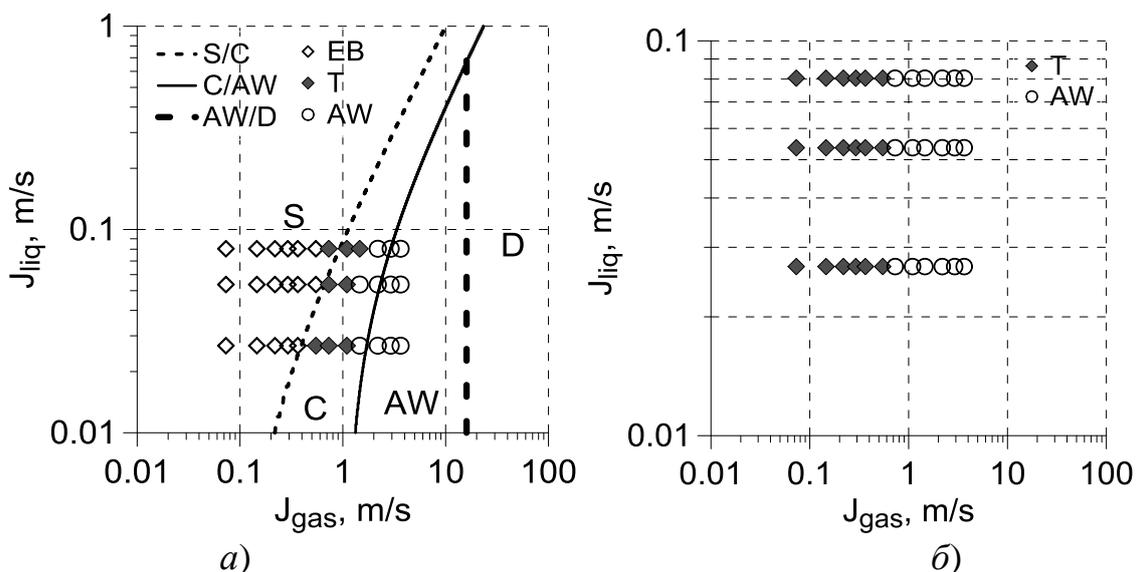


Рис. 2. Карта режимов течения в вертикальном прямоугольном микроканале 420 x 280 мкм для стационарного течения (а) и при частоте пульсаций расхода жидкости 10 Гц (б)

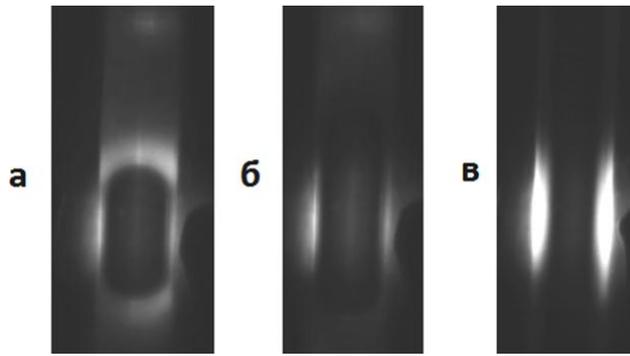


Рис. 3. Кадры флуоресценции, полученные при освещении:
 а) газового пузыря ($J_{\text{газ}} = 0,06$ м/с), б) газового пузыря большей длины ($J_{\text{газ}} = 0,148$ м/с), в) кольцевого течения

Для определения толщины пленки жидкости с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции использовалось течение с удлиненными пузырями и переходное течение при постоянной приведенной скорости жидкости $J_{\text{жид}} = 0,059$ м/с. Кадры, полученные методом ЛИФ, показаны на рис. 3. Для указанных течений определена интенсивность флуоресценции в центре канала и, с учетом калибровки, определена локальная толщина пленки жидкости, которая представлена в безразмерном виде на рис. 4. Здесь номера точек соответствуют различным расстояниям от начала пузыря до места измерения толщины пленки жидкости L/a , где L – расстояние от начала пузыря, a – ширина канала. Как видно, в соответствии с законом Тейлора, толщина пленки жидкости на малых расстояниях от начала пузыря ($L/a=1$) увеличивается при увеличении капиллярного числа $Ca = \frac{U_{\text{пузырь}} \cdot \mu}{\sigma}$, но на больших расстояниях ($L/a=5.5$) она уменьшается из-за стягивания жидкости в углы канала, и закон Тейлора для прямоугольного канала не выполняется в полной мере.

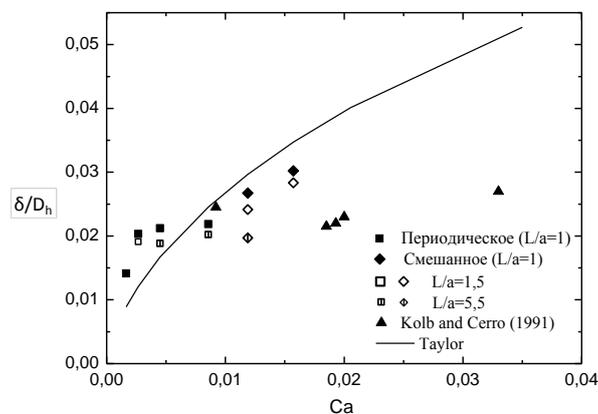


Рис. 4. Графики зависимости безразмерной толщины пленки от капиллярного числа

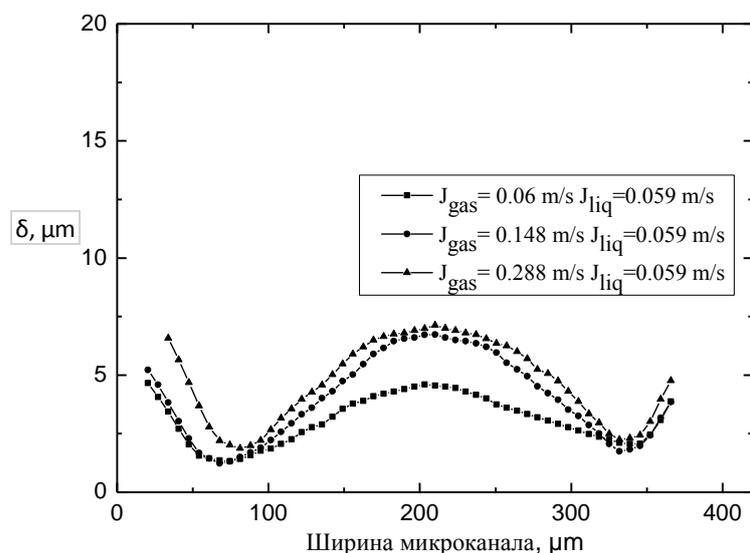


Рис. 5. Распределение локальной толщины пленки жидкости в сечении перпендикулярном направлению течения вдоль длинной стороны канала

Изменение локальной толщины пленки жидкости вдоль длинной стороны канала показано на рис. 5. Данные приведены для трех разных приведенных скоростей газа и одной скорости жидкости. Видно, что 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.

В результате проведенных исследований выявлена тонкая структура газожидкостного течения в прямоугольном микроканале с размерами 420×280 мкм для стационарного режима течения и при наличии внешних пульсаций расхода жидкости. С помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции (μ -LIF) измерена толщина пленки жидкости для режима течения с удлиненными пузырями и переходного режима течения. Показана возможность управления структурой газожидкостного течения в микроканале при наложении периодических внешних возмущений на расход жидкости.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 15-08-07506 А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Günther A. and Jensen K. F. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis // *Lab Chip*. – 2006. – Vol. 6. – P. 1487–1503.
2. Козулин И.А., Кузнецов В.В. Статистические характеристики двухфазного газожидкостного потока в вертикальном микроканале // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2011. – Т. 52. №6 (310). – С.129–139.

© Г. В. Барткус, В. В. Кузнецов, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

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: igornt@yandex.ru

Герман Васильевич Барткус

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, лаборант, тел. (913)750-13-11, e-mail: germanbartkus@gmail.com

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

В работе выполнен комплекс экспериментальных исследований распространения адиабатных волн испарения при быстром переводе хладона R141b и R113 в метастабильное состояние при сбросе давления. Проведено экспериментальное изучение взрывного кипения органических жидкостей (этиленгликоля и октана) при импульсном нагреве на микронагревателе 100×110 мкм. Применена оптическая методика регистрации вскипания на микронагревателе, основанная на измерении интенсивности отраженного лазерного пучка.

Ключевые слова: метастабильная жидкость, взрывное вскипание, МЭМС системы управления, микронагреватель.

INVESTIGATION OF EXPLOSIVE BOILING METASTABLE LIQUID BY OPTICAL METHODS

Igor A. Kozulin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., tel. (923)182-08-97, e-mail: igornt@yandex.ru

German V. Bartkus

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, laboratory worker, tel. (913)750-13-11, e-mail: germanbartkus@gmail.com

Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Head Laboratory of multiphase systems, tel. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Experiments to investigate propagation of adiabatic evaporation waves with fast transferring of Freon R141b and R113 in a metastable state during depressurization were made in this paper. An experimental study conducted of the explosive boiling of organic liquids (ethylene glycol and octane) under pulsed heating at microheater 100×110 mm. The method of optical registration boiling on microheater based on measuring the intensity of the reflected laser beam was applied.

Key words: metastable liquid, explosive boiling, MEMS control systems, microheater.

В работе проведено комплексное исследование динамики распада метастабильной жидкости при высокой внешней и внутренней плотности энергии. При изучении динамики распада метастабильной жидкости при накопленной внутренней энергии проведены эксперименты по исследованию распространения адиабатных волн испарения, возникающих при быстром переводе хладонов R-141b и хлада R-113 в метастабильное состояние, путем сброса давления. Визуализация распространения адиабатических волн осуществлялась с помощью высокоскоростной видеокамеры. Работа является продолжением экспериментального исследования работы [1] по исследованию распространения адиабатных волн испарения, возникающих при быстром переводе хладонов R-11 в метастабильное состояние.

Проведено экспериментальное исследование вскипания жидкости при высокой внешней плотности энергии, при вскипании на микронагревателе. Данная тематика актуальна и может найти применение в различных областях МЭМС технологий, так например, в работе [2] технология взрывного вскипания применяется в технологии струйной печати. В работе для исследования взрывного вскипания жидкости на микронагревателе использовался оптический метод, основанный на изменении интенсивности лазерного пучка, зеркально отражённого от поверхности микронагревателя.

Исследование распространения волн испарения в метастабильной жидкости проведено на экспериментальном стенде, рис. 1 (а). Стенд включал в себя камеру низкого давления объёмом 60 литров и рабочий участок с перегретой жидкостью под давлением, разделённые мембраной, разрываемой пробойником по заданной программе. В качестве рабочих жидкостей использовались хладоны R141b и R113. В качестве рабочего участка использовались цилиндрические стеклянные каналы внутренним диаметром 16 мм, длиной 300 мм. Рабочий участок располагался вертикально и имел термостатированную рубашку, в которой прокачивалась вода от термостата, что позволило нагревать хладон до заданной начальной температуры T_0 . Регистрация распада метастабильной жидкости проводилась с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры Optronics CR600x2. Частота видеосъёмки составляла 500 кадр/с и 1000 кадр/с.

Схема экспериментальной установки для исследования динамики взрывного кипения на микронагревателе показана на рис. 1 (б). В качестве микронагревателя использовался тонкоплёночный нагреватель-резистор с размером 100×110 мкм. Начальная температура жидкости равна 200°C . В экспериментах микрочип с нагревателем (1) погружался в кювету с рабочей жидкостью (2). Одиночные прямоугольные импульсы тока подавались на микронагреватель (1) для его нагрева. Для изучения фазового взрыва использована оптическая методика регистрации зародышеобразования, основанная на измерении интенсивности лазерного пучка (3), зеркально отражённого от поверхности нагревателя (1). После отражения от нагревателя лазерный луч попадал в микроскоп (4). С помощью диафрагмы (5) вырезалась область с исследуемым микронагревателем.

Интенсивность лазерного излучения регистрировалась фотодиодом (6), сигнал с которого обрабатывался на компьютере (7). При возникновении микропузырьков интегральный коэффициент зеркального отражения падает, и сигнал с фотоприёмника дает динамику заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырьками.

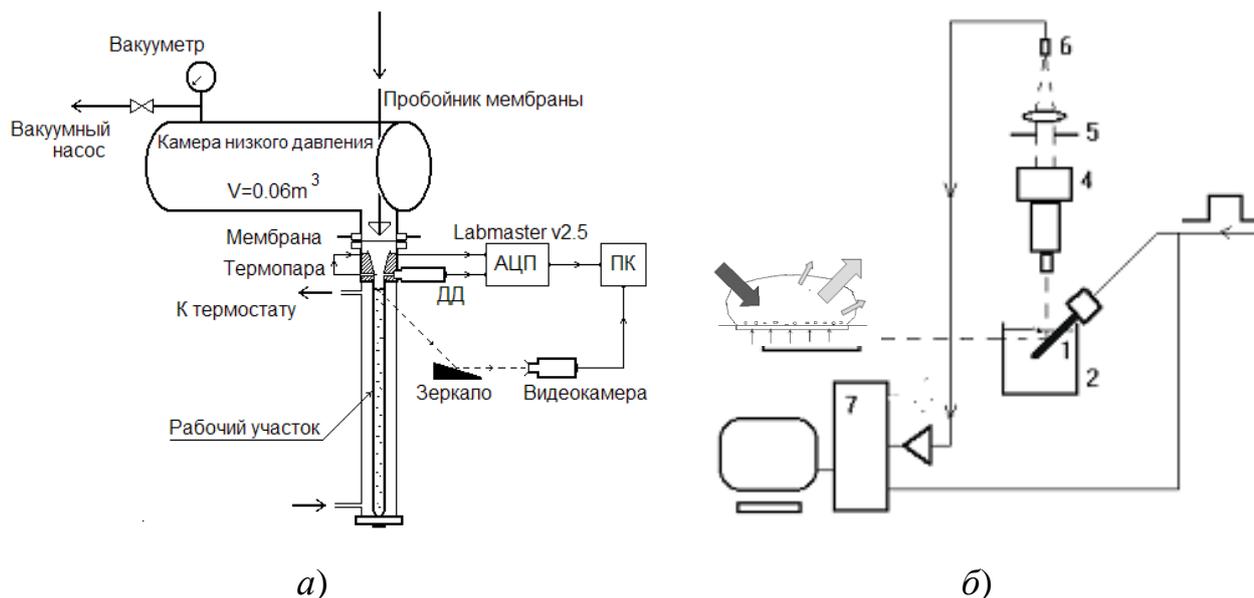


Рис. 1. а) экспериментальный стенд для исследования распространения волн испарения в метастабильной жидкости; б) экспериментальный стенд для исследования динамики взрывного кипения на микронагревателе

Для установления закономерностей распространения адиабатных волн испарения в перегретых хладагентах R141b и R113 под действием высокоинтенсивных волн разрежения в прозрачном цилиндрическом канале. Волна поверхностного фазового перехода инициировалась при сбросе давления, вызванного разрывом мембраны и воздействием волны разрежения на перегретую жидкость с переводом ее в метастабильное состояние.

На рис. 2 представлена динамика развития фронта кипения для хладагента R141b при температуре и давлении: $T_0=35.4\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{res} = 0.04\text{ бар}$. Съемка фазового перехода осуществлялась с помощью высокоскоростной видеокамеры. Видно, что можно выделить основные стадии кипения: стадию интенсивного испарения при выбросе пересыщенного пара и перемещения границы ($t=6\text{ мс}$) и стадию конца выброса и остановки границы ($t=12\text{ мс}$).

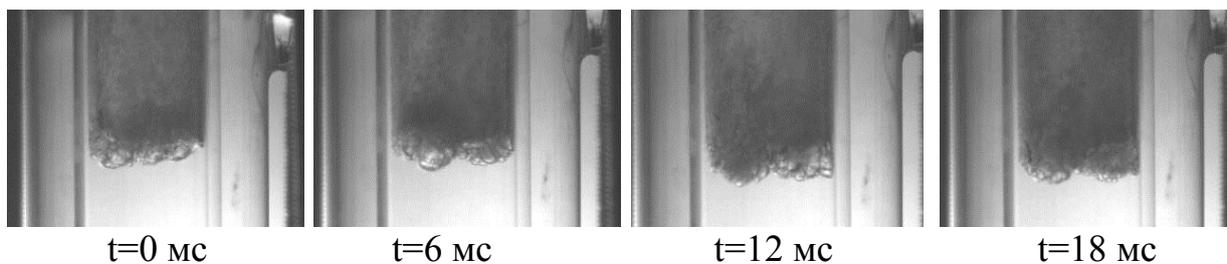


Рис. 2. Структура фронта поверхностного фазового перехода для хладона R141b при температуре и давлении: $T_0 = 35,4 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0,04 \text{ бар}$. Скорость видеосъемки 500 кадр/с

На рис. 3, а представлено изменение температуры за фронтом волны вскипания (черная кривая) и температуры насыщения, определенной по давлению - $T_s(p_s)$, (серая кривая) для хладона R141b при температуре и давлении $T_0 = 35.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.04 \text{ бар}$. На рис. 3, б представлено изменение температуры за фронтом волны вскипания (черная кривая) и температуры насыщения, определенной по давлению - $T_s(p_s)$, (серая кривая) для хладона R113, когда фронт вскипания начинается на межфазной поверхности жидкость-газ при температуре и давлении $T_0 = 65.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.036 \text{ бар}$. Практически полное совпадение температур показывает, что парожидкостный поток за волной испарения является равновесным.

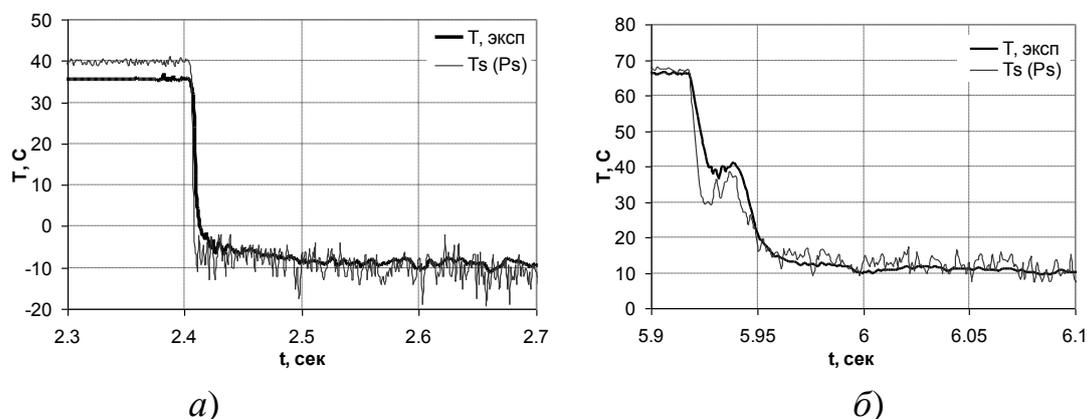


Рис. 3. Изменение температуры за фронтом волны вскипания (черная кривая) и температуры насыщения, определенной по давлению - $T_s(p_s)$, (серая кривая) для хладона (а) R141b при температуре и давлении $T_0 = 35.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.04 \text{ бар}$. (б) для хладона R113. при температуре и давлении $T_0 = 65.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{res}} = 0.036 \text{ бар}$

В работе проведены эксперименты по изучению взрывного вскипания жидкости на микронагревателе с размерами $100 \times 110 \text{ мкм}$. На рис. 4, а для этиленгликоля тонкой линией представлена зависимость интенсивности отраженного света от микронагревателя в зависимости от времени при приведенной плотности тепловыделения $q_{\text{eff}} = 1342.1 \text{ МВт/м}^2$. Темной линией представлен

импульс с генератора, нагревающий микронагреватель. На рисунке отмечено время кипения $t_{кип}$ - время между точкой начала взрывного вскипания и моментом схлопывания первого газового пузыря. В экспериментах по изучению взрывного вскипания этиленгликоля время импульса с генератора варьировалось от 4 до 0.6 мкс, при этом приведенная плотность тепловыделения менялась от $q_{eff}=250$ МВт/м² до $q_{eff}=3500$ МВт/м².

Для каждой из жидкостей, используемых в экспериментах при 200С, определен коэффициент температуропроводности как $D_{liq} = k_{liq} / \rho_{liq} C_p$ где k_{liq} , коэффициент теплопроводности, ρ_{liq} , плотность жидкости и C_p , удельная теплоемкость, коэффициент имеет D_{liq} размерность м²/с. Величина $\sqrt{D_{liq} / t_{кин}}$ имеет размерность скорости и может характеризовать скорость развития взрывного кипения на микронагревателе. На рис. 4, б представлена зависимость параметра $\sqrt{D_{liq} / t_{кин}}$ от эффективной плотности теплового потока, темными треугольниками на рисунке нанесены экспериментальные данные из работы [3]. Темной сплошной линией на рис. 4, б приведена зависимость $\sqrt{D_{liq} / t_{кин}} = 0.045 \cdot q_{eff}^{0.11}$, которая обобщает экспериментальные данные для этиленгликоля, воды, этанола и метанола, при плотности теплового потока менее 2 ГВт/м². Данные по октану лежат выше и описываются зависимостью $\sqrt{D_{liq} / t_{кин}} = 0.052 \cdot q_{eff}^{0.11}$. Это позволяет сделать вывод, что процесс взрывного вскипания октана на микронагревателе отличается от других жидкостей.

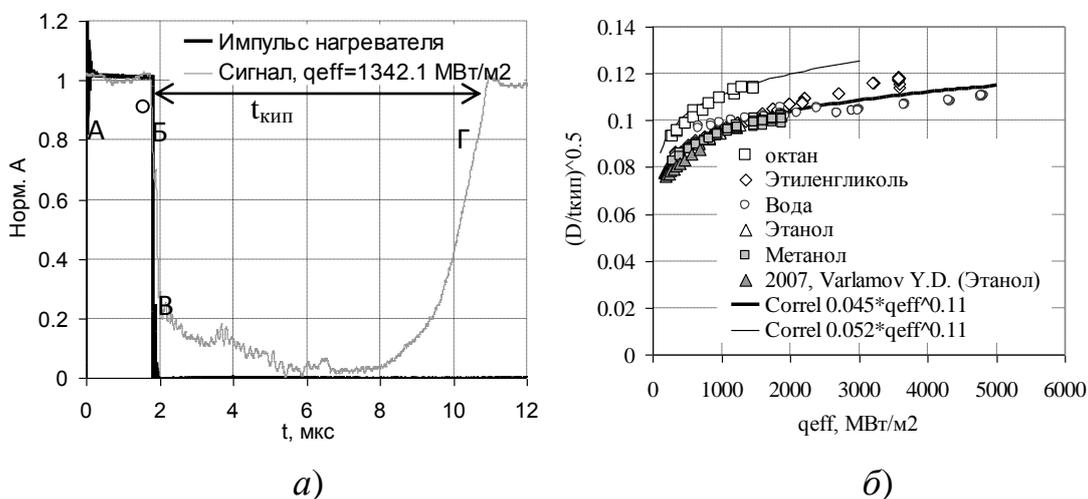


Рис. 4. Зависимость интенсивности света лазерного излучения, от времени для этиленгликоля при приведенной плотности тепловыделения q_{eff} и длительности нагревающего импульса $t_{имп}$: (а) $q_{eff}=1342.1$ МВт/м², $t_{имп}=1.92$ мкс (б) динамика вскипания жидкостей в зависимости от плотности теплового потока

В работе проведено экспериментальное изучение распространения адиабатных волн испарения, возникающих при быстром переводе хладонов R-141b, R-113 (ретроградная жидкость) в метастабильное состояние путем сброса давления в волне разрежения. Проведено экспериментальное исследование по образованию метастабильных состояний и их распада при импульсном нагреве жидкости. Получена зависимость по динамике вскипания жидкостей от плотности теплового потока.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 15-08-06870 А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kuznetsov V. V., Kozulin I. A., Vitovsky O. V. Experimental investigation of adiabatic evaporation waves in superheated refrigerants // Journal of Engineering Thermophysics. – 2012. – V. 21 (2). – P. 136-143.
2. Allen R R, Meyer J D., Knight W.R. Thermodynamics and hydrodynamics of thermal ink jets // Hewlett-Packard J. – 1985. –V. 36. –P. 21–27.
3. Varlamov Yu. D., Meshcheryakov Yu. P., Predtechenskii M. P., Lezhnin S. I., Ul'yankin S. N. Specific features of explosive boiling of liquids on a film microheater // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2007. – Vol. 48, No. 2. – P. 213–220.

© И. А. Козулин, Г. В. Барткус, В. В. Кузнецов, 2016

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В МИКРОТЕПЛООБМЕННИКЕ

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

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

Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении и конденсации хладона R-21 в условиях восходящего течения при малых массовых скоростях и тепловых потоках в вертикальном микротеплообменнике, образованном системой миниканалов. С использованием многоточечных измерений температуры стенки и измерений локального теплового потока проведен сравнительный анализ теплоотдачи при кипении и конденсации в идентичных условиях, и выявлены условия образования крупномасштабных структур, снижающих эффективность теплообмена при восходящей конденсации.

Ключевые слова: теплообмен, микротеплообменник, миниканал, кипение, конденсация, хладон R-21.

THERMOPHYSICAL STUDY OF PHASE CHANGE DURING FORCED CONVECTION IN MICRO HEAT EXCHANGER

Alisher S. Shamirzaev

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior researcher, tel. (383)316-57-31, e-mail: alisham@ngs.ru

Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Head Laboratory of multiphase systems, tel. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

The results of experimental study of the heat transfer with boiling and condensing of refrigerant R-21 under the upward flow at low mass flux and heat flux 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 boiling and condensation was done in identified conditions and the circumstances of large-scale structures formation which reduce the heat transfer efficiency during upward condensing were obtained.

Key words: heat transfer, micro heat exchanger, minichannel, boiling, condensation, refrigerant R-21.

В связи с быстрым ростом приложений, которые требуют передачи больших тепловых потоков в ограниченном пространстве, все большее внимание

уделяется теплофизическим исследованиям, направленным на разработку микротеплообменников для систем охлаждения микропроцессорной техники, лазерных зеркал, энергетического и криогенного оборудования. Типичные размеры каналов микротеплообменных систем лежат в диапазоне от 10 микрометров до 1000 микрометров, что значительно меньше размеров обычных каналов, и в них возникает широкий спектр явлений, которые не типичны на большом масштабе и слабо изучены [1]. Одним из эффективных способов изготовления микротеплообменников с миниканалами (каналами меньше капиллярной постоянной) является вакуумная или химическая пайка формованных пластин, что позволяет достигать высокую удельную поверхность межреберного пространства и тепловую производительность при малом температурном напоре. Механизмы теплообмена при кипении и конденсации в миниканалах и микроканалах рассмотрены в [2–4]. В этих работах показана как высокая эффективность таких каналов в микротеплообменных системах, так и отсутствие достоверных методов расчета теплообмена. Целью данной работы является сравнительный анализ теплоотдачи при кипении и конденсации хладагента R-21 в элементе пластинчато-ребристого микротеплообменника в условиях восходящего течения при малой массовой скорости и тепловом потоке, которые являются типичными для многих практических приложений, но слабо изучены.

Исследование теплообмена при кипении и конденсации хладагента R-21 в условиях восходящего течения проведено в диапазоне массовой скорости от 20 до 50 кг/м²с с использованием теплообменного участка, показанного на рис. 1 (а). При проведении экспериментов был использован вертикальный микротеплообменник прямоугольного сечения размером 6.7x70x279 мм с нижней подачей фреона. Конструкция входного коллектора обеспечивала равномерное распределение жидкости и пара на входе в участок, который изготовлен химической пайкой формованной алюминиевой пластины со стенкой теплообменника толщиной 3 мм и имел плотность ребер 800 ребер на метр. Охлажденный хладагент R-21 из конденсатора подавался центробежным насосом в предварительный парогенератор, который использован для получения начального паросодержания на входе в рабочий участок. На выходе рабочего участка расположен доиспаритель жидкости, который обеспечивал подавление пульсаций давления в линии, соединяющей рабочий участок с конденсатором.

Коэффициент теплоотдачи h вычисляется с учетом тепловой эффективности поверхности теплообмена $\eta_0 = 1 - (A_1/A_0)(1 - \eta_f)$ и термического сопротивления в стенке теплообменника следующим образом:

$$Q_{fr} = A_0 \eta_0 h (T_w - T_{Sat}) . \quad (1)$$

Здесь Q_{fr} есть количество тепла, подведенное к стенке теплообменника, η_f есть эффективность ребра, A_1 и A_0 – поверхность ребра и полная внутренняя поверхность теплообменника. Температура стенки T_w определена как средняя температура на внутренней поверхности теплообменника, определённая по из-

мерениям внешней поверхности с учетом градиента температуры стенки и T_{Sat} есть температура насыщения. Для измерения температуры внешней поверхности теплообменника на его поверхности в канавках зачеканены 12 термопар; 6 на одной стороне и 6 на другой стороне участка. В боковой стенке теплообменника просверлены три отверстия для измерения статического давления (в центре рабочего участка) и перепада давления. Десять термоэлектрических модулей Пельтье и две выравнивающие температуру медные пластины используются для нагрева или охлаждения теплообменного участка, рис. 1 (а). Внешние водные теплообменники, соединенные с модулями Пельтье термопастой КПТ-8, осуществляют снятие тепла с элементов Пельтье для поддержания постоянной разности температур между холодной и горячей сторонами элементов Пельтье. Среднеквадратичное отклонение средней температуры стенки для всех термопар не превышало 0.05 оС.

На рис. 1 (б) приведена карта режимов течения, полученная с использованием скоростной видеосъемки для формованной алюминиевой пластины, зажатой между двумя стеклянными пластинами. Высота ребра формованной пластины равна 7 мм, плотность ребер равна 315 ребер на метр, толщина ребра - 0,5 мм. На карте режимов выделены следующие области: I – переходное течение с жидкими пробками; II – чередующееся переходное и кольцевое течение с волнами; III – кольцевое течение с волнами; IV – кольцевое течение без волн. Линии на этом рисунке показывают изменение приведенных скоростей жидкости и пара при изменении паросодержания для массовой скорости $G=30 \text{ кг/м}^2\text{с}$ и $G=50 \text{ кг/м}^2\text{с}$.

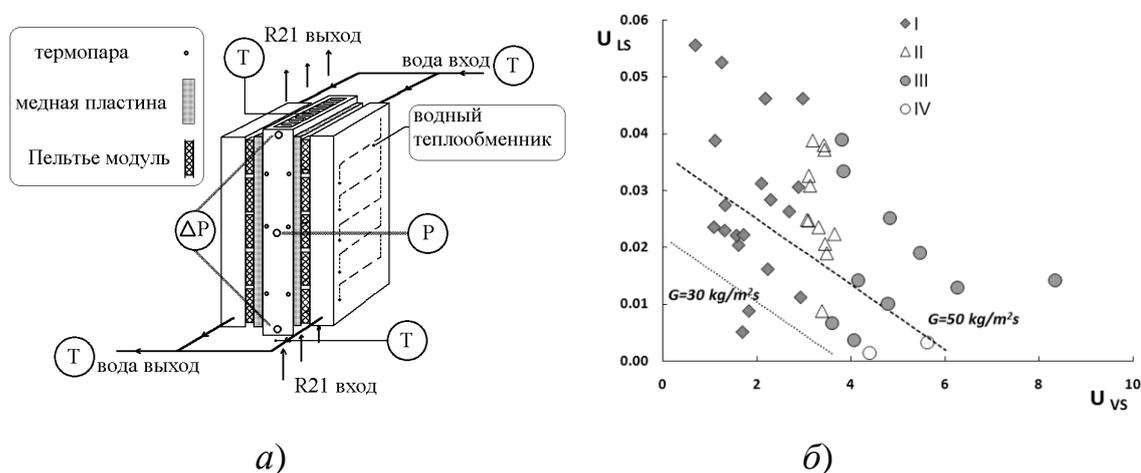


Рис. 1. Схемы рабочих участков:

а) микротеплообменный участок, б) карта режимов течения для давления 2 бар

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи при кипении и конденсации от среднего массового паросодержания в теплообменнике с

гладкими ребрами. Данные для кипения получены при давлении 1.8 бар в диапазоне тепловых потоков от 1380 Вт/м² до 1860 Вт/м². Данные для конденсации получены при давлении 1.8 бар в диапазоне тепловых потоков от 700 Вт/м² до 3300 Вт/м². Измеренные температурные напоры на стенке теплообменника в опытах изменялись от 0.9 оС до 3 оС. Данные рис. 2 показывают, что коэффициент теплоотдачи при кипении практически не изменяется при изменении массового паросодержания от 0.1 до 0.9, а при больших его значениях начинает уменьшаться, что показывает ухудшение теплообмена вблизи полного испарения жидкости. Из рис. 2 следует, что изменение теплового потока для кипения от 1380 Вт/м² до 1860 Вт/м² не оказывает заметного влияния на величину коэффициента теплоотдачи и пузырьковое кипение не является преобладающим механизмом теплообмена в рассмотренных условиях. В этих условиях, наиболее вероятным механизмом теплообмена является испарение тонкой искривленной капиллярными силами пленки жидкости, что было показано ранее в [1] для опускного парожидкостного течения в пластинчато-ребристом теплообменнике.

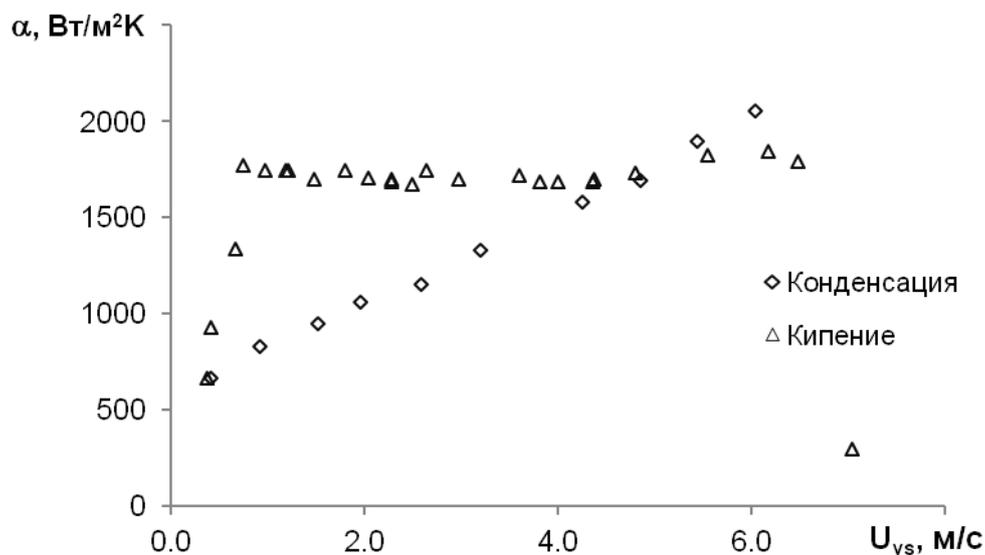


Рис. 2. Коэффициент теплопередачи при кипении и конденсации в зависимости от приведенной скорости пара для массового расхода 50 кг/м²с

Используя карту режимов течения рис. 1 (б) получим, что переход к кольцевому режиму течения наблюдается при массовой скорости, превышающей 4 м/с. Как видно на рис. 2, коэффициенты теплоотдачи при конденсации существенно меньше, чем коэффициенты теплоотдачи при кипении, полученные в тех же условиях в снаряжном и эмульсионном режиме течения. Это показывает существенное отличие механизма теплообмена при испарении и конденсации в этих режимах, связанное с тем, что преимущественным механизмом теплообмена, как при испарении, так и для конденсации, является перенос тепла через

тонкую пленку жидкости, толщина которой определяется стягиванием жидкости капиллярными силами в углы канала. При конденсации наибольший поток конденсата соответствует области сверхтонкой пленки жидкости, что выравнивает поверхность жидкости. В противоположность этому, скорость испарения максимальна в области сверхтонкой пленки и вызывает ее разрыв с образованием устойчивой контактной линии смачивания жидкость-пар-стенка, в окрестности которой локальный коэффициент теплоотдачи имеет максимальное значение [1]. В области кольцевого течения коэффициенты теплоотдачи, как для конденсации, так и для испарения отличаются мало до момента начала прогрессирующего ухудшения теплообмена.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента теплопередачи от массового паросодержания при конденсации для массовой скорости 20, 30 и 50 кг/м²с. Как видно, коэффициент теплоотдачи при массовой скорости больше 30 кг/м²с не зависит от массовой скорости, а при меньшей скорости возникают крупномасштабные структуры в микротеплообменнике, вызванные, по-видимому, стеканием конденсата под действием силы тяжести, что уменьшает величину коэффициента теплоотдачи.

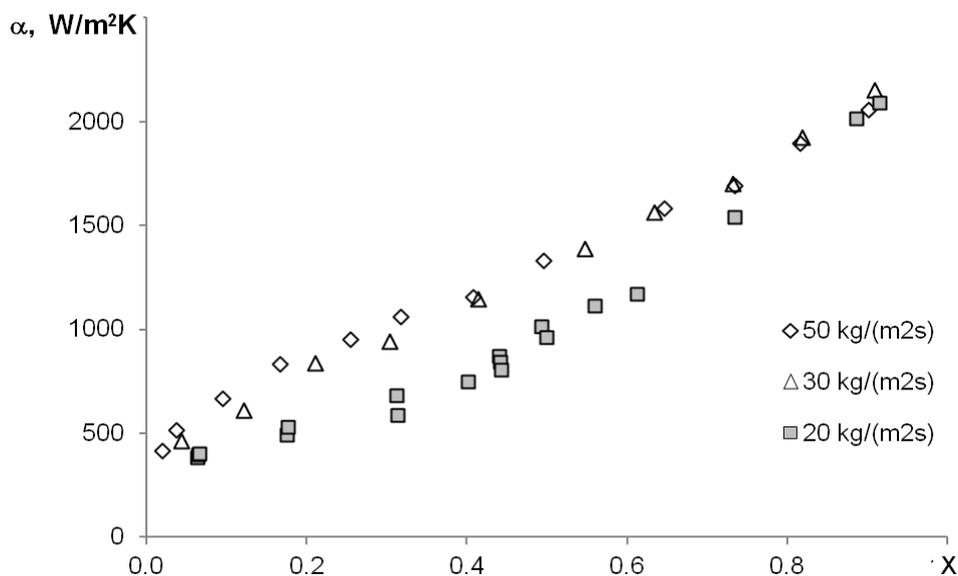


Рис. 3. Коэффициент теплопередачи при конденсации в зависимости от массового паросодержания для массовой скорости 20, 30 и 50 кг/м²с

Полученные данные устанавливают механизм теплообмена при кипении и конденсации в вертикальном микротеплообменнике и определяют величину массовой скорости, при которой возникают крупномасштабные структуры, снижающие эффективность процессов теплообмена.

Работа выполнена в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 14-49-00010).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Robertson, J.M., Lovergrove, P.C. Boiling Heat Transfer with Freon 11 in Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchangers // J. of Heat Transfer. – 1983. – V. 105(3). – P. 605 – 610.
3. Thome, J.R. State-of-the-Art Overview of Boiling and Two-Phase Flows in Microchannels // Heat Transfer Eng. – 2006. – V. 27, No. 9. – P. 4 – 19.
4. Kandlikar S.G. Similarities and Differences Between Flow Boiling in Microchannels and Pool Boiling // Heat Transfer Eng. – 2010. – V. 31, No. 3. – P. 159 – 167.

© А. С. Шамирзаев, В. В. Кузнецов, 2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, ОСАЖДЕННОЙ ИЗ ИМПУЛЬСНОГО ИМПАКТНОГО ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА

Александр Дмитриевич Назаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Анатолий Федорович Серов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, профессор, тел. (383)330-64-66, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Павел Николаевич Карпов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, аспирант, тел. (383)330-64-66, e-mail: flags712008@ya.ru

Виктор Иванович Терехов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, зав. отделением; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, профессор, тел. (383)330-67-36, e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Валерий Николаевич Мамонов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: mamonovvn@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования поведения локальных и осредненных значений толщины пленки жидкости, осажденной на вертикальную изотермическую поверхность ($T_w = 70^{\circ}\text{C}$) из импульсного многоструйного газокапельного потока при изменении скорости спутного воздушного потока. Измерения толщины пленки были выполнены многоканальным емкостным измерителем локальной толщины пленки жидкости. Показано, что в режиме подачи короткого импульса в зависимости от удельного расхода жидкой фазы образуется течение жидкости как в режиме сплошной пленки, так и в виде отдельных пленочных областей и капель жидкости.

Ключевые слова: импульсный газокапельный поток, пленка жидкости, испарение, параметры пленки жидкости.

EXPERIMENTAL STUDY OF A LIQUID FILM DEPOSITED FROM A PULSED IMPACT GAS DROPLET FLOW ON THE VERTICAL SURFACE OF THE HEAT EXCHANGER

Alexandr D. Nazarov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogov str. 1, D. Sc., tel. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Anatoly F. Serov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marks pr., 20, Prof., tel. (383)330-64-66, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Pavel N. Karpov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, graduate student., tel. (383)330-64-66, e-mail: flags712008@ya.ru

Viktor I. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marks pr. 20, Prof., tel. (383)330-67-36, e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Valery N. Mamonov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marks pr. 20, Prof., tel. (383)330-64-66, e-mail: mamonovvn@mail.ru

The paper presents the results of an experimental study of the behavior of local and averaged values of the thickness of the liquid film deposited on a vertical isothermal surface ($T_w = 70^{\circ}\text{C}$) from a pulsed multi-jet gas-droplet flow at a changing velocity of the cocurrent air flow. Measurements of film thickness were made using a multichannel capacitive meter of local thickness of liquid film. It is shown that in the regime of short pulse depending on the specific flow rate of liquid phase the liquid flow is formed both in the mode of a continuous film, and in the form of individual film areas and liquid droplets.

Key words: pulsed gas-drip flow, liquid film, evaporation, parameters of the liquid film.

Охлаждение поверхности струями диспергированной жидкости характеризуется высокой интенсивностью теплообмена [1-5]. Этим объясняется широкое применение такого способа охлаждения в энергетике, машиностроении, металлургии, химической и пищевой промышленности и т.д. В работах [6, 7] говорится, что повышение эффективности использования спрея для охлаждения требует детального исследования физических процессов, связанных с движением многоструйного газокapelного потока от форсунок до охлаждаемой поверхности, и тщательного изучения сложного механизма взаимодействия капель жидкости поверхностью теплообменника [6, 7].

Данная работа посвящена исследованию поведения пленки жидкости, осажденной из импульсного многоструйного газокapelного потока на вертикальную низкотемпературную поверхность и находящуюся под постоянным воздействием частиц жидкости импульсного спрея и импактных струй воздуха.

На рис. 1, а представлен рабочий участок экспериментального стенда, позволяющий проводить исследования влияния параметров газокapelного потока на теплообмен с плоским теплообменником. Источник газокapelного потока и поверхность теплообменника были расположены на расстоянии 0.24 м напротив друг друга вертикально относительно горизонта. На плоской части источника расположены 16 управляемых электромагнитных жидкостных форсунок

в виде матрицы 4×4 . На этой же поверхности для создания спутного воздушного потока установлены 25 газовых сопел с диаметром выходного отверстия 350 мкм. Подробно экспериментальная установка описана в [8, 9].

Измерения проводились при атмосферных условиях и температуре окружающей среды $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Рабочими фазами импульсного газочапельного потока были дистиллированная вода и воздух. Температура воздушной и жидкостной фаз аэрозоля составляли: жидкости – $(7 \div 13)^\circ\text{C}$; воздуха – $(20 \div 22)^\circ\text{C}$; температура поверхности теплообменника поддерживалась постоянной и была равной $t_w = 70^\circ\text{C}$. Средняя скорость капель воды в потоке – 5 м/с; размер частиц жидкости у поверхности теплообменника составлял от 50 мкм до 150 мкм. Формируемые источником капельные области распространяются до поверхности теплообменника в постоянном спутном воздушном потоке скоростью $Va = 8$ м/с.

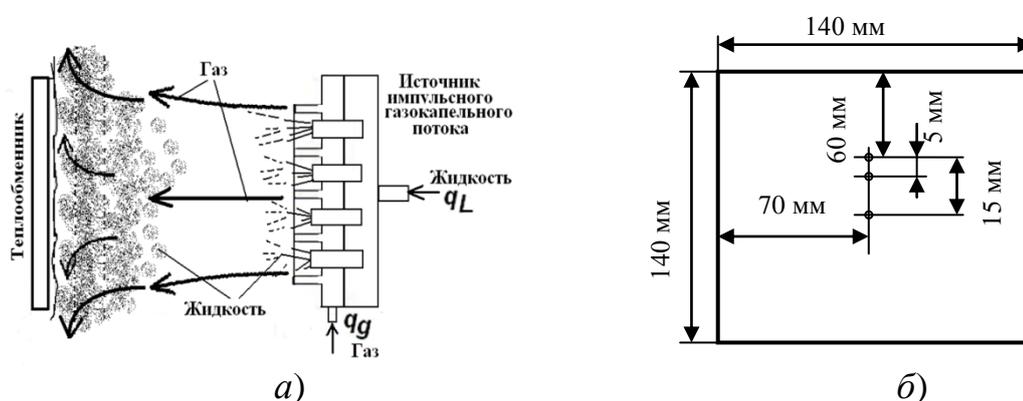


Рис. 1. Экспериментальный участок исследовательской установки:

- а) источник импульсного газочапельного потока и теплообменник;
- б) расположение зондов диэлькометрического измерителя локальной толщины пленки жидкости

Исследование параметров пленки жидкости, осажденной из импульсного газочапельного потока проводилось многоканальным диэлькометрическим измерителем локальной толщины пленки жидкости [10]. На рис. 1, б показана схема зондов регистратора локальной толщины пленки, на рабочей поверхности теплообменника. В эксперименте было использовано три зонда, вертикально по оси сечения теплообменника. Одновременно с измерением характеристик пленки определялись величины локальных и интегральных значений тепловых потоков [11].

В эксперименте формировались продолжительность капельных областей $t = 4, 10, 25, 50, 100$ мс и периодом $T = 200$ мс (частота 5 Гц), что соответствует диапазону изменения расхода жидкостно-капельной фазы $q_L = 102 \div 1020$ г/с·м².

Наблюдения показали, что при расходе жидкой фазы до $q_L < 255$ г/с·м², как со спутным, так и без спутного воздушного потока, капельная масса осаждается

на поверхность теплообменника в виде отдельных областей пленки и капель жидкости. В диапазоне расходов жидкости $255 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2 < q_L < 510 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$ жидкостно-капельная фаза без спутного воздушного потока осаждается на поверхность в виде однородного пленочного покрытия. Со спутным воздушным потоком однородное пленочное покрытие на поверхности теплообменника не образуется. Жидкость формируется в этом случае в виде пятен пленки с сухими участками между ними. На рис. 2 показан профиль локальной толщины пленки жидкости такого переходного режима. Осажденная пленка жидкости на поверхность теплообменника соответствует режиму импульсов капельной фазы $t = 25$ мс и периодом $T = 200$ мс (расход $q_L = 244 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$) со спутным воздушным потоком скоростью $V_a = 8 \text{ м/с}$ и без него $V_a = 0 \text{ м/с}$.

На рис. 2 изменения локальной толщины пленки осажденной жидкости во времени получены в одной точке. По нижней кривой рисунка ($V_a = 8 \text{ м/с}$) видно, что на поверхности теплообменника пленка жидкости, сформированная осаждением капель жидкости, остается сплошной лишь в течении 100 мс от начала взаимодействия капельной области с поверхностью. Затем наблюдается разрыв пленки с испарением на границе раздела фаз. При режиме без спутного потока, датчики регистрируют сплошную пленку жидкости, без разрывов (кривая $V_a = 0 \text{ м/с}$).

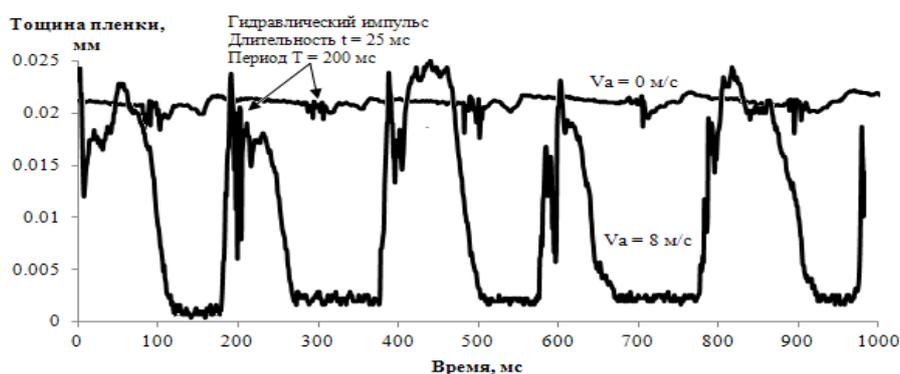


Рис. 2. Профиль локальной толщины пленки при режиме формирования импульса капельной области длительности $t = 25$ мс и периодом $T = 200$ мс ($q_L = 244 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$) при спутном воздушном потоке: $V_a = 0 \text{ м/с}$ и $V_a = 8 \text{ м/с}$

При расходе жидкости выше $510 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$, что соответствует длительности открытия клапанов $t > 50$ мс, на поверхности теплообменника наблюдается устойчивое пленочное течение как без спутного воздушного потока, так и с ним. На рис. 3, а демонстрируется фотография пленочного покрытия, а на рис. 3, б профиль локальной толщины пленки жидкости, сформированной импульсным потоком жидкой фазы с параметрами длительности открытия клапанов $t = 50$ мс и периодом $T = 200$ мс ($q_L = 510 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$) без спутного воздушного потока. На поверхности пленки наблюдается неравномерность амплитудой до 10 микрометров, что говорит о безволновой пленочной структуре. На рис. 3, в показан

профиль локальной толщины пленки для того же режима импульсного спрея, но со спутным воздушным потоком скоростью $Va = 8$ м/с. Из графика видно, что средняя толщина пленки под действием воздушного потока уменьшилась более чем в два раза. На поверхности наблюдается неравномерность, как и в предыдущем случае, не превышающая 10 мкм.

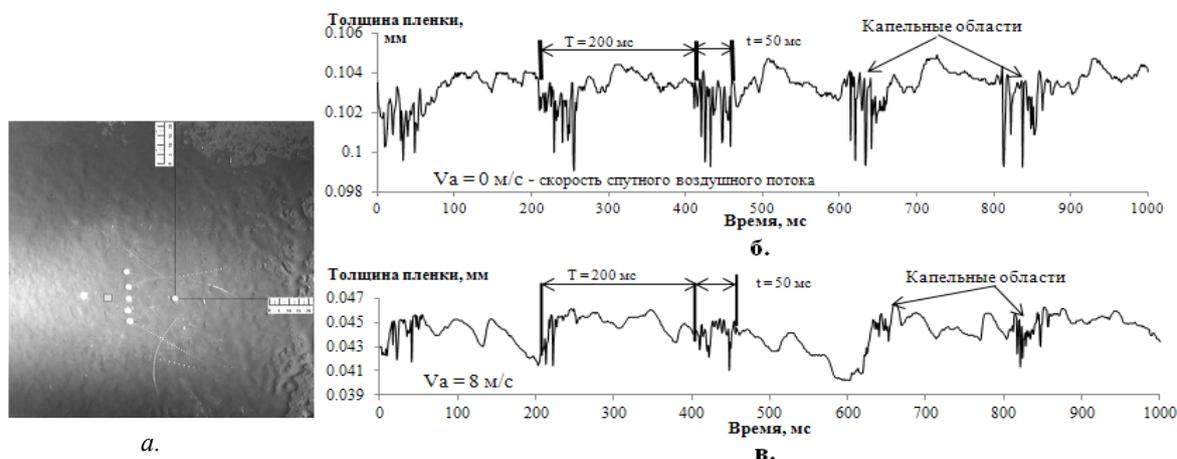


Рис. 3. Профиль локальной толщины пленки жидкости, осажденной из импульсной капельной струи (расход жидкой фазы $q_{L2} = 510$ г/с·м²)

На рис. 4 показаны зависимости среднего расчетного и экспериментального значений толщины пленки жидкости, осажденной на поверхность теплообменника из импульсного аэрозоля без спутного воздушного потока ($Va = 0$ м/с) и со спутным воздушным потоком ($Va = 8$ м/с). Экспериментальные кривые соответствуют значениям средней толщины, полученным усреднением показаний всех используемых емкостных датчиков. Расчетная кривая отображает среднюю толщину пленки, посчитанную по формуле [12]: $\delta = 0.52 (\nu U/g)^{1/2}$, где ν – кинематическая вязкость воды при температуре стенки $t_w = 70$ °С, U – скорость пленки, полученная в эксперименте по видеоданным, g – ускорение силы тяжести.

Расчетные значения средней толщины пленки значительно меньше полученных в экспериментах. Это можно объяснить тем, что формула для расчета средней толщины пленки была получена для гравитационной пленки, стекающей по вертикальной поверхности с источником орошения в верхней части пластины. Кроме того, в нашем случае, при орошении импульсным спреем капельные области осаждаются не на всю поверхность теплообменника, а на площадь, равную примерно 80 % от общей площади орошаемой поверхности.

По результатам сравнения средней толщины пленки без спутного и со спутным потоком можно сделать вывод о том, что импактная воздушная струя увеличивает скорость растекания капель жидкости при их взаимодействии с поверхностью, тем самым утончая пленку [13,14] и увеличивая площадь поверхности, покрываемую жидкой фазой. Влияние спутного потока на толщину

пленки возрастает по мере увеличения расхода капельной фазы. При расходе жидкости меньше $510 \text{ г/с}\cdot\text{м}^2$ капли жидкости осаждаются в виде тонкой пленки жидкости. В этом случае влияние спутного потока на уменьшение толщины, и на увеличение площади жидкостного покрова на поверхности практически не оказывается.

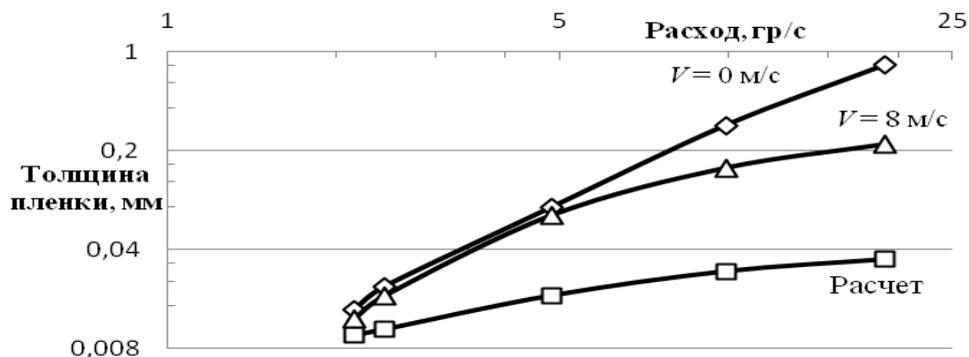


Рис. 4. Средняя толщина пленки жидкости осажденной капельной фазы импульсного аэрозоля со спутным воздушным потоком и без него (эксперимент) и расчетные значения средней толщины пленки

Для определения скорости пленки были сделаны фотографии в виде последовательных серий с временным интервалом 0,1 секунда между снимками. Для метрических измерений на фотографиях присутствуют метки в виде линейки со шкалой в 5 мм (рис. 3, а). Анализ данных показал, что без спутного воздушного потока, осажденная из импульсного газокapельного потока пленка, под действием гравитации стекает вниз. При спутном воздушном потоке наблюдается движение от центра к периферийной части поверхности во все стороны. И в первом и во втором случаях скорость движения пленки невелика и не превышает 0,01 м/с.

Число Рейнольдса пленки $Re = U\delta/\nu$ (U – скорость движения пленки, δ – средняя толщина пленки, ν – кинематическая вязкость воды при температуре 70°C) в проведенных экспериментах изменялась в диапазоне $Re = 0 \div 20$ в зависимости от условий проведения эксперимента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ №14 – 19 – 00402.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sailor D.J., Rohli D.J., Fu Q. Effect of variable duty cycle flow pulsations on heat transfer enhancement for an impinging air jet. – Int. J. of Heat and Fluid Flow. – 1999. – 20. – P.574-580
2. Panão M.R.O., Moreira A.L.N. Intermittent spray cooling: A new technology for controlling surface temperature. - Int. J. Heat and Fluid Flow. - 2009. - 30. P. 117–130

3. Mohammadpour J., Zolfagharian M.M., Mujumdar A.S., Zargarabadi M.R., Abdulahzadeh M. Heat transfer under composite arrangement of pulsed and steady turbulent submerged multiple jets impinging on a flat surface. – Int. J. Thermal Sciences. - 2014.- 86. P. 139-147
4. Исаченко В.П., Кушнырев В.И. Струйное охлаждение. – М.; Энергоатомиздат. – 1984. – 216 с.
5. Kim J. Spray cooling heat transfer: The state of the art. – Int. J. Heat and Fluid Flow. – 2007. – 28. P. 753–767
6. Пахомов М.А., Терехов В.И. Интенсификация турбулентного теплообмена при взаимодействии туманообразной осесимметричной импактной струи. – ПМТФ. – 2011. – Т. 52, №1. – С.119-131.
7. Пахомов М.А., Терехов В.И. Структура течения и турбулентный тепломассоперенос в лобовой точке импактной импульсной газочапельной струи // ТВТ. – 2014. – Т. 52, № 4. – С. 588–596.
8. Назаров А. Д., Серов А. Ф., Терехов В. И. Влияние спутного газового потока в импульсном аэрозоле на процесс испарительного охлаждения // ТВТ.– 2014.– Т.52, № 4. – С. 1–4.
9. Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Влияние спутного газового потока в импульсном аэрозоле на теплообмен // Труды 6-ой РНКТ, РНКТ-6, Москва: НИ МЭИ (ТУ). – 2014. С.5-22. - 4 с.
10. Назаров А.Д. Разработка методов и электронных средств для теплофизических исследований двухфазных потоков. – 2013. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск. ИТ СО РАН – 273 с.
11. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. Ст.- Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2007, 202 с.
12. White D.A., Tallmadge J.A. Theory of Drainage of Liquids on Flat Plates // Chem. Eng. Sci. – 1965. – Vol. 20. – P. 33.
13. Назаров А.Д., Серов А.Ф., Бодров М.В. Интенсификация охлаждения импульсным газочапельным потоком. Аппаратура, параметры, результаты. - ЖТФ. – 2010. – Т.80, №5. – С.132-135.
14. Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в импульсном спрее. - Всероссийская конференция «XXXI Сибирский теплофизический семинар», 17-19 ноября 2014, Новосибирск, С.117.

© А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, П. Н. Карнов, В. И. Терехов, В. Н. Мамонов, 2016

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ НАД ПЛЕНКОЙ ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ПОДЛОЖКЕ С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬЮ

Игорь Геннадьевич Намятов

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики и химии горения газов, тел. (383)333-22-96, e-mail: ign@kinetics.nsc.ru

Алексей Анатольевич Коржавин

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор технических наук, зав. лаборатории физики и химии горения газов, тел. (383)333-22-96, e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

Александр Васильевич Вьюн

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики

Экспериментально изучалось распространение пламени над пленкой жидкого топлива, нанесенного на подложку с низкой теплопроводностью. Цель исследования заключалась в определении основного механизма переноса тепла в процессе распространения пламени. Скорость распространения пламени над пленкой спиртов (бутанол-1, бутанол-2), нанесенных на подложку из полиэтилентерефталата (толщиной 50 мкм) составляет 2-3 см/с. По экспериментальным данным проведена оценка тепловых потоков в предпламенную зону за счет различных механизмов. Показано, что большая часть тепла передается в результате движения жидкости, вызванного градиентом сил поверхностного натяжения, вследствие градиента температуры в системе жидкое топливо - подложка.

Ключевые слова: горение, тонкие пленки, жидкое топливо.

FLAME SPREADING OVER LIQUID FUEL FILM DEPOSITED ON THE SUBSTRATE WITH LOW TEMPERATURE DIFFUSIVITY

Igor G. Namyatov

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya str., Ph. D., tel. (383)333-22-96, e-mail: ign@kinetics.nsc.ru

Alexei A. Korzhavin

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya str., D. Sc., head of Laboratory of gas combustion chemistry and physics, tel. (383)333-22-96, e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

Alexandr V. V'yun

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D.

Flame spreading over liquid fuel film deposited on the substrate with low temperature diffusivity was studied experimentally. The goal of this study was to find the main heat transfer mechanism in the process of flame spreading. Velocity of flame spreading over the films of alcohols (1-butanol, 2-butanol) deposited on the polyethyleneterephthalate substrate (50 mkm thickness) is 2-3 cm/s. Using experimental data the estimation of heat transfer rate in preflame zone due to various mechanisms was made. It is shown that the most of heat energy is transferred due to the liquid motion. The liquid motion is caused by gradient of surface tension forces owing to temperature gradient in the system of liquid fuel–substrate.

Key words: combustion, thin films, liquid fuel.

Распространение пламени над поверхностью горючего вещества - довольно сложное явление, так как в нем взаимосвязано много химико-физических процессов, таких как теплопроводность, диффузия, испарение, пиролиз, движение газа и жидкости, химическая кинетика и др. В предыдущих работах [1-3] была предложена система жидкое топливо на тонкой металлической подложке. Было показано, что эта система является термически тонкой, что позволяет упростить физико-математическую модель процесса. В результате экспериментальных исследований и расчетов было показано, что основным механизмом распространения пламени является передача тепловой энергии за счет теплопроводности подложки.

В данной работе объектом исследования является процесс распространения пламени над поверхностью жидкого топлива, нанесенной на подложку с низкой температуропроводностью. Использовалась следующая постановка эксперимента. На полосу подложки наносилась пленка топлива, и инициировалось пламя открытым огнем. Схема эксперимента показана на рис. 1. В качестве подложки использовалась полоса полиэтилентерефталата (лавсана), шириной 10 см и длиной 50 – 100 см, толщиной 50 мкм. Топливо – спирты: бутанол, 2-бутанол. Подложка ориентировалась в пространстве вертикально, горизонтально или под некоторым углом к вектору силы тяжести. В результате распространения пламени на вертикальной подложке сверху вниз полиэтилентерефталат плавился и горел. Потому топливо наносилось не по всей ширине подложки, а полосой шириной 5 – 6 см, края шириной 2,5 – 2 см оставались сухие и не плавилась, тем самым поддерживая подложку в пространстве. Характерная скорость распространения пламени при комнатной температуре около 2 – 3 см/с.

Целью исследования ставилось изучить механизмы распространения пламени и построение физической и математической модели явления. Необходимым условием распространения пламени является передача необходимого количества тепла из горячей зоны в предпламенную зону, чтобы подогреть топливо и создать смесь паров топлива и воздуха достаточную для горения. В системе отсчета, связанной с пламенем, можно записать уравнение для средней температуры (T) конденсированной фазы (пленки жидкости и подложки):

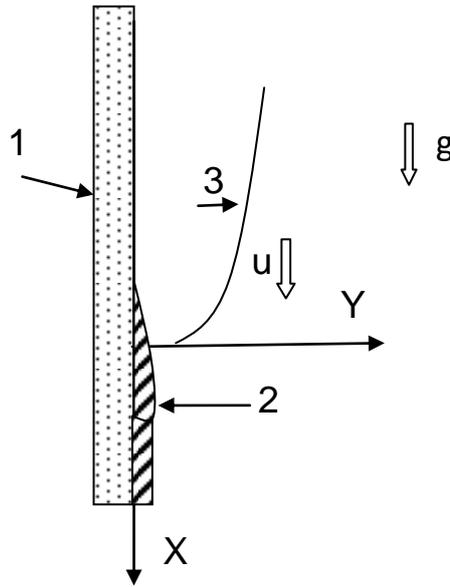


Рис. 1. Схема распространения пламени:

1 – подложка, 2 – пленка топлива, 3 – фронт пламени

$$u \frac{dT}{dx} - k \frac{d^2T}{dx^2} - \frac{c_f p_f h_f}{c_s p_s h_s + c_f p_f h_f} \frac{\sigma_T h_f}{2\mu} \frac{dT^2}{dx^2} + w(2T - T_b - T_o) = 0, \quad (1)$$

где u – скорость движения пламени, k – эффективная температуропроводность конденсированной фазы, T_b T_o – температура пламени и окружающей среды, x – координата в плоскости подложки по направлению движения пламени, c , ρ , h – теплоемкость, плотность и толщина, подстрочные символы s и f относятся к

подложке и пленке жидкого топлива, $w = \frac{\alpha}{c_s p_s h_s + c_f p_f h_f}$, α – коэффициент теплообмена. За передачу тепла в предпламенной зоне отвечает теплопровод-

ность по конденсированной фазе $k \frac{d^2T}{dx^2}$ и движение жидкости за счет измене-

ния силы поверхностного натяжения $\frac{c_f p_f h_f}{c_s p_s h_s + c_f p_f h_f} \frac{\sigma_T h_f}{2\mu} \left(\frac{dT^2}{dx^2} \right)$. В условиях

градиента температуры жидкость за счет сил поверхностного натяжения течет из зоны с высокой температурой в более холодную зону, перенося тем самым тепловую энергию.

Проводилась серия экспериментов с целью измерения температуры подложки. Измерения проводились термопарой медь-константан, расположенной с обратной стороны подложки, чтобы не создавать препятствий для движения жидкости. Характерный вид температуры при прохождении пламени показан на рис. 2 (линия 1). В этом случае использовалось топливо буталол-2, скорость

пламени составляла 2,1 см/с, ориентация подошки вертикальная, движение пламени сверху вниз. Вследствие того, что температуропроводность полиэтилентерефталата низкая, температура по толщине подошки неодинаковая. Чтобы узнать температуру поверхности подошки со стороны пламени необходимо оценить распределение

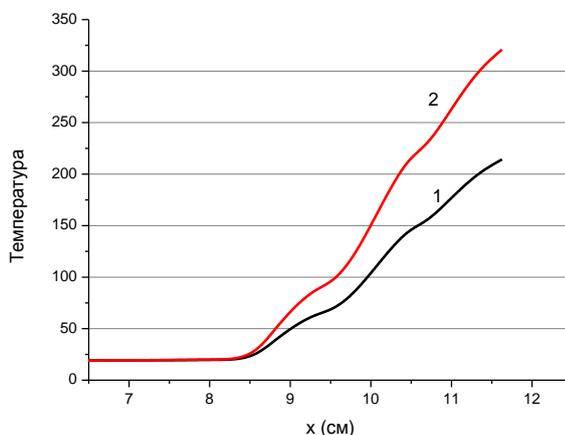


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности подошки:

1 – с обратной стороны пламени (эксперимент), 2 – со стороны пламени (расчет)

температуры по толщине. В системе отсчета связанной с пламенем уравнение теплопроводности в твердой фазе выглядит следующим образом:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} - k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - k_s \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0,$$

где k_s – температуропроводность подошки, y – координата, нормальная к поверхности подошки. Решение:

$$T(x, y) - T_0 = C e^{p \frac{k_s}{u} x} e^{\sqrt{p} y}.$$

Таким образом, отклонение температуры от начальной на разных поверхностях подошки отличается на множитель $e^{\sqrt{p} h_s}$, т.е. $\frac{T(y = h_s) - T_0}{T(y = 0) - T_0} = e^{\sqrt{p} h_s}$.

Коэффициент p можно найти на основе экспериментальных данных по температуре с обратной стороны подошки. На рис. 2 (линия 2) показано скорректированное таким образом распределение температуры поверхности подошки со стороны пламени.

В уравнении (1) коэффициент $\frac{\sigma_T h_f}{2\mu} \left(\frac{dT}{dx} \right)$ – средняя скорость движения жидкости. На поверхности жидкости скорость равна $\frac{\sigma_T h_f}{\mu} \left(\frac{dT}{dx} \right)$. По оценкам

из экспериментальных данных передача тепла за счет движения жидкости на порядок больше, чем за счет теплопроводности по конденсированной фазе. Теплотери в окружающую среду перед фронтом пламени также малы, вследствие малой разности температур. Если пренебречь теплопроводностью и теплотерями в окружающую среду в предпламенной зоне, то уравнение для температуры перед фронтом пламени на поверхности жидкости будет иметь вид:

$$u \frac{dT}{dx} - \frac{\sigma_T h_f}{\mu} \frac{dT^2}{dx^2} = 0.$$

Отсюда следует, что непосредственно перед фронтом пламени скорость движения жидкого топлива на поверхности равна скорости распространения пламени. По оценкам толщина пленки топлива hf в этой точке равна 15 – 20 мкм, а градиент температуры $\frac{dT}{dx}$ около 300 К/см. При таком градиенте зона прогрева жидкости, в которой должно быть активное течение за счет поверхностного натяжения, должна быть короткой, порядка миллиметра.

Были поставлены следующие эксперименты. В жидкое топливо добавлялся флюоресцентный краситель, пленка жидкости подсвечивалась пучком света с длиной волны, соответствующей поглощению этого красителя. Увеличение флюоресценции соответствовало увеличению толщины пленки жидкости, за счет интенсивного движения жидкости. Эта зона наблюдалась непосредственно под передним краем пламени, и ее ширина составляла 1 – 1,5 мм.

На основе экспериментальных измерений температуры (рис.2) показано, что градиент температуры на поверхности подложки составляет 100-150 К/см. На поверхности пленки жидкости температура и ее градиент должен быть больше, необходимы дальнейшие исследования по расчетам температуры, скорости движения и толщины пленки жидкости в зоне переднего фронта пламени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поведение пламен, распространяющихся по пленкам жидкости на металлических подложках / А. А. Коржавин, В. А. Бунев, Д. М. Гордиенко, В. С. Бабкин // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 3. – С. 15–18.
2. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках / А. А. Коржавин, В. А. Бунев, И. Г. Намятов, В. С. Бабкин // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 25–30.
3. Диффузионное горение пленки жидкого топлива на металлической подложке / И. Г. Намятов, С. С. Минаев, В. С. Бабкин, В. А. Бунев, А. А. Коржавин // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, № 5. – С. 12–21.

© И. Г. Намятов, А. А. Коржавин, А. В. Вьюн, 2016

НОВЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ В ДИСТИЛЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ СО СТРУКТУРИРОВАННЫМИ НАСАДКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ЖИДКОСТИ

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

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)330-87-00, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

Александр Дмитриевич Назаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Анатолий Федорович Серов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Николай Богданович Миськив

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, лаборант; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, тел. (383)330-64-66, e-mail: nikerx@gmail.com

Ксинганг Ли

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: exg@tju.edu.cn

Бен Цзян

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: binjiang@tju.edu.cn

Хонг Суй

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: suihong@tju.edu.cn

Хонг Ли

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: lihong@tju.edu.cn

Гао Синь

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-00, e-mail: gaixin@tju.edu.cn

Описана автоматизированная система крупномасштабного стенда «Большая фреоновая колонна» по разработке и проверке принципиально нового метода повышения эффективности разделения смеси в дистилляционных установках со структурированными насадками с использованием динамически управляемого распределителя жидкости. Предложенный подход заключается в разрушении устойчивых структур неравномерностей распределения жидкости и пара путем динамического орошения структурированной насадки (по поперечному сечению колонны). Проведенные испытания показали возможность повышения эффективности разделения смесей на структурированных насадках с использованием данного метода.

Ключевые слова: дистилляция, разделение смеси, структурированная насадка, распределитель жидкости.

DYNAMICALLY CONTROLLED LIQUID DISTRIBUTOR FOR DISTILLATION COLUMN WITH A STRUCTURED PACKING

Alexandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Sc., Head. the low temperature of the Laboratory of Thermal Physics, tel. (383)328-43-87, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

Vladimir E. Zhukov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Nikolay I. Pecherkin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: pecherkin@itp.nsc.ru

Alexandr D. Nazarov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., tel. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Anatoly F. Serov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Prof., tel. (383)330-64-66, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Nikolay B. Miskiv

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, assistant; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, K. Marks pr., 20, Student, tel. (383)330-64-66, e-mail: nikerx@gmail.com

Xingang Li

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Prof., Leading Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: exg@tju.edu.cn

Bin Jiang

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Leading Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: binjiang@tju.edu.cn

Hong Sui

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: binjiang@tju.edu.cn

Hong Li

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: lihong@tju.edu.cn

Gao Xin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Senior Scientist, tel. (383)330-87-00, e-mail: gaixin@tju.edu.cn

Here we describe the automated system of the large-scale setup “Large Freon Column” for development and check of a fundamentally new method of increasing the efficiency of mixture separation in the distillation apparatuses with the structured packing using the dynamically controlled liquid distributor. The proposed approach is based on destruction of the stable structures of liquid and vapor maldistribution by means of dynamic irrigation of the structured packing (over the column cross-section). These tests have shown the possibility to improve the efficiency of mixture separation on the structured packing by using this method.

Key words: distillation, separation of mixtures, structured packing, liquid distributor.

Исследования по изучению взаимосвязи параметров течения двухфазного потока жидкости и пара и эффективности разделения смесей в структурированных насадках интенсивно развиваются в последнее время, поскольку данные контактные массообменные поверхности все более широко используются в дистилляционных колоннах различного назначения [1 – 3]. Орошение структурированных насадок в крупномасштабных дистилляционных колоннах осуществляется распределителями жидкости, имеющими фиксированное количество/плотность точек орошения с заданной структурой их расположения по сечению аппарата. При стационарном задании точек орошения в условиях пленочного течения жидкости и противоточного потока пара развиваются весьма значительные крупномасштабные неравномерности распределения параметров потока (локальных расходов, температур и концентраций жидкости и пара) по сечению, которые приводят к существенному снижению эффективности разделения смесей на структурированных насадках в дистилляционных колоннах

большого диаметра [3 – 5]. Для разрушения крупномасштабных неравномерностей в насадке дистилляционной колонны авторами предлагается новый подход, заключающийся в динамическом изменении структуры точек орошения в распределителе жидкости. Эффективность воздействия на крупномасштабные структуры потока смеси внутри насадки контролируется в реальном времени измерениями распределения температур в различных по высоте колонны сечениях насадки. Автоматизированный комплекс динамического управления орошением насадки дистилляционной колонны диаметром 0.9 м создан на базе экспериментального стенда “Большая фреоновая колонна” [4, 5].

Комплекс состоит из следующих основных блоков, схематично показанных на рис. 1:

- распределитель жидкости (2) с 128 независимо управляемыми электромагнитными клапанами;
- электронный блок управления клапанами распределителя жидкости (5);
- коммутирующий модуль на 48 датчиков температуры (3 уровня по 16 датчиков) (6);
- компьютерная программа управления распределителем жидкости и программа измерения и отображения распределения температуры в 3-х сечениях насадки (7).

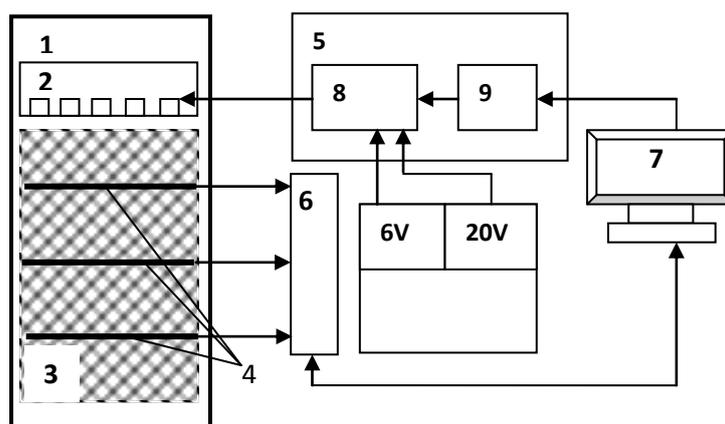


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного комплекса динамического управления орошением насадки дистилляционной колонны:

- 1 – дистилляционная колонна; 2 – управляемый распределитель жидкости;
 3 – структурированная насадка; 4 – датчики температуры (3 уровня по 16 датчиков);
 5 – электронный блок управления клапанами; 6 – коммутирующий модуль датчиков температуры; 7 – компьютер; 8 – усилитель-формирователь; 9 – крест LTR с модулями ключей LTR-42; 10 – блок питания клапанов

Управляемый распределитель жидкости представляет собой цилиндрический сосуд с плоским дном, в котором равномерно установлены 128 съемных сопел с заданным диаметром отверстия (диаметр отверстий 5 мм). Расход

жидкости через все сопла одинаков и определяется уровнем жидкости в распределителе. В разработанной конструкции над каждым соплом установлен электромагнит, шарообразный конец якоря которого является запорным клапаном для сопла. В обесточенном состоянии все клапаны закрыты. Ток гарантированного открытия клапана 3 А, при этом время срабатывания электромагнита 80 – 100 мс, ток удержания в открытом состоянии – 0.9 А. Активное сопротивление соленоида – 6 Ом. Все элементы электромагнитов и изоляция обмотки выполнены из фреоностойких материалов, что гарантирует надежную эксплуатацию оборудования при использовании в экспериментах смесей фреонов R21и R114.

В экспериментах использовались 3 группы датчиков температуры по 16 штук, установленных в трех уровнях по высоте колонны. Информация о распределении температуры по сечению насадки в нижней, средней и верхней частях колонны в режиме реального времени позволила регистрировать формирование крупномасштабных неравномерностей и их реакцию на различные режимы динамически управляемого орошения насадки. В качестве датчиков температуры использовались стандартные кремниевые диоды КД512. Кремниевые приборы имеют хорошую временную стабильность, малые габариты (бескорпусные приборы – менее миллиметра), высокую чувствительность (порядка 2 мВ/град), низкую стоимость. Кроме того, используя свойство односторонней проводимости диодов, реализованы различные коммутационные схемы с использованием диодов-термометров. Данный способ коммутации сокращает число измерительных линий, что важно при многоточечном измерении температуры в различных зонах структурированной насадки. В нашем случае была разработана измерительная система, которая обеспечивает опрос трех групп по 16 датчиков в группе с помощью одного четырехканального 24-разрядного дельта-Сигма АЦП со встроенным цифровым фильтром и погрешностью измерения температуры в точке 0.125 % (~ 0.05 град.).

На рис. 2 представлены структуры точек орошения и фотографии орошающего потока верхнего сечения насадки при периодическом переключении клапанов в управляемом распределителе жидкости. На рис. 2а показана структура 1, где черными точками отмечены клапаны в открытом положении продолжительностью t_1 . Рис. 2б демонстрирует фотографию потока, соответствующую структуре точек орошения 1, на рис. 2в, 2г – представлены структура точек орошения 2 с продолжительностью открытия t_2 и фотография потока, соответствующая этой структуре. Полный период орошения распределителем *period* t равен сумме продолжительностей полупериодов t_1 и t_2 : *period* $t = t_1 + t_2$.

На рис. 3 представлено распределение температуры по сечению структурированной насадки в верхней (рис. 3а) и нижней (рис. 3б) частях колонны при периодическом орошении управляемым распределителем жидкости при значении приведенной скорости пара $K_v = 0.022$ м/с.

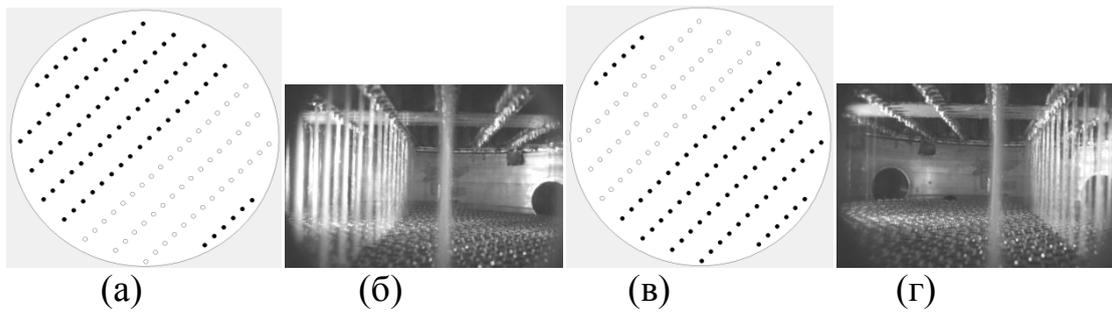


Рис. 2. Структура точек орошения при периодическом переключении клапанов в управляемом распределителе жидкости:

а – полупериод t_1 , б – фотография потока орошения для структуры 1, в – полупериод t_2 , г – фотография для потока структуры 2

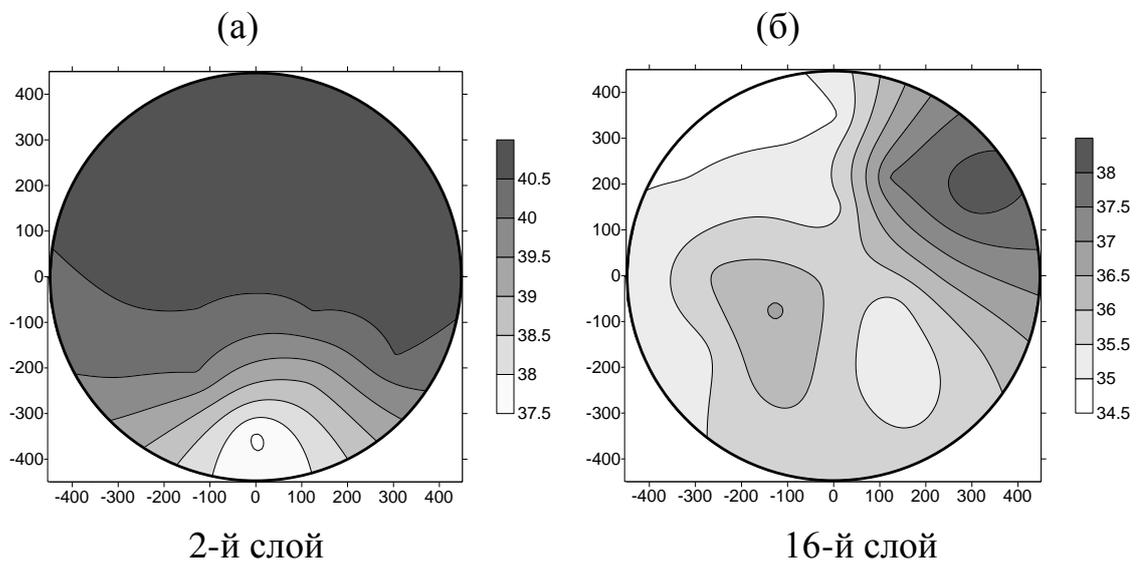


Рис. 3. Распределение температуры по сечению структурированной насадки в нижней (а) и верхней (б) частях колонны при периодическом орошении управляемым распределителем жидкости

На рис. 4 приведена зависимость высоты переноса HTU от времени полного периода переключения клапанов $period\ t$ в управляемом распределителе жидкости. Метод расчета величины HTU , характеризующей эффективность разделения смеси, детально описан в [3]. Точки в виде ромба (1) соответствуют равномерному стационарному режиму орошения, квадратные точки (2) – периодическому орошению. Опытные данные для двух способов орошения насадки, представленные на рис. 6, получены при одинаковых значениях так называемого фактора нагрузки $F_v = U_v \sqrt{\rho_v}$, характеризующего скорость пара (здесь: U_v – приведенная скорость пара, м/с; ρ_v – плотность пара, кг/м³). Из данных, приведенных на рисунке, видно, что при периодическом орошении по сечению

насадки, эффективность разделения смеси выше, чем при стационарном орошении насадки. Максимальная эффективность разделения, при которой достигается снижение величины HTU примерно на 20 % - 30 %, соответствует значению $period\ t = 110$ сек.

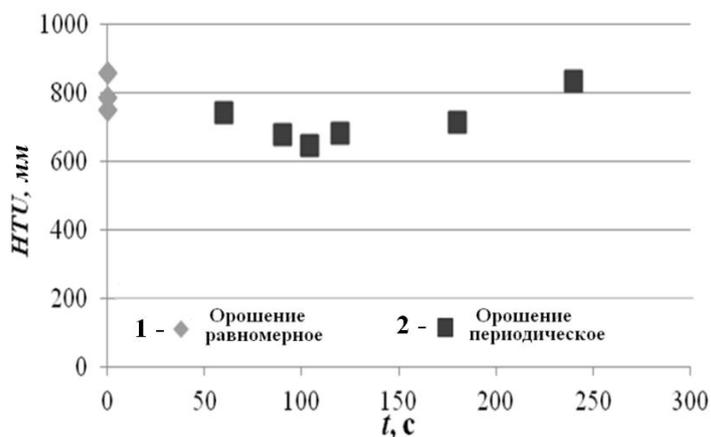


Рис. 4. Зависимость высоты единицы переноса от периода переключения клапанов в распределителе жидкости: 1 – $F_v = 0.63-0.65$; 2 – $(0.64-0.66) \text{ Па}^{1/2}$

Результаты исследований наглядно демонстрируют положительный эффект использования метода динамического орошения регулярной насадки на эффективность разделения смеси. Последующие серии опытов будут направлены на поиск оптимальных параметров динамического управления структурами точек орошения распределителя для широкого диапазона расходов жидкости и пара, их соотношения в структурированных насадках различной высоты.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Soulaire C., Horgue P., Franc, J., Quintard M., Gas-Liquid Flow Modeling in Columns Equipped with Structured Packing // *AIChE J.* 2014. V. 60. Issue 10. P. 3665– 3674.
2. Ehlers C., Fieg G., Experimental Validation of a Flexible Modeling Approach for Distillation Columns with Packings // *AIChE J.* 2014. V. 60. Issue 11. P. 3833– 3847.
3. 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. V. 60. Issue 2. P. 690-705.
4. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Сандер С., Хоуптон П. Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов // *Теоретические основы химической технологии.* 2009. Т. 43. № 1. С. 3-13.
5. Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Сандер С., Хоуптон П. Развитие неравномерности распределения состава смеси в структурированной насадке дистилляционной колонны // *Теоретические основы химической технологии.* 2010. Т. 44. № 6. С. 1-11.

© А. Н. Павленко, В. Е. Жуков, Н. И. Печеркин, А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, Н. Б. Миськив, Ксинганг Ли, Бен Цзян, Хонг Суй, Хонг Ли, Гао Синь, 2016

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИТИЧЕСКИХ ЗАРОДЫШАХ НА ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОРОСТИ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ

Михаил Прокопьевич Анисимов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией наноаэрозолей, тел. (383)306-62-13, e-mail: anisimovmp@mail.ru

Валентин Николаевич Пармон

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 5, доктор химических наук, научный руководитель Института катализа СО РАН, тел. (383)330-82-69, e-mail: PARMON@catalysis.ru

Ольга Олеговна Петрова-Богданова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-13, e-mail: petrovabogdanovaoo@mail.ru

Поверхности скоростей зародышеобразования восстают над областями метастабильных состояний фаз. Общеизвестно, что каждая линия равновесия фаз порождает две поверхности скоростей нуклеации, по числу фаз, находящихся в равновесии. Эти поверхности пересекаются, создавая достаточно сложные геометрические образы. В работе приводятся доказательства влияния фазовых переходов первого и второго рода в критических зародышах на особенности топологии поверхностей скорости зародышеобразования.

Ключевые слова: поверхности скоростей зародышеобразования, диаграммы фазовых равновесий, фазовые переходы.

THE IMPACT OF THE PHASE TRANSITIONS IN THE CONDENSED METER EMBRYOS ON THE NUCLEATION RATES SURFACE TOPOLOGIES

Michael P. Anisimov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya St., Doctor in Physics and Mathematics, Head of the Nanaerosol Research Laboratory, tel. (383)306-62-13, e-mail: anisimovmp@mail.ru

Valentin N. Parmon

Boreskov Institute of Catalysis, SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 5 Akademik Lavrentiev Prospect, Doctor in Chemistry, the Institute Scientific Adviser, tel. (383)330-82-69, e-mail: PARMON@catalysis.ru

Olga O. Petrova-Bogdanova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, SB RAS, 630058, Novosibirsk, Russian Federation, 41, Russkaya St., Junior Researcher, tel. (383)306-62-13, e-mail: petrovabogdanovaoo@mail.ru

The nucleation rate surfaces are arising over the phase metastable areas. It is well known that each line of the phase equilibria produces two nucleation rate surfaces which are generated by two phases in equilibrium. These surfaces cross each other originating geometrical images complicated enough. An influence of the phase transitions of the first and the second order within the critical embryos on the nucleation rate surfaces topologies is proved and presented in the frame of the given research.

Key words: nucleation rates surface, diagram of phase equilibria, phase transitions.

Условия фазового равновесия могут быть представлены линиями сосуществования метастабильных фаз на диаграммах фазового равновесия. Поверхности скоростей нуклеации восстают из каждой линии метастабильных и стабильных равновесий фаз [1]. Две поверхности скоростей нуклеации восстают в окрестности тройной точки для каждого перехода первого рода пара, т.е. для переходов пар-жидкость и пар-кристалл, как схематически показано на рис. 1. Экспериментальное доказательство существования двух каналов нуклеации было получено Анисимовой и др. [2]. На рисунке четко видна линия пересечения поверхностей скорости зародышеобразования [3], линия *et*.

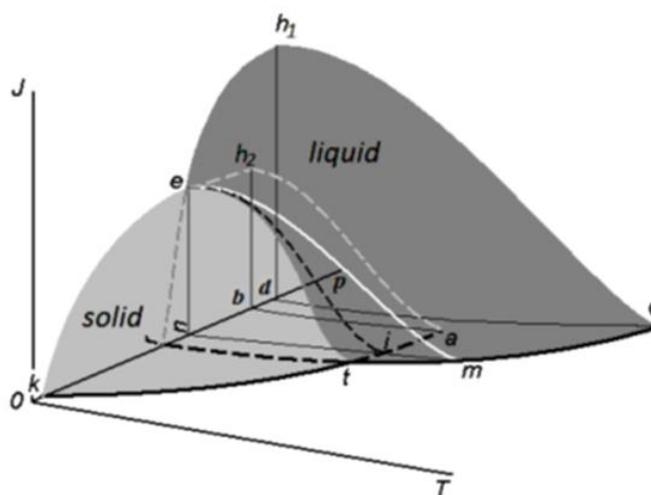


Рис. 1. Топология поверхностей скорости нуклеации в окрестности тройной точки. Поверхность скоростей для пар-твердое окрашена в светло серый цвет, а поверхность пар-жидкость – в темно серый. *J* – скорость нуклеации, *T* – температура, *P* – давление. Линия *kt* принадлежит линии равновесия пар-твердое, а *rtc* – линии равновесия пар-жидкость; *t* – тройная точка; *c* – критическая точка

Несколько случаев образования поверхностей скорости нуклеации для парогазовой системы были найдены в работе [4]. Математические условия для непрерывности и монотонности поверхностей могут быть применены для определения особенностей поверхностей скорости зародышеобразования [5]. Например, каждая поверхность задается уравнением, где реализуются следующие условия $J(T, S) = \text{constant}$:

$$\left(\frac{\partial nJ}{\partial T}\right)_{S,P_1\dots P_n} + \left(\frac{\partial nJ}{\partial nS}\right)_{T,P_1\dots P_n} + \left(\frac{\partial nS}{\partial T}\right)_{J,P_1\dots P_n} = A \quad (1)$$

Значение критерия A равно нулю, если поверхности скорости нуклеации для пара $J = J(T, S)$ монотонны и непрерывны. Здесь S и P_i – перенасыщение и парциальные давления компонентов для изотермических ($T = \text{const}$) условий системы. В случае нарушения монотонности и непрерывности поверхности скорости нуклеации, значение критерия A отличается от нуля. Случай n переменных рассмотрен Анисимовым и др. [5]. Теория нуклеации включает допущения для описания кластеров малого размера, например [6]. Более того, когда поверхностное натяжения и плотность кластера были учтены, и статистическая сумма возникающего кластера учитывала все степени свободы, согласие между теоретическими и экспериментальными данными становится еще хуже [7]. В общем случае, теория фазовых переходов не может предсказать условия фазовых переходов, такие как давление и температура.

Эмпирическое изучение нуклеации паров представляет значительный интерес, так как это важная фундаментальная проблема для кинетики зародышеобразования. Существующее оборудование для эмпирического изучения кинетики зародышеобразования уже достигло высокого качества. Сейчас уже можно обнаруживать влияние фазовых переходов на топологию поверхности скоростей нуклеации.

Рис. 2 схематично представляет химический потенциал для паровой и конденсированной фазы 1 и 2. Известно, что первая производная термодинамического потенциала имеет разрыв для фазового перехода первого рода и разрыв второй производной для фазового перехода второго рода. Линии os_1 и os_2 представляют метастабильные состояния 1 и 2 фазы.

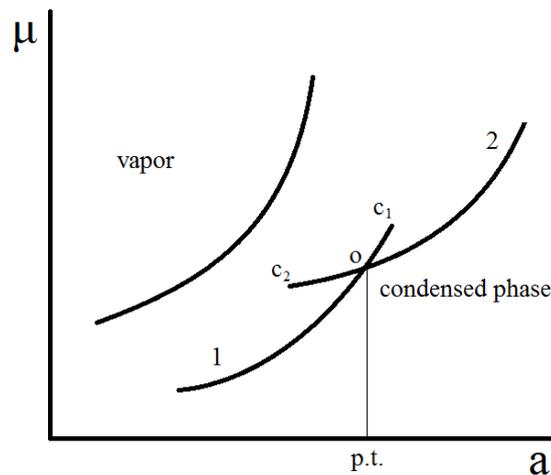


Рис. 2. Схематическое представление зависимости химического потенциала (μ) конденсированной фазы от активности паров (a). Точка c_1 и c_2 спинопальные условия для конденсированной фазы 1 и 2; фазовый переход первого рода (p.t.) на фазовой диаграмме показан точкой o

Рассмотрим случай фазовых переходов первого рода из пара к одной из двух сконденсированных фаз (жидкость или твердое). В этом случае, скорость нуклеации может быть выражена как:

$$J = V \exp(-\Delta G^* / kT) \quad (2)$$

где V – предэкспоненциальный множитель; $\Delta G^* = n^*(\mu_{\text{cond}} - \mu_{\text{vapor}}) + f$; n^* - число молекул (атомов) в критических зародышах; $\mu_{\text{cond}} - \mu_{\text{vapor}}$ разность химических потенциалов для макроскопических образцов конденсированной фазы и пара; f - избыточная энергия критического зародыша, содержащего n^* молекул в конденсированной фазе (по-видимому $\partial f / \partial T$, имеет особенность при фазовом переходе). На рис. 2 ясно видно, что при фазовом переходе возникает гистерезис (перегрев или переохлаждение) при переходе из одной фазы к другой. Разрыв первой производной химического потенциала порождает разрыв первой производной от поверхности скорости зародышеобразования.

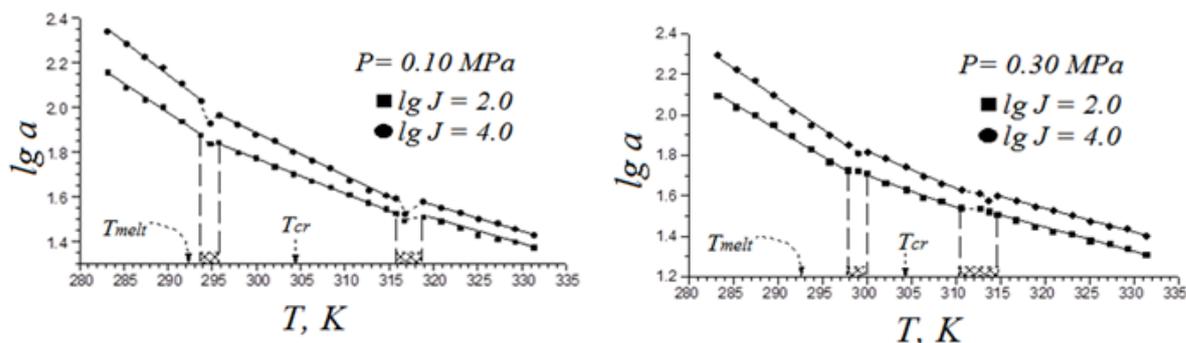


Рис. 3. Два фазовых перехода при температурах T_{melt} и T_{cr} на сечениях поверхности скорости нуклеации для системы глицерин-двуокись углерода от активности паров глицерина при общих давлениях 0,10 и 0,30 МПа

Экспериментальные зависимости активности паров глицерина от температуры нуклеации показаны на рисунке 3 [8]. По два сечения поверхностей скорости нуклеации приведены для двух давлений в системе. Два разрыва монотонности поверхностей скорости нуклеации для каждого значения давления ясно видны на рис. 3. Разрывы связаны с плавлением-затвердеванием критических зародышей и фазовыми переходами первого рода, возникающими в окрестности критических линий бинарных систем. Следует обратить внимание, что при обычно используемом шаге в температуре нуклеации 5 градусов и более, особенность на поверхности скоростей может быть потеряна или исключена вовсе из серии по причине “ошибочного” выпадения одной изотермы скорости из общего набора изотерм. Измерение меньше 5-6 точек на десятичный порядок в скорости нуклеации так же может привести к необоснованному желанию исключить 1-2 точки, “выпадающих по неизвестной причине”. Исключение таких “ошибочных точек” неизбежно приводит к потере данных о физиче-

ском эффекте и объективно снижает достоверность выводов экспериментальных исследований. В случае фазового перехода второго рода в конденсированной фазе мы получаем разрыв второй производной химического потенциала от температуры. Случаи фазовых переходов второго рода могут быть найдены для систем, которые обнаруживают сверхпроводимость, сверхтекучесть, имеют точку Кюри (для магнитных систем), точку Курнакова для сплавов, и т.д. Легко увидеть, что $\Delta G^* = n^*(\mu_{\text{cond}} - \mu_{\text{vaor}}) + f$ в этом случае имеет непрерывную первую производную по температуре и разрыв второй производной для случая фазового перехода второго рода при любом числе степеней свободы системы.

Поверхность скоростей нуклеации можно построить, например, над диаграммой равновесия с тройной точкой (рис.1). Линия *et* соответствует фазовым переходам первого рода, как следствие, на этой линии мы имеем разрыв первой производной на поверхности скоростей нуклеации. Для фазовых переходов второго рода поверхность будет монотонна и непрерывна, но теперь будут иметь разрыв вторые производные. Можно использовать условие непрерывности и монотонности [5], чтобы обнаружить воздействие фазового перехода на поверхность скоростей нуклеации. Мы хотели бы подчеркнуть, что полученные результаты следует рассматривать как доказанные утверждения, справедливые для всех случаев фазовых переходов в критических зародышах новой фазы и их влияния на монотонность и непрерывность поверхностей скорости зародышеобразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Anisimov M.P. Relationship of phase diagrams and surfaces of new phase nucleation rates / M.P. Anisimov, J.A. Hopke, D.H.Rasmussen, S.D. Shandakov, V.A. Pinaev // J. Chem. Phys. - 1998. - V.109. 4. - P. 1435-1444.
2. Anisimova L. Two channel vapor nucleation in the vicinity of the triple point / L. Anisimova, P.K. Hopke and J. Terry. // J. Chem. Phys. – 2001. - Vol. 114(22) - P. 9852-9855.
3. Anisimov M. P. Examples of a semiempirical design of nucleation rate surfaces for systems with monotropic polymorphous phase transitions / M.P. Anisimov, E.G. Fominykh, O.O. Petrova-Bogdanova // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2013. - Vol. 87. - № 2. - P. 252-256.
4. Anisimov M. P. Critical embryo phase transitions in the nucleated binary glycerin - carbon dioxide system/ M. P. Anisimov, J. A. Koropchak, A. G. Nasibulin, L. V. Timoshina // J. Chem. Phys. – 1998. - Vol. 109(22). – P.10004-10010.
5. Anisimov M. P. Experimental detection of nucleation rate surface singularity / M. P. Anisimov, A. G. Nasibulin, S. D. Shandakov // Journal of Chem. Phys. - 2000. - Vol. 112 (5). - P. 2348-2354.
6. Kalikmanov, V. I. (2013). Nucleation theory. Lecture Notes in Physics 860. Springer-Business, Berlin, 316 p.
7. Anisimov M. P. Nucleation: Theory and Experiment / M. P. Anisimov // Russian Chemical Reviews. -2003. –Vol.72(7).- P. 591-628.
8. Anisimov M. P. Critical embryo phase transitions in the nucleated binary glycerin - carbon dioxide system/ M. P. Anisimov, J. A. Koropchak, A. G. Nasibulin, L. V. Timoshina // J. Chem. Phys. – 1998. - Vol.109 (22). – P.10004-10010.

© М. П. Анисимов, В. Н. Пармон, О. О. Петрова-Богданова, 2016

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ЖИДКОСТИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

Константин Дмитриевич Смирнов

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент факультета естественных наук, тел. (383)333-22-96, e-mail: kostyanshepard@gmail.com

Валерий Владимирович Замашчиков

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-22-96, e-mail: albor@kinetics.nsc.ru

Евгений Анатольевич Чиннов

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)316-51-37, e-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование влияния преград разной формы на распространения пламени над поверхностью жидкости. Показано, что скорость распространения пламени существенно изменяется при прохождении преграды.

Ключевые слова: горение жидкости, распространение пламени, температура вспышки.

SOME FEATURES OF THE LIQUID BURNING IN A NARROW CHANNEL

Konstantin D. Smirnov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova Str., student of the Faculty of Natural Sciences, tel.(383)333-22-96, e-mail: kostyanshepard@gmail.com

Valery V. Zamashchikov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova Str.; Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya Str., D. Sc., Leading Researcher, tel. (383)333-22-96, e-mail: albor@kinetics.nsc.ru

Evgeniy A. Chinnov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova Str.; Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Chief Researcher, tel. (383)316-51-37, e-mail:chinнов@itp.nsc.ru

Experimental study of the effect of different forms of obstacles to the spread of flame over the surface of liquid have been conducted. The study made it apparent that the flame velocity substantially changes during the passage of obstacle.

Key words: combustion of liquid, flame propagation, flash temperature.

С точки зрения практического применения привлекательной является идея создания миниатюрных источников питания, использующих энергию, выделяющуюся при горении углеводородов. Однако горение не всегда возможно. Даже, если смешать топливо и окислитель в стехиометрическом соотношении, в условиях узкого канала пламя гаснет, то имеется ограничение по размеру установки. Настоящая работа посвящена изучению горению жидкого топлива в узком канале. В работах [1, 2, 3] показано, что в миниканалах при встречном потоке окислителя способно распространяться пламя над поверхностью горючей жидкости, температура которой ниже температуры вспышки, то есть жидкости, пары которой перемешиваясь с воздухом при нормальных условиях не горят. Это связано с тем, что при перемешивании с воздухом или кислородом образуется смесь, доля топлива в которой меньше, чем на нижнем концентрационном пределе. В связи с этим при распространении пламени над поверхностью такой жидкости определяющим является тепловая связь между волной горения и порождаемой ей тепловой волной в жидкости. В упомянутой выше работе [3] получены скорости распространения пламени, сравнимые, и даже больше скорости распространения пламени по стехиометрической предварительно перемешанной смеси паров жидкости с кислородом. Этот результат представляет научный интерес в связи с тем, что для распространения пламени над поверхностью жидкости, в отличие от предварительно перемешанной горючей смеси, необходимо ее нагреть в предпламенной области и, кроме того, необходимо, чтобы пары успели перемешаться с окислителем [3]. В связи с этим возникает вопрос о механизме распространения пламени. Согласно [4-6] ключевым моментом механизма распространения пламени является движение нагретой жидкости в предпламенную область за счет капиллярных сил, возникших из-за градиента температуры на поверхности жидкости. В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования с целью прояснения механизма распространения пламени над поверхностью жидкости.

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Эксперименты проводились в канале (1) шириной 4 мм и высотой 42 мм. На дно канала (2) наливался н-бутанол. С одного конца подавался воздух, обогащенный кислородом, с другого конца осуществлялся поджиг. Перед заливкой жидкости на дно помещался цилиндр диаметром 1 мм, либо параллелепипед квадратного сечения 1x1 мм (3). Для регистрации пламени была собрана оптическая схема, состоящая из линз (4), нити (10) и скоростной видеокамеры (5). Параллельный лазерный свет (9) проходил через исследуемую область (3) и собирался линзой на нити, за которой была установлена видеокамера. При прохождении пламенем исследуемой области часть света отклонялась из-за градиента показателя преломления и попадала в объектив видеокамеры. Смесь готовилась в специальном смесителе (7) по парциальным давлениям, перед подачей в канал она перемешивалась с помощью термостата (6). Расход смеси устанавливался и поддерживался постоянным с помощью Bronk Horst El-flow (8).

В работах [3, 4] при распространении пламени над поверхностью жидкости перед фронтом горения на поверхности наблюдалась волна. Измерения показали [4, 5], что волна имеет сложную структуру: в жидкости образуется тепловой вихрь, который эволюционирует со временем.

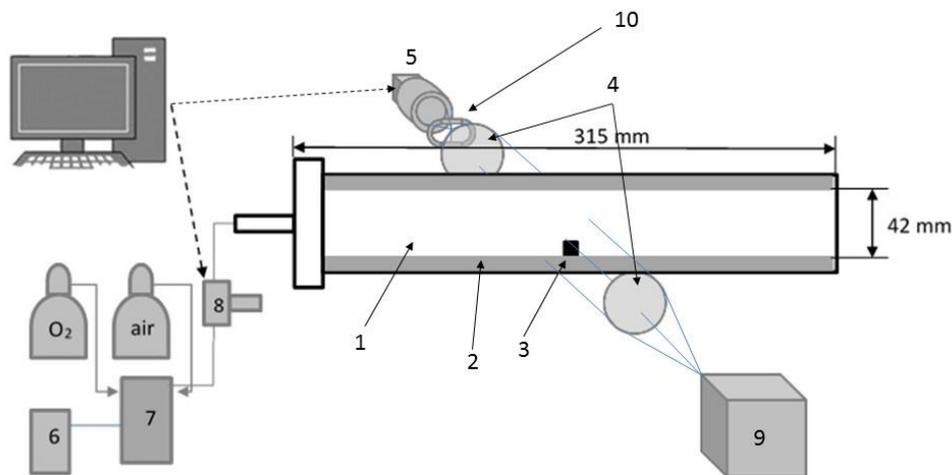


Рис. 1. Схема установки

На основании этих экспериментов был обоснован механизм распространения пламени, суть которого заключается в следующем [4-6]. Горячие продукты горения прогревают жидкость за фронтом горения. Перед фронтом температура свежей смеси существенно меньше температуры продуктов, поэтому в жидкости возникает градиент температуры, направленный в сторону продуктов горения. Так как коэффициент поверхностного натяжения зависит от температуры, а именно, для исследуемых жидкостей он уменьшается с ростом температуры, то возникает сила, направленная против градиента температуры. Благодаря этому происходит перенос нагретой жидкости в предпламенную область. Вследствие этого, возрастает поток паров жидкости в газовую фазу и становится возможным образование горючей смеси перед зоной химических превращений. Если сравнивать этот механизм с механизмом распространения пламени в предварительно перемешанной смеси, то необходимо отметить, что для реализации этого механизма распространения пламени над поверхностью жидкости требуется больше времени. В работе [3] сделаны оценки возможности распространения капиллярно-тепловой волны в жидкости при стационарном распространении пламени. Показано, что при скоростях пламени порядка 2 м/с процессы в жидкости могут не обеспечить такие скорости. В связи с этим возникает вопрос о механизме распространения пламени над поверхностью жидкости. Один из способов управлять процессами распространения волны в жидкой фазе - создать преграду для ее движения. Для этого в настоящей работе на дно канала устанавливались цилиндр или параллелепипед квадратного сечения. Уровень

жидкости вследствие этого изменялся вдоль ее поверхности. Распространение тепла в жидкой фазе различается при подходе к преграде и ее преодолении. Отметим, что поверхность жидкости не плоская не только из-за наличия преграды, но и из-за того, что вследствие соприкосновения со стенками канала она также искривляется. Так как канал достаточно узкий, то влияние этого возмущения может быть значительным.

Эксперименты показали, что влияние преграды на скорость распространения пламени зависело от уровня жидкости и содержания кислорода в окислительной смеси. Скорость изменяется заметно, когда уровень жидкости сравним с высотой преграды, и содержание кислорода в смеси уменьшается. Типичное изображение пламени, находящегося над круглой преградой, показано на рис. 2. Окислительная смесь, содержащая 60.5% O_2 и 39.5% N_2 (50% O_2 +air), подается с расходом 3 л/мин. Пламя, поднимаясь при подходе к препятствию, замедляется и ускоряется при его преодолении. На рис.3 приведена зависимость скорости пламени от координаты, и для наглядности показано месторасположение цилиндра. Иногда оно останавливается и после некоторой паузы снова начинает двигаться или гаснет. Цилиндр пламя преодолевал “легче”, скорее всего это связано с тем, что у параллелепипеда острые края. Из-за наличия преграды уровень жидкости изменяется, поэтому угол между вектором скорости пламени и поверхностью “невозмущенной” жидкости сначала возрастает, а затем падает. При этом направление потока паров жидкости и окислителя к скорости пламени также изменяется. Это может оказывать влияние, как на перемешивание газов, так и на нагрев жидкости и газа. Причем это влияние разное при подходе к преграде и выходе пламени на невозмущенную поверхность. Действительно, опыты показали, что поведение пламени различается при входе на возмущенный участок и выходе из него. Однако есть еще один фактор, который оказывает влияние на пламя – это толщина жидкого слоя. Чувствительность скорости распространения пламени к толщине возрастает при уменьшении последней. Это связано с тем, что кроме теплового потока в боковые стенки канала, который слабо зависит от толщины пленки, существенную роль начинает играть тепловой поток в дно канала. В результате понижается температура жидкости, что приводит, с одной стороны, к увеличению теплопотерь из фронта горения, с другой стороны, что, по-видимому, более важно, к уменьшению потока паров жидкости. В конечном итоге наблюдается уменьшение скорости пламени, а замедление пламени приводит к еще большему возрастанию теплопотерь из фронта пламени. Таким образом эффект от уменьшения толщины пленки становится довольно сильным. В связи с этим, естественно связать замедление скорости с уменьшением толщины пленки. Остановка пламени именно над параллелепипедом, скорее всего, обусловлено наличием острого края. Благодаря этому в передпламенной области, вероятно, жидкой пленки нет. Для осуществления горения необходимо, чтобы перед зоной химических реакций была горючая смесь, так как пары топлива находятся за фронтом горения, то они должны каким-то образом транспортироваться в передпламенную область. При стабилизации продукты постепенно нагревают преграду и жидкость

в более отдаленной области за преградой. В конце концов это приводит к тому, что пламя начинает перемещаться вперед.

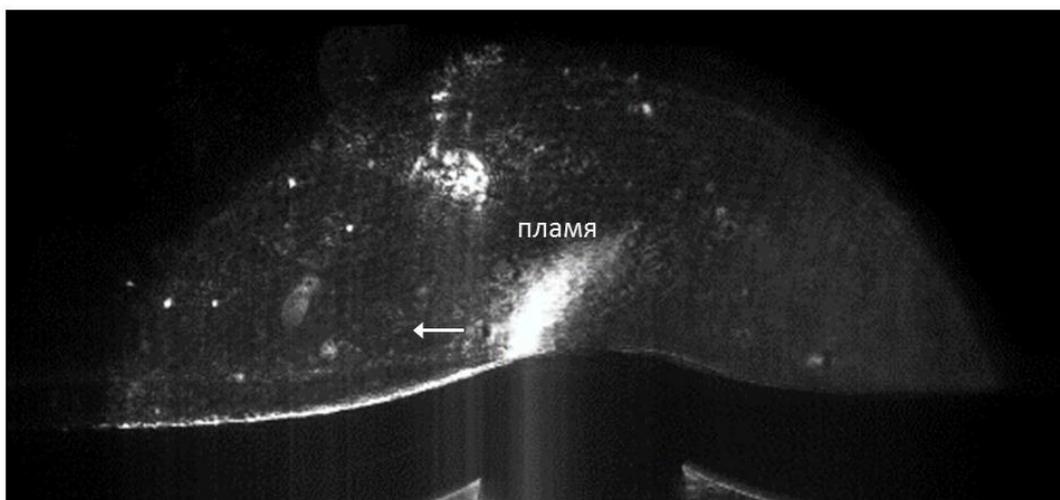


Рис. 2. Изображение пламени

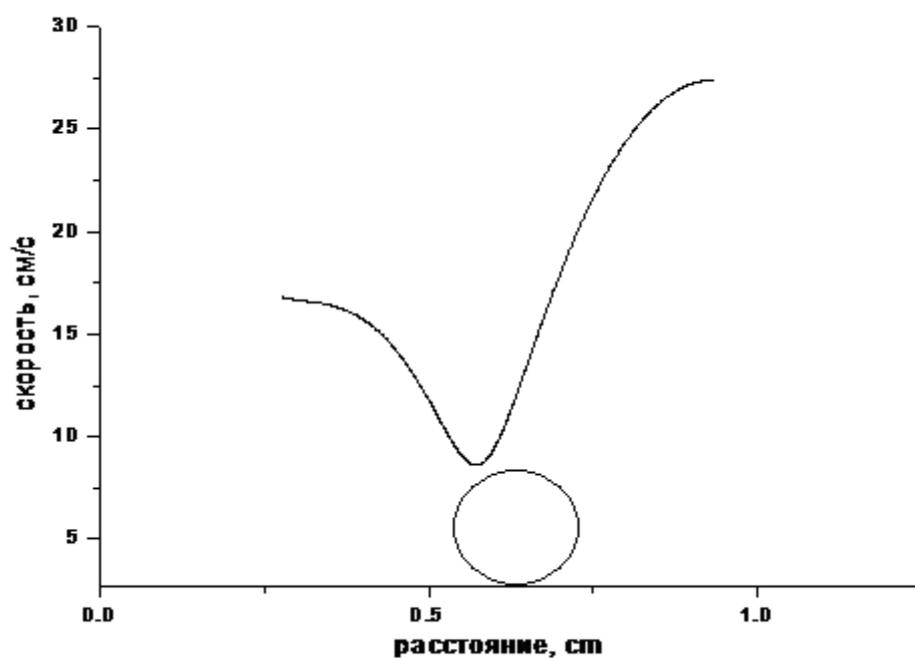


Рис. 3. Зависимость скорости пламени от координаты

В настоящей работе показано, что возмущения поверхности горючей жидкости оказывает сильное влияние на распространение пламени. Скорость пламени уменьшается, достигает минимума, а затем снова возрастает. Уменьшение скорости, вероятно, связано с уменьшением толщины жидкой пленки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 15-19-30038).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.В. Замашиков, А.А. Коржавин, Е.А. Чиннов. Горение н-бутанола в плоском мини-канале//Теплофизика и аэромеханика. 2014, том 21, № 3. С.415- 418.
2. Замашиков, А.А. Коржавин, Е.А. Чиннов. Исследование горения жидкого топлива в прямоугольном канале/Физика горения и взрыва. 2014. – Т. 50, №4. С. 15-21.
3. V.V. Zamashchikov, A.A. Korzhavin, and E.A. Chinnov. Combustion of liquid fuel in the flat minichannels *направлена в печать*.
4. Ross, H. D., and Miller, F. J. Detailed experiments of flame spread across deep butanol pools. Proc. Combust. Inst., 26 (1996) P. 1327–1334.
5. Ross, H. D., and Miller, F. J. Flame spread across liquid pools with very low-speed opposed or concurrent airflow. Proc. Combust. Inst., 27 (1998) P. 2723–2729.
6. Sirignano, W. A., and Glassman, I. Spreading above liquid fuels: surface-tension-driven flows. Combust. Sci. Technol., 1 (1970) P. 307-312.

© К. Д. Смирнов, В. В. Замашиков, Е. А. Чиннов, 2016

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ КИПЕНИИ И ИСПАРЕНИИ ТОНКОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Владимир Иванович Жуков

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химической технологии, тел. (383)346-08-01, e-mail: vzh@inbox.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)330-87-00, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

Сообщаются результаты визуальных наблюдений различных структур, образующихся при кипении и испарении тонких горизонтальных слоев жидкости. В слоях ниже капиллярной постоянной при низком давлении образовывались сухие пятна, при повышении давления возникало пузырьковое кипение жидкости. 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. Приводится пример построения карты областей существования структур в слое жидкости в зависимости от режимных параметров процесса.

Ключевые слова: тонкий слой жидкости, реактивная сила фазового перехода, критический тепловой поток, сухие пятна.

THE STUDY OF STRUCTURES INDUCED BY BOILING AND EVAPORATING OF HORIZONTAL THIN LIQUID FILMS

Vladimir I. Zhukov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, K. Marx Ave., Ph. D., Associate Professor Department of Chemical Engineering, tel. (383)346-08-01, e-mail: vzh@inbox.ru

Aleksandr N. Pavlenko

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Corresponding Member of Russian Acad. Sci., Head of Low-Temperature Thermophysics Laboratory, tel. (383)330-87-00, e-mail: pavl@itp.nsc.ru

The study presents the visual observation outcomes of different structures behavior, which have formed as a result of boiling and horizontal thin liquid films evaporation. Dry spots are found to appear at low pressure in the layers below the capillary constant, however, the increase in pressure causes bubble boiling of the liquid. 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. The authors present the example of the mapping technique for structure areas location in the layer of liquid when taking into account the dependence on operating parameters.

Key words: thin layer of liquid, vapor recoil force, critical heat flux, dry spots.

Тонкие пленки жидкости используются в промышленности для охлаждения поверхностей. Возникновение разрывов, сухих пятен уменьшает область их применения. В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал относительно влияния тех или иных параметров на критические тепловые потоки, при которых происходят разрывы пленок и осушение поверхности. В [1-3] получено, что в движущихся тонких пленках критический тепловой поток уменьшается при уменьшении толщины пленки. В [4] показано, что в тонких горизонтальных неподвижных слоях жидкости критический тепловой поток увеличивается с увеличением высоты слоя при кипении и испарении слоя в условиях пониженных давлений. В толстых слоях величина теплового потока становилась постоянной, происходил переход к режиму теплообмена в большом объеме. При этом величина критического теплового потока была значительно больше, чем это следует из известной расчетной зависимости [5] и была близка к расчетам по формулам [6, 7]. В классическом кинематографическом исследовании пузырькового кипения на горизонтальной поверхности нагрева [8] были идентифицированы режимы кипения с различными паровыми структурами. На теплоотдачу в тонких горизонтальных слоях жидкости влияет большее количество факторов, в частности, влияет высота слоя жидкости. В настоящее время существует необходимость идентификации режимов кипения и испарения тонких горизонтальных слоев жидкости со структурами, которые в них образуются. В данной работе представлены результаты исследования теплообмена и визуальных наблюдений структур, образующихся при кипении и испарении горизонтальных слоев n -додекана различной высоты.

Исследование проводилось на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в [4]. Рабочая камера, где проводились эксперименты, конструктивно выполнена в виде термосифона. Она представляет собой цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 120 мм, высотой 300 мм и толщиной стенок 1 мм из стали 12X18H10T. На наружной поверхности верхней части расположен змеевик охлаждения. Для визуальных наблюдений сверху и сбоку на рабочей камере имелись смотровые окна. В ходе экспериментов реализовывался ряд стационарных режимов теплообмена, при которых регистрировались температуры по толщине поверхности нагрева, давление над слоем жидкости в объеме, и одновременно проводилась видеосъемка процесса видеокамерой с частотой кадров 240 кадр/с. Давление в рабочей камере измерялось деформационно–ионизационным датчиком вакуума и поддерживалось постоянным регулировкой с помощью натекателя и вентиля. Критический тепловой поток фиксировался по моменту резкого роста температуры поверхности нагрева при постоянном тепловом потоке. В экспериментах получали кривые кипения при постоянном значении давления над слоем.

По результатам визуальных наблюдений получено, что в тонких слоях жидкости образуются структуры четырех основных типов: сухие пятна (рис. 1), "воронки" (рис. 2), "кратеры" (рис. 3) и полусферические пузыри (рис. 4). Сухие пятна представляют собой области в слое не смоченные жидкостью. "Воронки" представляют собой углубления с полусферическим дном в тонком слое жидкости. "Кратеры", в отличие от "воронок", имеют в центре углубления протяженный плоский остаточный слой жидкости конечных размеров. "Воронки" и "кратеры" образуются в слое под действием реактивной силы фазового перехода. "Кратеры" обычно образуются на месте массива "воронок".



Рис. 1. Сухое пятно в слое н-додекана:
 высота $h = 0.8$ мм ($h/l_\sigma = 0.45$);
 давление в объеме $P_s = 17400$ Па,
 $q = 8240$ Вт/м², $(T_w - T_s) = 20$ К

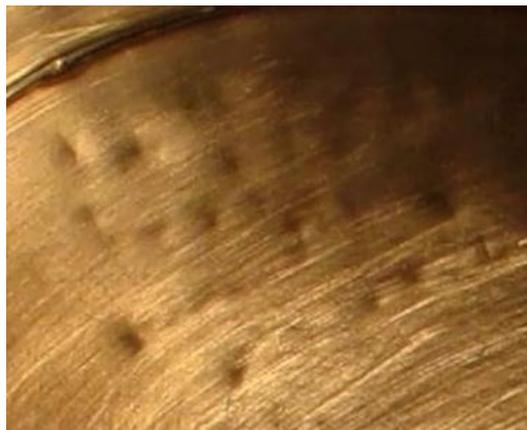


Рис. 2. «Воронки» в слое н-додекана:
 высота $h = 2.5$ мм ($h/l_\sigma = 1.4$);
 давление в объеме $P_s = 133$ Па,
 $q = 4380$ Вт/м², $(T_w - T_s) = 20.6$ К



Рис. 3. «Кратер» в слое н-додекана:
 высота $h = 2.5$ мм ($h/l_\sigma = 1.4$);
 давление в объеме $P_s = 133$ Па,
 $q = 12780$ Вт/м², $(T_w - T_s) = 20.2$ К



Рис. 4. Полусферические пузыри в слое н-додекана:
 высота $h = 1.7$ мм, ($h/l_\sigma = 0.95$);
 давление в объеме $P_s = 17400$ Па,
 $q = 27700$ Вт/м², $(T_w - T_s) = 20$ К

На рис. 5 показаны области существования сухих пятен и пузырькового кипения в слое с высотой меньше капиллярной постоянной. Из рисунка видно, что сухие пятна наблюдались в слое при приведенных давлениях $P/P_{cr} < 2 \cdot 10^{-2}$ и тепловых потоках $q < 4000 \text{ Вт/м}^2$. В диапазоне приведенных давлений $4 \cdot 10^{-3} < P/P_{cr} < 2 \cdot 10^{-2}$ при тепловых потоках $q > 4000 \text{ Вт/м}^2$ в слое наблюдались сухие пятна, а на смоченных участках поверхности наблюдалось пузырьковое кипение. При приведенных давлениях $P/P_{cr} > 2 \cdot 10^{-2}$ в слое в процессе его нагрева при более низких тепловых потоках сначала возникало пузырьковое кипение, а затем появлялись сухие пятна обычно в местах разрушения полусферических пузырей. Для объяснения связи между режимными параметрами и наличием различных структур в слое жидкости были выполнены оценки отрывного диаметра пузырьков для процесса кипения жидкости. Получено, что при приведенных давлениях $P/P_{cr} < 2 \cdot 10^{-3}$ отрывной диаметр пузырей сравним или даже больше диаметра рабочей камеры. При приведенных давлениях $P/P_{cr} \approx 2.8 \cdot 10^{-2}$ отрывной диаметр пузырей всего в 2–3 раза больше высоты слоя. Максимальные значения тепловых потоков на рис. 5 соответствуют критическим тепловым потокам. При низких приведенных давлениях критические тепловые потоки слабо зависят от давления. Величина критических тепловых потоков для тонкого горизонтального слоя жидкости существенно меньше, чем их расчетные значения по зависимостям [5–7] для кипения жидкости в большом объеме.

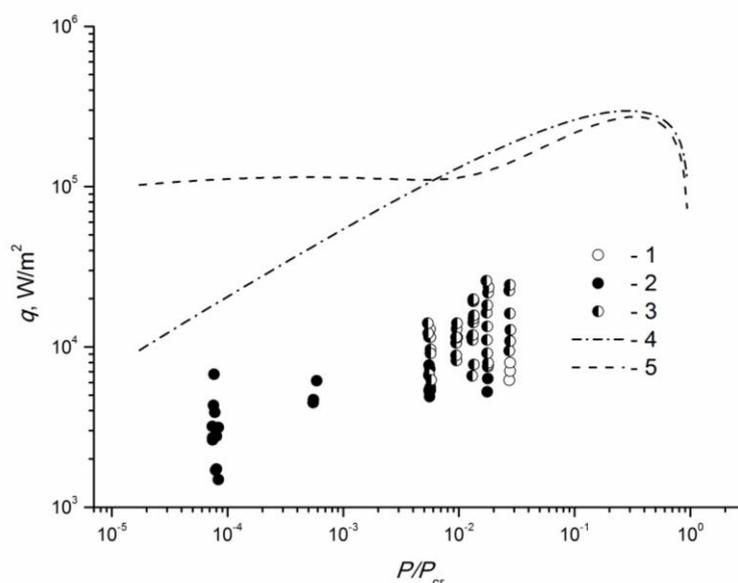


Рис. 5. Карта гидродинамических режимов кипения и испарения слоя *n*-додекана:

высота $h = 0.8 \text{ мм}$ ($h/l_\sigma = 0.45$); 1 – пузырьковое кипение, 2 – сухие пятна в слое, 3 – совместно наблюдаются в слое сухие пятна и пузырьковое кипение.

Расчетные зависимости: 4 – [5], 5 – [6, 7].

Построен пример карты областей существования в слое определенной высоты различных структур и переходные области, где наблюдались одновременно структуры нескольких типов, в зависимости от приведенного давления и теплового потока. Критические тепловые потоки в горизонтальном слое с высотой менее капиллярной постоянной меньше, чем критические тепловые потоки при кипении жидкости в большом объеме.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-49-00010).

Обозначения:

h – высота слоя жидкости, м; l_σ – капиллярная постоянная, м; P – давление, Па; P_{cr} – критическое давление для жидкости, Па; q – плотность теплового потока, Вт/м²; T_w , T_s – температура поверхности нагрева и температура насыщения, соответственно, К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pavlenko A.N., Lel V.V. Heat Transfer and Crisis Phenomena in Falling Films of Cryogenic Liquid // Russ. J. Eng. Therm. – 1997. – Vol. 7. no's 3–4. – P. 177–210.
2. Pavlenko A.N., Lel V.V., Serov A.F., Nazarov A.D. and Matsekh A.D. The Growth of Wave Amplitude and Heat Transfer in Falling Intensively Evaporating Liquid Films // J. Eng. Therm. – 2002. – Vol. 11, № 1. – P. 7–43.
3. Mahmoudi S.R., Adamaik K., Castle G.S.P. Two-Phase Cooling Characteristics of a Saturated Free Falling Circular Jet of HFE7100 on Heated Disk: Effect of Jet Length // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2012. – vol. 55. – P. 6181–6190.
4. Жуков В.И., Павленко А.Н., Нагайцева Ю.В., Вайсс Д. Влияние высоты слоя на теплообмен и критический тепловой поток при испарении жидкости в условиях низких давлений // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 5. – С. 727–734.
5. Кутателадзе С.С. Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // ЖТФ. – 1950. – Т. 20. № 11. – С. 1389–1392.
6. Ягов В.В. Физическая модель и расчетное соотношение для критических тепловых нагрузок при пузырьковом кипении жидкостей в большом объеме // Теплоэнергетика. – 1988. – № 6. – С. 53–59.
7. 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.
8. Gaertner R.F. Photographic Study of Nucleate Pool Boiling on a Horizontal Surface // Trans. ASME. J. Heat Transfer – 1965 – Vol. 87, № 17. – P.18–29.

© В. И. Жуков, А. Н. Павленко, 2016

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ
ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА ОТКРЫТЫМ ПЛАМЕНЕМ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА**

Евгений Витальевич Манжос

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, ведущий инженер, тел. (383)333-22-96, e-mail: eugen.manzhos@kinetics.nsc.ru

Наталья Александровна Какуткина

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь, тел. (383)333-22-96, e-mail: kktk@kinetics.nsc.ru

Алексей Анатольевич Коржавин

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией физики и химии горения газов, тел. (383)333-22-96, e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

Александр Васильевич Вьюн

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики

Проведено экспериментальное исследование зажигания волны фильтрационного горения газа в пористой среде пламенем, стабилизированным на ее поверхности, при различных условиях внешнего теплообмена. Показано наличие верхнего и нижнего пределов зажигания по скорости газа для конкретной газовой смеси и пористой среды. Подтверждено соответствие теоретической модели процессу зажигания и горения газа в пористой среде.

Ключевые слова: фильтрационное горение, горение газа, зажигание.

**EXPERIMENTAL STUDY OF IGNITION OF FILTRATION COMBUSTION WAVE WITH
OPEN FLAME AT DIFFERENT CONDITIONS OF EXTERNAL HEAT EXCHANGE**

Evgeny V. Manzhos

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya, principal engineer, tel. (383)333-22-96, e-mail: eugen.manzhos @kinetics.nsc.ru

Nataliya A. Kakutkina

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya, D. Sc., academic secretary, tel. (383)333-22-96, e-mail: kktk@kinetics.nsc.ru

Alexei A. Korzhavin

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya, D. Sc., head of laboratory of gas combustion chemistry and physics, tel. (383)333-22-96, e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

Alexandr V. V'yun

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D.

An experimental investigation was carried out for ignition of filtration combustion wave in a porous medium by gas flame stabilized on the surface of the porous medium at different conditions of external heat exchange. It is shown that there are upper and lower limits of ignition on gas velocity for a specific gas mixture and porous medium. An accordance of the theoretical models to the processes of ignition and combustion of gas in a porous medium is established.

Key words: filtration combustion, gas combustion, ignition.

Зажигание, т.е. возникновение волны стационарно движущегося фильтрационного горения (ФГ) горючего газа в инертной пористой среде является одной из ключевых проблем понимания процесса ФГ в пористых средах. Изучение данного явления вызвано необходимостью исследования самого процесса фильтрационного горения газов (ФГГ) - горения газа, движущегося в химически инертной пористой среде, обладающего целым рядом полезных с точки зрения практики свойств [1].

Тепловая инерционность пористой среды обуславливает устойчивость горения, а зависимость характеристик горения от параметров пористой среды и скорости течения газа предоставляет широкие возможности для управления процессом.

В силу наличия многих параметров, оказывающих влияние на ФГГ, интересным становится численное моделирование процессов горения [2], поскольку оно позволяет оперативно отслеживать изменение характеристик и структуры волн ФГ.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование зажигания волн ФГ и сопоставление данных эксперимента с теоретическими зависимостями, полученных численным моделированием в работах [3, 4]. В работе [5] было проведено математическое моделирование зажигания волн ФГГ в пористой среде открытым пламенем. Там же установлено наличие нижнего и верхнего пределов зажигания в зависимости от скорости фильтрации газа.

Эксперимент

Опыты проводились на установке, аналогичной описанной в работе [5]. Установка заполнялась пористой средой – зернистым электрокорундом. Использовалась засыпка со средним размером диаметра зерен 5,11 и 4,08 мм, теплофизические характеристики которых приведены в таблице.

Таблица

Теплофизические свойства пористой среды

Свойства	Пористая среда (электрокорунд)
Плотность гранул, кг/м ³	3900
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	1000 [6]
Теплопроводность, Вт/(м·К)	3,02 [6]
Средний размер зерна, мм	4,08; 5,01
Пористость	0,56; 0,54

Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха. Расходы измерялись образцовыми ротаметрами. Газ с воздухом смешивался до входа в горелку в месте соединения подводов газа и воздуха и подавался в трубу снизу. Горючая смесь зажигалась в верхней части трубы открытым пламенем. Пламя прогревало верхний слой пористой среды, формируя волну горения. Визуально волна горения наблюдалась как плоская, ярко светящаяся зона, перемещающаяся по пористой среде, что показано на рис. 1.

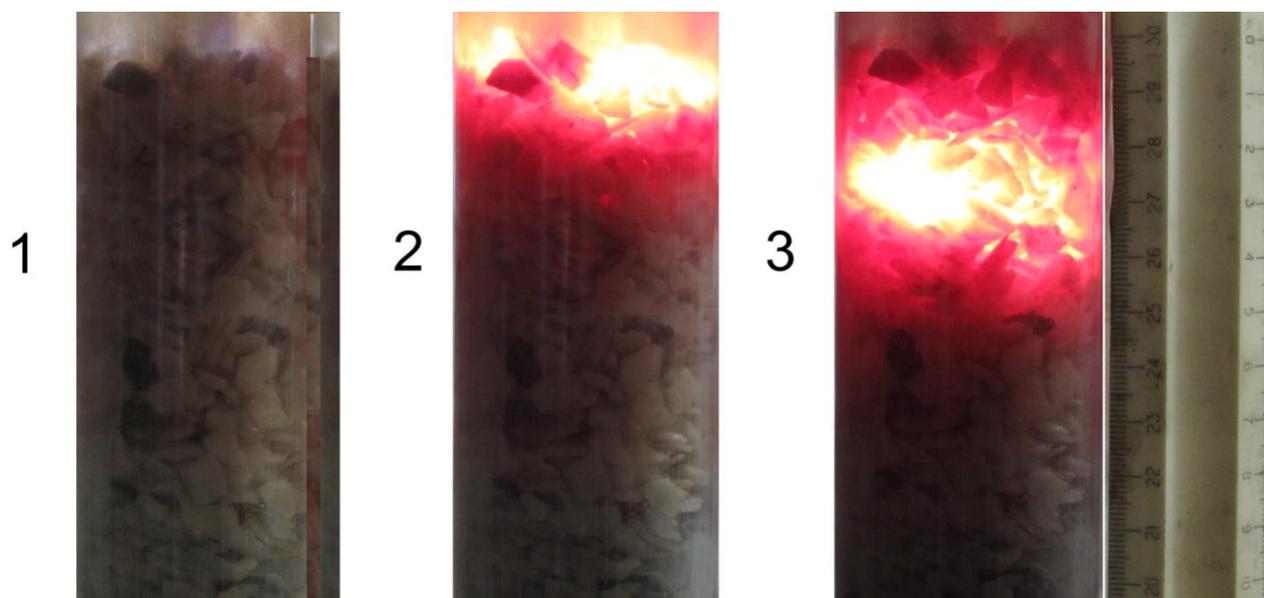


Рис. 1. Движение волны ФГ. Стадии процесса движения волны ФГ:

- 1 – зажигание волны ФГ; 2 – начало стационарного движения волны ФГ;
3 – стационарное движение волны ФГ

Распространение волны горения регистрировали с помощью цифровой фотокамеры. Горелка с распространяющейся в ней волной горения автоматически фотографировалась через равные промежутки времени (10 с) с сохранением изображений в памяти компьютера. Полученные снимки обрабатывались в прикладной программе, позволяющей определять координаты объектов на изображениях. Для определения координат волны горения рядом с горелкой устанавливалась масштабная линейка. В результате обработки получались зависимости координаты фронта волны горения от времени.

В качестве горючего газа использовался природный газ, содержащий 96% метана, 1,5% этана, 0,7% пропана, 0,3% бутана, 0,04% углекислого газа и 1,0% азота. Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха. Выдерживались стехиометрические смеси горючего газа и воздуха, наиболее близкие к данным расчетов [4].

Различные значения коэффициентов внешней теплоотдачи достигались использованием тепловой изоляции (каолиновой ваты) вокруг трубы установки.

Результаты экспериментов

График зависимости времени зажигания волны ФГ от скорости подачи исходной газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 4,08 мм показан на рис. 2.

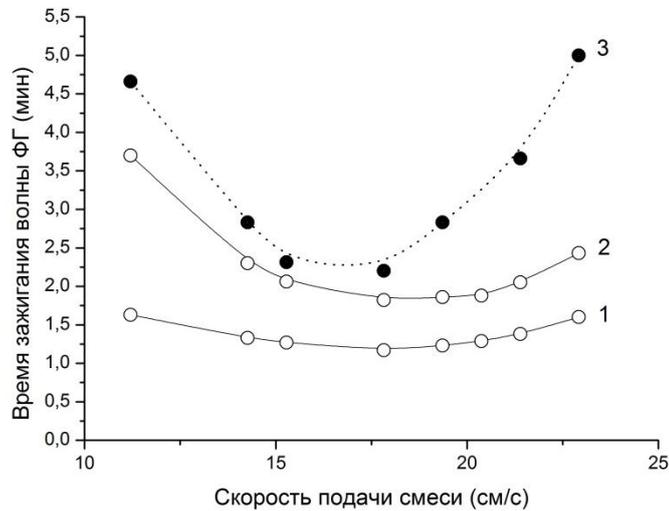


Рис. 2. Зависимость времени зажигания волны ФГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 4,08 мм

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha = 0 \frac{Вт}{м^2 К}$;

2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha = 250 \frac{Вт}{м^2 К}$;

3 – экспериментальные данные.

На рис. 3 показан аналогичный график зависимости времени зажигания волны ФГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 5,11 мм.

Полученные зависимости показывают влияние коэффициента внешней теплоотдачи на время зажигания волны ФГ, а также соответствие теоретической модели процесса зажигания волны ФГ экспериментально наблюдаемому процессу ФГ.

Выводы

1. Проведено экспериментальное исследование зажигания волн ФГ при различных значениях коэффициента внешней теплоотдачи.

2. Экспериментально показано наличие верхнего и нижнего пределов зажигания по скорости газа для конкретной газовой смеси и пористой среды.

3. Установлено соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГ.

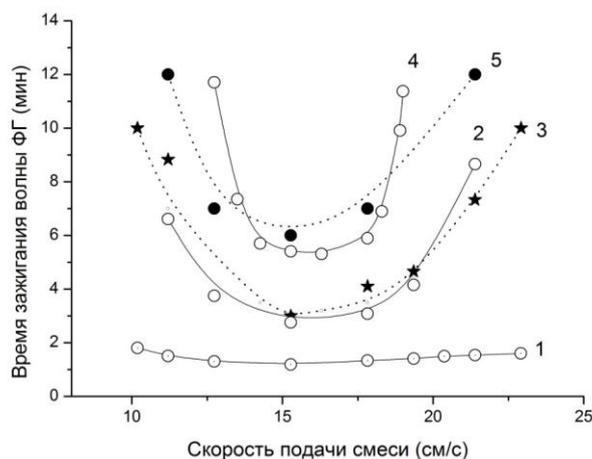


Рис. 3. Зависимость времени зажигания волны ФГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 5,11 мм

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha = 0 \frac{Вт}{м^2 К}$;

2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha = 380 \frac{Вт}{м^2 К}$;

3 – экспериментальные данные при использовании тепловой изоляции;

4 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha = 480 \frac{Вт}{м^2 К}$;

5 – экспериментальные данные без использования тепловой изоляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Футько С.И. Химия фильтрационного горения газов / С.И. Футько, С.А. Жданок. - Мн.: Бел. Наука, 2004. - 319 с.
2. Trends in modeling of porous media combustion / М. Abdul Mujeebu, М. Zulkifly Abdullah, А.А. Mohamad, М.З. Abu Bakar // Progress in Energy and Combustion Science. - 2010. - Vol. 36.
3. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Фильтрационное горение газа Распространение тепловых волн в гетерогенных средах // под ред. Ю.Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, 1988
4. Инициирование горения газа в пористой среде внешним источником / Н.А. Какуткина, А.А. Коржавин, Е.В. Манжос, Д.А. Рычков, А.В. Вьюн // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "СибОптика-2013". - Новосибирск. СГГА, 2013, Т. 2. - С. 189-196.
5. Экспериментальное исследование зажигания волн фильтрационного горения газа открытым пламенем / Е.В. Манжос, Н.А. Какуткина, А.А. Коржавин, А.В. Вьюн // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "СибОптика-2014". - Новосибирск. СГГА, 2014, Т. 5, ч. 2. - С. 145-151.
6. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ., 1959. - 356 с.

© Е. В. Манжос, Н. А. Какуткина, А. А. Коржавин, А. В. Вьюн, 2016

ДВУХФАЗНЫЕ МИКРОЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ КОНЦЕПЦИИ

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

Рассмотрены теплофизические основы разработки двухфазных и высокотемпературных микрожидкостных систем и их применение в различных областях микротехники. С использованием оптических методов выявлены закономерности гидродинамических, тепловых и волновых процессов в микроканалах и микрокамерах, рассмотрено их использование для повышения эффективности двухфазных микрожидкостных систем, микроохладителей теплонапряженного оборудования, MEMS на основе управляемого распада жидкости, микрореакторов водородной энергетики. Обсуждены новые методы расчета гидродинамики и процессов переноса при фазовых превращениях и химических реакциях, взрывном кипении микрообъемов жидкости в микрожидкостных системах.

Ключевые слова: двухфазные микрожидкостные системы, микротехника, теплофизические основы, оптические методы, процессы переносы, МЭМС.

TWO-PHASE MICROFLUIDICS: THERMOPHYSICAL FUNDAMENTALS AND ENGINEERING CONCEPTS

Vladimir V. Kuznetsov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 17 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Head of Department, tel. (383)330-71-21, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Thermophysical fundamentals need for the development of two-phase and high-temperature microfluidic systems and their application in various fields of microtechnology are considered. Using optical methods the regularities of fluid dynamics, thermal and wave processes in microchannels and microchambers are identified, their applications to improve the efficiency of two-phase microfluidics, micro-coolers for heat-stressed equipment, MEMS-based on liquid decay and microreactors for hydrogen power engineering are considered. New methods for prediction of the fluid dynamics and transport processes during phase change and chemical reactions, explosive boiling of liquid micro volumes in microfluidic systems are discussed.

Key words: two-phase microfluidics, microtechnology, thermophysical fundamentals, optical methods, transfer processes, MEMS.

1. Введение

В течение последних двадцати лет произошло революционное развитие микро и нанотехнологий, что сформировало технологические процессы, дающие возможность изготавливать устройства микросистемной техники, предназначенные для проведения различных химических и физических процессов с малыми объемами жидкостей и газов [1]. В настоящее время производится широкий спектр микрожидкостных систем с размерами элементов от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, рынок таких устройств составляет

по разным оценкам от 3 до 12 млрд. долл. в год. Это определяется значительными преимуществами микрожидкостных систем перед их традиционными аналогами, в том числе малым временем отклика, крайне низкими значениями мертвых объемов, высокими значениями отношения площади поверхности к объему устройства, блочным построением устройств, что позволяет переходить к масштабированию простым увеличением числа блоков, ранее не достижимыми интенсивностями тепло и массопереноса. На основе микрожидкостных систем создаются перспективные технологии, которые позволяют отводить экстремально большие потоки тепла в ограниченном объеме, что используется в микроканальных системах охлаждения лазерных систем и компьютерных процессоров, парогенераторах/конденсаторах энергетических и криогенных устройств, МЭМС на основе управляемого распада метастабильной жидкости, микрокаталитических реакторах водородной энергетики.

Сложности, возникающие при разработке микрожидкостных систем, обусловлены тем, что уменьшение размеров каналов приводит к качественным изменениям закономерностей гидродинамических, тепловых и диффузионных процессов, что в особенности проявляется при наличии фазовых превращений и химических реакций. Поэтому при уменьшении масштаба течения возникает широкий спектр явлений, которые не типичны на большом масштабе и слабо изучены. Степень их появления зависит не только от масштаба течения, но и от формы каналов, величины капиллярных сил, скоростей течения, тепловых потоков, давления, межатомного и межмолекулярного взаимодействия, что необходимо учитывать при разработке и применении микрожидкостных систем. В данной работе рассмотрены теплофизические основы трех типов двухфазных микрожидкостных устройств: микроканальных охладителей высокотемпературного оборудования, MEMS на основе управляемого распада метастабильной жидкости, микрореакторов водородной энергетики. Обсуждены закономерности капиллярных и волновых явлений в системах микроканалов и микрокамерах микрожидкостных устройств, полученные с использованием оптических методов, предложены методы расчета микрожидкостных систем, которые могут быть использованы при их разработке и оптимизации.

2. Микроэлектромеханические системы, основанные на управляемом распаде метастабильной жидкости

Важным направлением развития двухфазных микрожидкостных систем являются микроэлектромеханические системы (МЭМС) на основе управляемого взрывного распада микрообъемов жидкости. Их типичными примерами являются термические струйные принтеры [2], оптические переключатели и затворы, управляющие системы, основанные на быстром изменении фазового состава заполняющей среды. Схема работы теплового струйного принтера показана на рис. 1. Микрокапли чернил выбрасываются из микрокамеры в результате их импульсного нагрева и возникновения взрывного кипения. Для успешного применения МЭМС на основе управляемого распада жидкости необходимо развитие основ взрывного кипения микрообъемов жидкости в условиях высо-

кой внешней плотности энергии. Известно, что критерием перехода к взрывному кипению является достижение спинодали $T_{sp}/T_c = 0.923 + 0.077 \cdot (T_s/T_c)^9$, где T_s – температура бинодали и T_c – критическая температура [3]. Проблемой достижения этой температуры является экспоненциальный рост тепловых флуктуаций и резкое уменьшение времени ожидания вскипания в окрестности спинодали, поэтому для перехода к взрывному фазовому переходу необходимо использовать быстрый нагрев свободных от готовых центров кипения микрообъемов жидкости. Закономерности взрывного кипения жидкости на плоских микронагревателях рассмотрены в [4–6]. Высокую эффективность при исследовании взрывного кипения показал оптический метод [6].

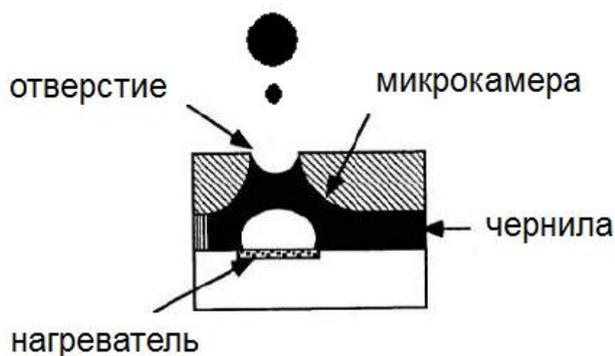


Рис. 1. Схема генерации капель в тепловом струйном принтере

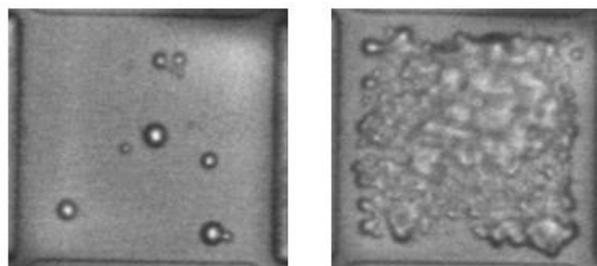


Рис. 2. Последовательные стадии взрывного кипения воды. Интервал времени примерно 200 наносек

Трудности, которые возникают при разработке МЭМС, обусловлены необходимостью достижения температуры спинодали (324.47°C для воды при атмосферном давлении) за времена меньше 2–3 микросекунд. Это обуславливает выбор многослойного микронагревателя с оптимизированным материалом и толщиной слоев, которые должны обеспечить отключение тепловыделения и отвод тепла после начала взрывного кипения. Расчеты тепловых процессов для слоистого микронагревателя показывают перспективность применения четырех или пятислойного тонкопленочного резистора, изготовленного послойным напылением слоев методом PECVD на плоской подложке из стекла. В качестве внешнего слоя целесообразно использовать гладкий твердый или наноструктурированный материал, что позволяет управлять температурой начала взрывного кипения. Проведенный численный анализ обосновал слоистую структуру нагревателя, изготовленного по технологии МЭМС, которая обеспечивает возможность многократного получения экстремально высоких скоростей роста температуры без разрушения нагревателя.

Теплофизические исследования взрывного кипения жидкости приводились при погружении микрочипа в кювету с рабочей жидкостью. Одинокные прямоугольные импульсы тока подавались на микронагреватель и эффективная плот-

ность теплового потока для воды достигала 2.2 ГВт/м^2 , что дает скорость роста температуры до 700 мекельвин в секунду. Для изучения управляемого распада жидкости доработана оптическая методика регистрации зародышеобразования, вскипания и динамики образующейся паровой полости, в которой измеряется интенсивность лазерного пучка, зеркально отражённого от поверхности нагревателя [6], рис. 3. Она основана на падении интегрального коэффициента зеркального отражения при возникновении микропузырьков, что позволяет определить динамику заполнения поверхности нагревателя паровой фазой. Для фотографирования стадий взрывного кипения применен импульсный твердотельный лазер с характерной длительностью светового импульса 8 нс и цифровая видеокамера, сопряженная с микроскопом. Тепловой поток от нагревателя в жидкость, скорость роста температуры жидкости и достигнутая температура определялись при численном решении уравнения теплопроводности для многослойного нагревателя.

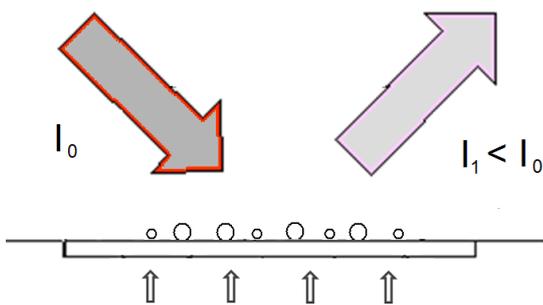


Рис. 3. Схема оптического метода диагностики взрывного кипения

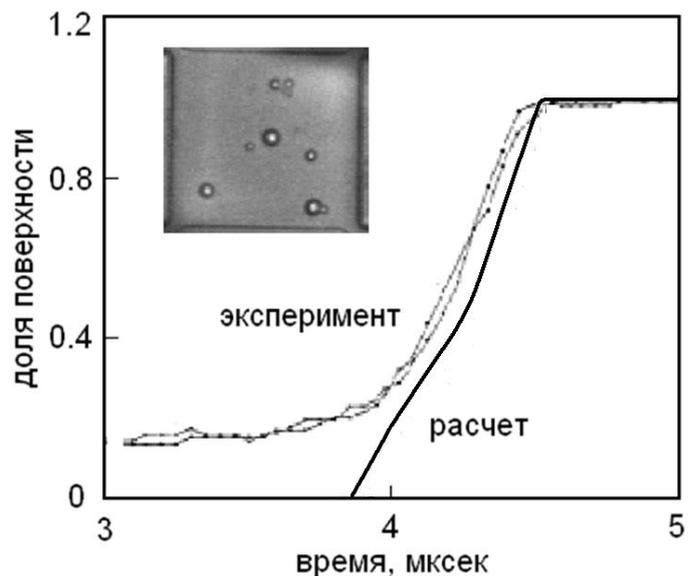


Рис. 4. Изменение во времени доли поверхности, покрытой паром, при пузырьковом распаде воды

Экспериментально установлены закономерности взрывного кипения воды при высокоэнергетическом воздействии тепловыми импульсами с использованием микронагревателя, покрытого субмикронным карбидокремниевым слоем. Эксперименты показали, что перед началом взрывного кипения температура нагревателя значительно превышает температуру насыщения и жидкость находится в глубоко метастабильном состоянии. На начальной стадии взрывного кипения, длительность которого не превышает 350 нс, пузырьки неравномерно распределены по поверхности нагревателя, их число мало (рис. 2) и в момент зарождения пузырьков наблюдается излучение расходящихся ударных волн.

Предложена модель самосогласованного зародышеобразования и роста паровых пузырей в наведённом ими поле давления при пузырьковом взрывном кипении. Образование пузырьков приводит к увеличению давления из-за инерции окружающей нагреватель жидкости, которое было определено для ускоренного движения фиктивного поршня в сжимаемой жидкости. С учетом уравнения для роста пузырька, это дает самосогласованную теорию взрывного кипения жидкости. Рост пузырей в окрестности спинодали рассмотрен с учетом сжимаемости жидкости и неоднородности поля температуры, учтен механизм подвода тепла к пузырьку от окружающей жидкости. Температура жидкости определяется решением задачи нестационарной теплопроводности для многослойного нагревателя с учётом тепла, идущего на парообразование. Проведено численное исследование взрывного кипения воды на гладкой и наноструктурированной поверхности. На рис. 4 показано сравнение расчёта относительной доли поверхности нагревателя, покрытой паровыми пузырьками, с экспериментальными данными для воды при эффективной плотности теплового потока 600 МВт/м^2 . Численные расчеты показали, что для наноструктурной поверхности температура начала взрывного кипения зависит от размера нанокаверн, но характеристики пузырькового распада мало изменяются по сравнению с гладкой поверхностью. Это показывает возможность управления взрывным кипением микрообъемов жидкости при изменении свойств поверхности нагревателя.

3. Тепловые процессы в активных двухфазных микроохладителях

Особенностью активных двухфазных микрожидкостных систем для охлаждения теплонапряженных элементов микроэлектроники и лазерных зеркал являются большие температурные напоры, вызывающие кипение жидкости в условиях вынужденной конвекции. Механизмы теплообмена при кипении в микроканалах рассмотрены в [7, 8]. Несмотря на значительное число работ, выполненных в этой области, данные экспериментальных исследований достаточно противоречивы. В ряде работ получено, что коэффициенты теплоотдачи зависят, в основном, от теплового потока и давления и слабо зависят от расхода и массового паросодержания. В других работах отмечено, что вклад пузырькового кипения в теплоотдачу может быть не является определяющим и коэффициенты теплоотдачи растут с ростом скорости и паросодержания. Опубликованные методы расчета теплообмена основаны, либо на модификации моделей для кипения в обычных трубах, или специально разработанных уравнениях [9]. Тем не менее, в [9] было отмечено, что применение существующих методов расчета для различных режимов теплообмена при кипении в микроканалах не может считаться успешным.

Основываясь на обработке полученных ранее экспериментальных данных для широкого круга хладонов, развит метод расчета теплообмена при кипении движущейся жидкости в микроканальных системах охлаждения и микро парогенераторах, учитывающий вклад пузырькового кипения, двухфазной вынужденной конвекции и испарения сверхтонкой пленки жидкости. Предложено

рассчитывать коэффициент теплоотдачи как суперпозицию коэффициентов теплоотдачи при пузырьковом кипении с учетом подавления кипения при толщине пленки жидкости, сравнимой с диаметром критического зародыша (фактор Ψ_{sup}), двухфазной конвекции и испарения тонкой пленки жидкости в виде:

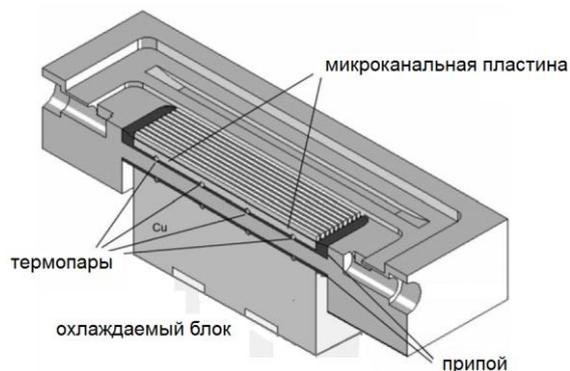


Рис. 5. Активный двухфазный микроохладитель на основе микроканалов

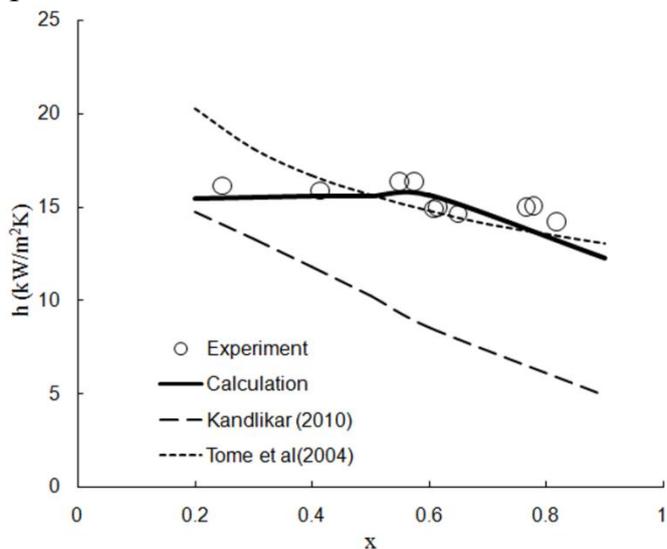


Рис. 6. Расчет коэффициента теплоотдачи в активном микроохладителе при кипении R-21 при $G=50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, точки - данные [15].

$$h^2 = (h_{con} F)^2 + (h_{boil} \Psi_{sup} S)^2 + (h_{ev} E)^2, \quad (1)$$

где $\Psi_{sup} = \tanh^2(2.5 \cdot 10^{-3} \theta_{sup}^2)$, $\theta_{sup} = (y_{vis}/d_{tan})^{0.6} / (Bo_x^{0.4} We_{all_liq}^{-0.08} Pr^{1/3})$, Bo_x - число кипения, определенное по скорости жидкости для паросодержания X , $y_{vis} = 5\nu_{liq} / \sqrt{\tau_w / \rho_{liq}}$ - толщина вязкого подслоя для жидкой пленки, τ_w - трение на стенке, d_{tan} - диаметр активного зародыша, $E = (1 + \rho_{gas}(1-x)/\rho_{liq} x)^{-1}$ доля поверхности канала, занятая пленкой для течения с удлиненными пузырями и $E = 1$ для кольцевого течения, $F = [1 + x Pr_{liq} (\rho_{liq}/\rho_{gas} - 1)]^{0.35}$ и $S = (1 + 0.55 F^{0.1} Re_{liq0}^{0.16})^{-1}$. На рис. 6 приведено сравнение результатов расчета коэффициента теплоотдачи по уравнению (1) и двум известным моделям с экспериментальными данными [10] для кипения хладона R-134a в микроканальном теплообменнике. Как видно, предложенный подход достаточно эффективен для обоснования активных двухфазных микрожидкостных систем охлаждения.

4. Микроканальные реакторы водородной энергетики

Новым применением микрожидкостных систем являются компактные химические реакторы. Здесь рассматриваются как газожидкостные реакторы с прецизионными устройствами ввода реагирующих компонент, так и высоко-

температурные реакторы с тонкопленочным катализатором, в том числе для получения водорода и его комплексного использования в топливных элементах. В химических реакторах на основе микроканалов реализуется экстремально высокое соотношение поверхность/объем (до $105 \text{ м}^2/\text{м}^3$) и низкое внешнее диффузионное сопротивление, что предопределяет их уникальные свойства для проведения химических превращений. По сравнению с традиционными реакторами, микроканальные реакторы имеют существенно меньшие эффективные длины переноса, что в значительной степени устраняет диффузионные ограничения, ускоряет скорости реакций и позволяет интегрировать потоки тепла и реагирующих компонент. Опубликованные результаты показывают, что микроканальные реакторы позволяют проводить паровую конверсию метана в синтез-газ, обогащенный водородом, при времени пребывания 10 мс [11]. Механизм и кинетика химических превращений метана при избытке водяного пара обсужден в [11, 12], но существует очень мало расчетных работ, направленных на рассмотрение вопросов тепло- и массообмена при химических превращениях в микроканальных реакторах.

Рассмотрим закономерности многостадийных реакций в микроканалах с тонкослойным наноразмерным катализатором при конверсии метана в водород, когда внешние и внутренние диффузионные ограничения в значительной степени подавлены и реакции проходят в кинетическом режиме. На основе синтеза многоядерных координационных соединений с последующим терморазложением до высокодисперсных наноразмерных оксидов и механохимических методов созданы многокомпонентные наноструктуры на основе Rh, Pd, La, Ba с высокой однородностью фазового состава, конвертирующие углеводороды в водородсодержащий газ. Наночастицы, с размером порядка 1 нм , характеризуются повышенной поверхностной энергией, координационной ненасыщенностью и большой абсорбционной емкостью, что обусловлено соизмеримостью размера частиц с радиусом действия межатомных сил. Они понижают энергию активации реакций и управляют селективностью, увеличивают содержание водорода в продуктах конверсии. Многокомпонентные наноструктуры применены для получения обогащенного водородом синтез-газа при паровой конверсии и тепла при каталитическом горении метана в микроканалах, они показали высокую эффективность и временную стабильность.

Разработаны методы численного моделирования химических и тепловых процессов в микроканалах с каталитически активной наноструктурой при конверсии углеводородов в присутствии паров воды в разных соотношениях. Метод основан на решении уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа, которые записаны в переменных завихренность-функция тока [13]. На рис. 4 показана полученная в расчетах зависимость концентраций продуктов паровой конверсии метана от температуры катализатора в кольцевом микроканале с зазором 1000 мкм и экспериментальные данные [12]. В условиях контролируемых тепловых и диффузионных полей, композитные катализаторы показали высокую эффективность получения водорода.

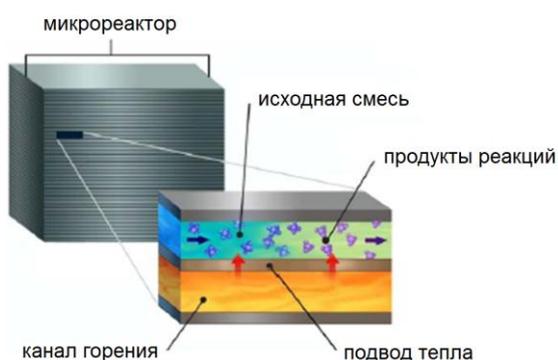


Рис. 7. Схема микроканального топливного процессора для получения синтез-газа

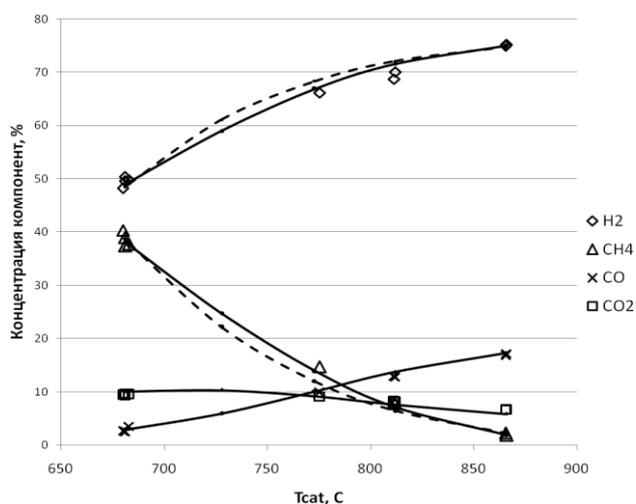


Рис. 8. Расчет паровой конверсии метана: линия – $E_1=160$; $E_3=80$ кДж/моль; пунктир – $E_1=E_3=130$ кДж/моль

5. Заключение

Представленные результаты показывают высокую эффективность применения микрожидкостных систем в различных областях микротехники. Для реализации их преимуществ, принципиально важными являются разработанные методы расчета физико-химических превращений в микросистемах. Обоснована слоистая структура нагревателя, изготовленного по технологии МЭМС, которая обеспечивает возможность многократного получения экстремально высоких скоростей роста температуры без разрушения нагревателя для МЭМС, основанных на управляемом распаде микрообъемов жидкости. С использованием лазерных методов и математического моделирования установлены закономерности взрывного кипения микрообъемов воды при высокоэнергетическом воздействии тепловыми импульсами для многослойного микронагревателя с внешним субмикронным слоем карбида кремния. Приведенные результаты вскрывают основные закономерности взрывного кипения микрообъемов жидкости при импульсном нагреве, их использование позволит создать более совершенные МЭМС-актуаторы.

Предложенная модель для расчета локальных характеристик теплообмена при кипении хладонов в активных микрожидкостных двухфазных системах охлаждения определяет механизм взаимосвязи гидродинамических и тепловых процессов и условия преимущественного влияния пузырькового кипения, двухфазной вынужденной конвекции и испарения пленок жидкости. Она может использоваться для расчета систем охлаждения, как элементов микротехники.

Высокая интенсивность химических превращений в микрореакторах при конверсии углеводородов обусловлена малой эффективной длиной переноса и возможностью применения наноразмерных катализаторов, что устраняет внутренние и внешние диффузионные ограничения на скорость реакций. Для разработки и оптимизации микрореакторов могут быть использованы предложенные

методы расчета химических превращений, которые показывают преимущества применения микроканалов в аппаратах водородной энергетики.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10519).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abramson A.R., Tien C.L. Recent Developments in Microscale Thermophysical Engineering // *J. Microscale Thermophys. Eng.* – 1999. – V. 3 (4). – P. 229–244.
2. Hue P. Le. Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology // *Journal of Imaging Science and Technology.* – 1998. – V. 42 (1). – P. 49 – 62.
3. Lienhard J.H., Shamsundar N. and Biney P.O. Spinodal Lines and Equations of State-a review // *Nucl. Engng. Des.* – 1986. – V. 95. – P. 297– 314.
4. 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. – V. 43. – P. 281– 296.
5. Hong Y., Ashgriz N., and Andrews J. Experimental study of bubble dynamics on a micro heater induced by pulse heating // *J. Heat Trans.* – 2004. – V. 126 (2). – P. 259 – 271.
6. Kuznetsov V.V., Vasserman E.S. Explosive vaporization dynamics on a flat microheater // *Proc. 3-rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation.* – Pisa, 2004. – Paper ven 04.
7. Thome, J.R. 2006. State-of-the-Art Overview of Boiling and Two-Phase Flows in Microchannels // *Heat Transfer Eng.* – 2006. – V. 27 (9). – P. 4 – 19.
8. Kandlikar S.G. Similarities and Differences Between Flow Boiling in Microchannels and Pool Boiling // *Heat Transfer Eng.* – 2010. V. 31 (3). – P. 159–167.
9. Bertsch S.S, Groll E.A, Garimella S.V. Composite Heat Transfer Correlation for Saturated Flow Boiling in Small Channels // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2009. – V. 52. – P. 2110–2118.
10. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. Pressure drop and flow boiling heat transfer of refrigerant R-134A in a microchannel heat sink // *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15).* – Kyoto, 2014. – IHTC15-8792.
11. Tonkovich A., Lee Y., Yang B. et al. From Seconds to Milliseconds to Microseconds Through Tailored Microchannel Reactor design of a Steam Methane Reformer // *Catalysis Today.* – 2007. – V. 120 (1). – P. 21 – 29.
12. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V., Gasenko O.A. Methane Steam Reforming in an Annular Microchannel with Rh/Al₂O₃ Catalyst // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2009. – V. 18 (3). – P. 187 – 196.
13. Kuznetsov V.V., Kozlov S.P. Modeling of Methane Steam Reforming in a Microchannel with a Heat Flow Distributed in Length // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2008. – V. 17 (1). – P. 53 – 59.

© В. В. Кузнецов, 2016

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ И ПОЛЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

Андрей Петрович Белоусов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, тел. (383)346-06-77, e-mail: a.p.belousov@corp.nstu.ru

Пётр Яковлевич Белоусов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры оптических информационных технологий, тел. (383)346-23-12, e-mail: pyabelousov@ngs.ru

Леонид Александрович Борыняк

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, тел. (383)346-06-77, e-mail: borynyak@corp.nstu.ru

Часть современных технологий тепловой и атомной энергетики, химического производства, трубопроводного транспорта и т.п. основана на использовании многофазных потоков. Интенсивное развитие этих технологий приводит к проблеме совершенствования методов диагностики физических параметров газожидкостных смесей. В статье представлен ряд оригинальных локальных и полевых оптических систем определения скорости, пространственного распределения, геометрических параметров элементов дисперсной фазы в пузырьковых, газокапельных, пленочных течениях.

Ключевые слова: оптические измерительные технологии, доплеровские анемометры, обработка изображений, газожидкостные течения.

OPTICAL SYSTEMS OF LOCAL AND SPATIAL GAS-LIQUID FLOWS DIAGNOSTICS

Andrey P. Belousov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, K. Marks pr., 20, Ph. D., tel. (383)346-06-77, e-mail: a.p.belousov@corp.nstu.ru

Petr Ya. Belousov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, K. Marks pr., 20, Ph. D., tel. (383)346-23-12, e-mail: pyabelousov@ngs.ru

Leonid A. Borynyak

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, K. Marks pr., 20, D. Sc., tel. (383)346-06-77, e-mail: borynyak@corp.nstu.ru

Part of the current technologies of thermal and nuclear power engineering, chemical industry, pipeline transport, etc. based on the multiphase flows using. Intensive development of these technologies leads to the problem of improving the methods of diagnosing the gas-liquid mixtures physical parameters. The paper presents a number of original local and spatial optical systems to the speed, spatial distribution, the geometric parameters of the dispersed phase elements in the bubble, gas-drop, and film determination.

Key words: optical measurement technologies, Doppler anemometers, image processing, gas-liquid flows.

Некоторые современные технологии тепловой и атомной энергетики, химической (в частности нефтехимической) промышленности, трубопроводный транспорт основываются на использовании гидромеханических систем, содержащих вещества в различных фазовых состояниях, прежде всего газовых и жидкостных. Процессы, происходящие в таких системах на протяжении нескольких десятков лет, активно изучаются в исследовательских лабораториях, что отражено в большом числе опубликованных работ. Повышение эффективности работы промышленных установок в существенной степени определяется пониманием динамики происходящих в них процессов. Приведенные в литературных источниках данные не всегда позволяют построить цельную картину явлений, выделить факторы, оказывающие определяющее влияние на гидродинамические процессы. Ввиду сложности задач, расчетные модели, применяемые в настоящее время, требуют привлечения больших объемов экспериментальной информации, полученных с применением не возмущающих течение измерительных технологий, наиболее предпочтительными из которых, являются оптические. Ввиду наличия большого количества границ раздела при изучении потоков иногда необходимо использование контактных зондовых методов. В статье представлены современные перспективные оптические системы диагностики газожидкостных потоков пригодные для решения широкого ряда задач современной экспериментальной гидромеханики [1].

В случае высокой концентрации дисперсной фазы огромное количество границ раздела делает оптические технологии малоэффективными. Один из способов передачи информации из интересующей области в область фиксации – использование оптических волокон. Взаимодействие зонда с границами раздела фаз приводит к их деформации, что ухудшает точность измерений. Авторами предложен метод определения размеров дисперсной фазы до момента контакта с зондом, улучшающий характеристики системы.

На рис. 1. Представлена схема оптоволоконного зонда. Излучение He-Ne лазера (632,8 нм) вводится в одномодовое оптическое волокно. После взаимодействия с границей раздела, часть излучения возвращается обратно в волокно, отклоняется призмой Волластона, попадает на фотоприемное устройство и в дальнейшем анализируется. Уровень фототока определяется показателем преломления среды, в которой находится торец волокна. Процесс взаимодействия зонда с элементом дисперсной фазы состоит из двух этапов: первый – от момента обнаружения пузырька системой до момента контакта с датчиком, второй – зонд находится в пузырьке. Анализ преобразований гауссова пучка при взаимодействии со сферическими границами раздела показывает, что первый этап может быть использован для получения информации о размере пузырька до момента контакта с зондом. На рис. 2 приведена зависимость чувствительности (расстояния, на котором система начинает фиксировать границу раздела) от радиуса пузырька для уровня сигнала, составляющего величину $\frac{1}{2}$ от макси-

мального значения. Чувствительность – однозначная функция радиуса пузырька, что используется для определения его размеров.

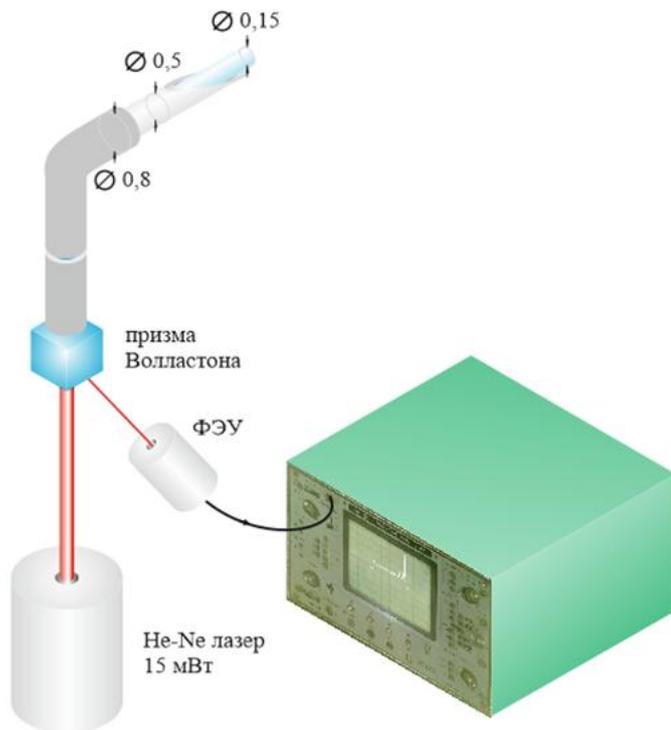


Рис. 1. Оптоволоконный зонд

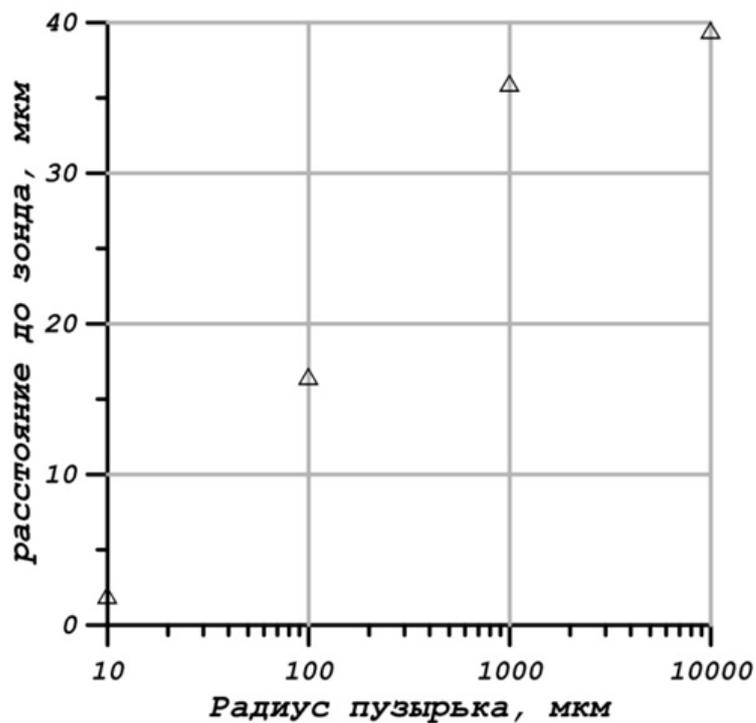


Рис. 2. Зависимость чувствительности от радиуса пузырька

Сравнение результатов, полученных при помощи данного метода с время-пролетной методикой (диаметр пузырька $\approx 1,7$ мм) показало эффективность предлагаемого подхода при изучении пузырьковых потоков [2].

Если концентрация дисперсной фазы невысока, используют стандартные методы гидромеханических исследований. Лазерная доплеровская диагностика хорошо зарекомендовала себя в газовых и жидкостных однофазных течениях. С развитием фазовых методов доплеровской анемометрии, интерес к применению традиционных оптических схем в двухфазной гидродинамике снизился. Остался ряд нерешенных вопросов касающихся формирования доплеровского сигнала элементами дисперсной фазы. Авторами проведен ряд исследований, позволяющих эффективно использовать стандартные оптические схемы для диагностирования газожидкостных течений. На рис. 3 представлен лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) на обратном рассеянии с опорным пучком. Пузырек, движущийся в жидкости, испытывает деформации при взаимодействии с препятствиями или неоднородностями потока. Передняя и задняя границы пузырька перемещаются с различными скоростями, что отражается на структуре доплеровского сигнала. Анализ процесса взаимодействия лазерного излучения с границами раздела показал возможность изучения динамики дисперсной фазы. В текстовом эксперименте была зафиксирована деформация пузырька на плоском горизонтальном препятствии [3]. Изучение преобразования гауссова пучка сферическими границами раздела сред показало, что в сигнале на выходе фотоприемного устройства должны присутствовать максимумы, положение которых определяется радиусами кривизны поверхностей. Исследования тестовых объектов (сфер и пузырьков) различных радиусов показало возможность получения информации о размере и скорости дисперсной фазы [4].

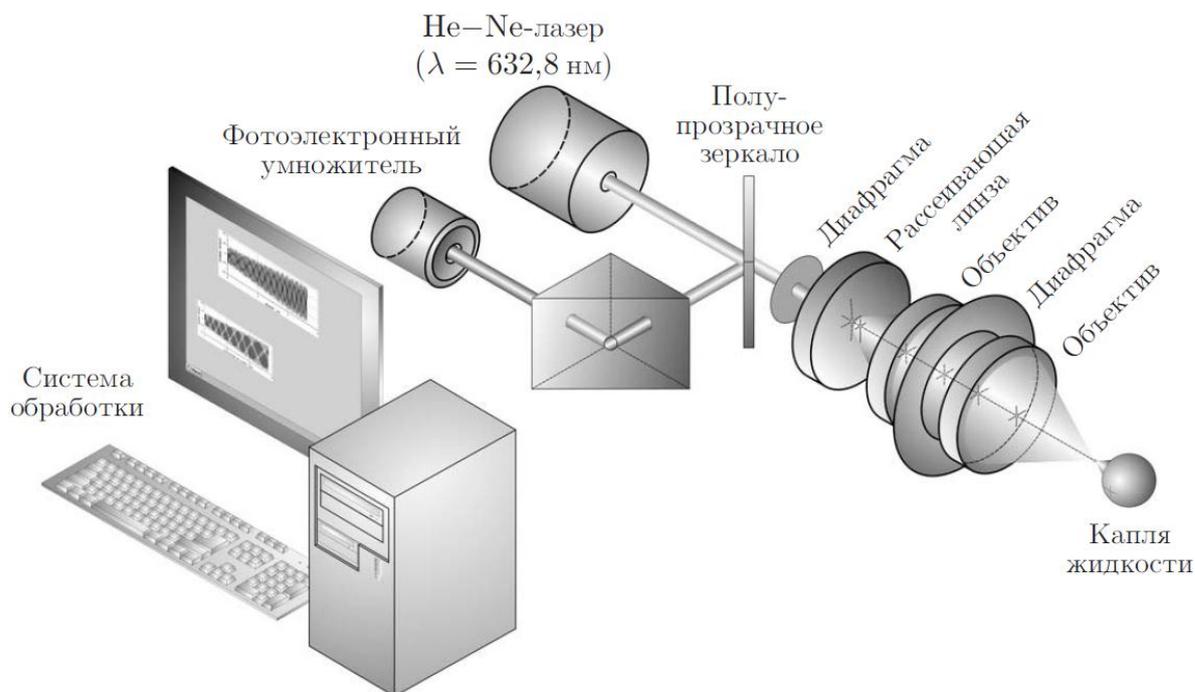


Рис. 3. Лазерный доплеровский измеритель скорости с опорным пучком

Движущиеся в среде пузырьки и капли совершают колебания на собственных частотах. Изучено формирование сигнала в дифференциальной схеме ЛДА, изображенной на рис. 4 частицами дисперсной фазы.

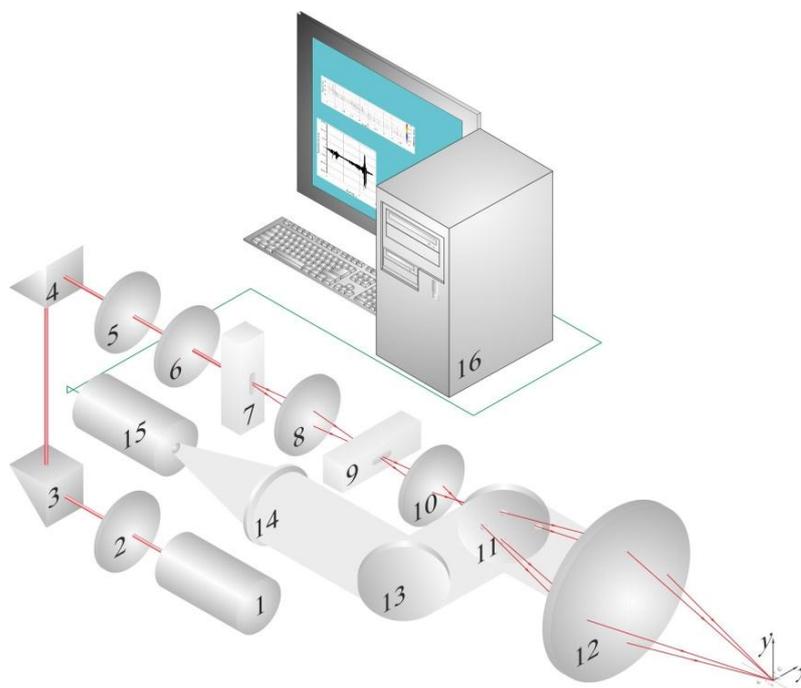


Рис. 4. Дифференциальная схема ЛДА

Система содержит He-Ne лазер 1, фазовую пластинку 2, поворотные призмы 3, 4, линзы 5 и 6, два акустооптических модулятора бегущей волны 7 и 9, взаимно ортогонально ориентированные, за которыми помещены линзы 8 и 10, зеркало с диафрагмами 11, составной объектив 12. На пути рассеянного пучка, ограниченного апертурой 12 и отраженного зеркалом 11 последовательно установлены поворотное зеркало 13, микрообъектив 14 и фотоприемник 15. Показано, что содержащаяся в доплеровском сигнале информация о собственных колебаниях может быть использована для одновременного измерения скорости и размера дисперсной фазы. Проведены тестовые эксперименты подтвердившие эффективность разработанного метода применительно к пузырьковым и капельным потокам [5].

В настоящее время все большую популярность приобретают методы полевой диагностики течений. В качестве примера можно привести системы измерения полей скорости по изображениям частиц (Particle Image Velocimeter, Particle Tracking Velocimeter) и их модификации. Адаптация вышеприведенных устройств к измерениям в многофазных потоках требует рассмотрения процесса формирования изображения дисперсной фазы. Как показали результаты исследований, проведенных авторами, применение диффузных источников освещения делает границу раздела сред видимой (см. рис. 5). Полученная информация используется для восстановления пространственного распределения и гео-

метрических параметров элементов дисперсной фазы методами цифровой обработки изображений. Проведены тестовые эксперименты в пузырьковых, капельных и пленочных потоках, показавшие высокую эффективность предложенного подхода [6 – 10].

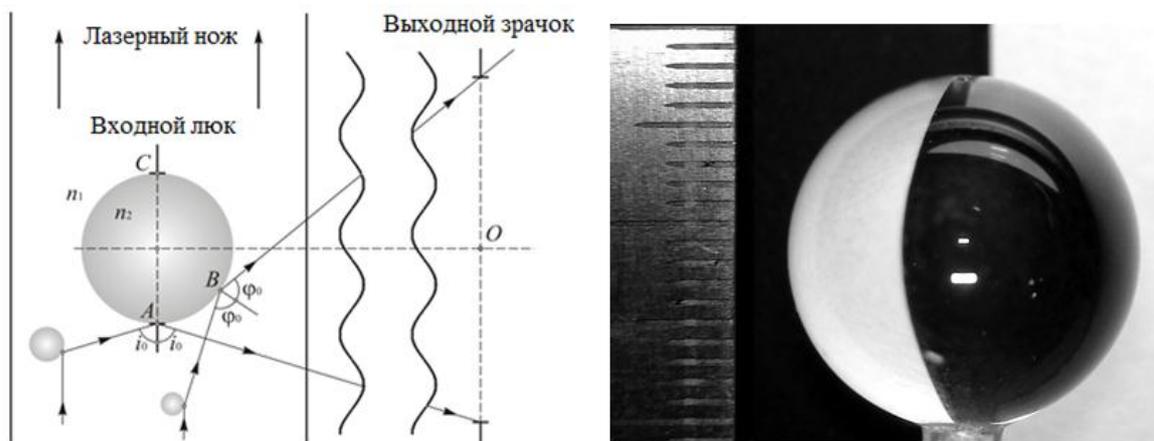


Рис. 5. Диффузное освещение границы раздела фаз

В статье представлен ряд локальных и полевых оптических методов диагностики газожидкостных потоков применяемых авторами для получения информации о дисперсном составе и пространственном распределении дисперсной фазы в пузырьковых, капельных и пленочных течениях. Рассмотрение процессов формирования оптического сигнала границами и элементами дисперсной фазы позволило улучшить характеристики существующих оптоволоконных, лазерных доплеровских и полевых систем. Анализ практической применимости на базе тестовых экспериментов, сравнение с результатами, полученными альтернативными методами доказали высокую эффективность предлагаемых методов в диагностике газожидкостных течений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов А. П. Оптическая диагностика многофазных потоков: учеб. пособие / А. П. Белоусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 227 с.
2. Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А. Математическая модель взаимодействия оптического зонда с пузырьками газа // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25), часть 1. – С. 93–99.
3. Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А. Доплеровская диагностика дисперсной фазы в газожидкостных потоках // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №4 (53). – С. 63–69.
4. Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А. Измерение диаметров пузырьков и капель методом доплеровской анемометрии // Автометрия. – 2013. – № 2 (49). – С. 106–114.
5. Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А. Определение скорости и размера пузырьков в двухфазных потоках с помощью лазерного доплеровского анемометра // Автометрия. – 2015. – № 6 (51). – С. 47–51.
6. Белоусов А. П., Белоусов П. Я. Метод измерения дисперсного состава и локального газосодержания газожидкостных потоков // Автометрия. – 2008. – № 2 (44). – С. 50–55.

7. Белоусов А. П. Пространственное распределение газовой фазы в осесимметричной затопленной импактной струе // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. - № 4 (50). – С. 33–38.
8. Белоусов А. П., Белоусов П. Я. Измерение толщины пленки жидкости, движущейся по сферической поверхности // Автометрия. – 2010. – № 6 (46). – С. 116–121.
9. Белоусов А. П., Белоусов П. Я. Оптическая диагностика газочапельных потоков // Автометрия. – 2011. – № 1 (47). – С. 110–114.
10. Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А. Применение метода диффузного освещения в диагностике газожидкостных потоков // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25), часть 1. – С. 229–240.

© А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Борыняк, 2016

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНОГО САМОЛЕТА

Евгений Александрович Панков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и оптоотехники, тел. (903)076-49-33, e-mail: emailpankov@gmail.com

Татьяна Вячеславовна Ларина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Елена Юрьевна Кутенкова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В статье рассмотрен процесс повышения технологичности разработки транспортного самолета за счет внедрения электронного моделирования.

Ключевые слова: повышение технологичности, электронное моделирование.

IMPROVING TECHNOLOGICAL CONSTRUCTION OF TRANSPORT AIRCRAFT

Evgeny A. Pankov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (903)076-49-33, e-mail: emailpankov@gmail.com

Tatiana V. Larina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Elena Yu. Kutenkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

The article describes the process of increasing the adaptability of development of transport aircraft due to the introduction of electronic simulation.

Key words: increasing processability, electronic simulation.

Задача обеспечения технологичности продукции существует в любом производстве на всех стадиях жизненного цикла изделия. Причём эта задача является одной из важнейших и сложнейших, из тех которые приходится решать

в процессе изготовления продукции. В настоящее время, на производстве, стараются максимально перейти к электронному документообороту и проектированию с использованием систем САПР, в том числе для того, чтобы обеспечить отработку на технологичность.

Внедрение электронного моделирования позволит повысить качество и скорость работы, в современном производстве важна каждая мелочь. При серийном выпуске самолета, простой даже на одной сборочной операции изготовления изделия из-за отсутствия взаимозаменяемости деталей, способен повлечь материальные убытки и срывы планов.

До настоящего времени при установке заслонки и других узлов, у сборщиков возникали проблемы, связанные с недостаточной точностью выполнения базовых поверхностей необходимых для присоединения деталей и узлов, что является стандартной проблемой при сборке таких больших машин, как самолет.

За счет внедрения электронного моделирования планируется повысить технологичность задней части транспортного самолета. Ранее сборка осуществлялась с помощью устаревших макетов и шаблонов, неоднократной отработки на стендах, испытаний. Ввод электронного моделирования позволяет:

- значительным образом уменьшить трудозатраты;
- повысить скорость разработки и внедрения новых элементов конструкции;
- на стадии моделирования и макетирования увидеть необходимость изменений в конструкции;
- и в конечном итоге уменьшить затраты на производство.

Задачами проекта являются:

- создание электронных моделей заслонки, топливного крана, огнетушителя, необходимых кронштейнов, уголков и прочего;
- сконструировать и согласовать установку заслонки;
- выбрать необходимые крепежные изделия;
- увеличить ширину полки кронштейна для увеличения возможной компенсации монтажных неточностей;
- подобрать набор прокладок между кронштейном и деталью;
- согласовать изменение конструкции шпангоута, необходимо добавить наплыв для обеспечения закрепления;
- выполнить итоговый электронный макет изделия в сборке;
- оформить весь комплект конструкторской документации на детали, входящие в изделие в сборе.

Работа подразумевает выполнение полноценной виртуальной электронной сборки задней части транспортного самолета (рис. 1-4). Отдельные модели сборки включают в себя большое количество информации.

К каждой из них прикреплено:

- предыдущие ревизии детали;
- материал, из которого она изготавливается и необходимые материалы покрытий;
- технологический процесс;

- спецификации для сборок;
- электронные версии чертежей;
- оцифрованные версии старых чертежей, выполненных вручную;
- все чертежи, спецификации, технологические процессы и сопровождающая документация в PDF формате для быстрого доступа при необходимости и возможности просмотра без специальных программ.

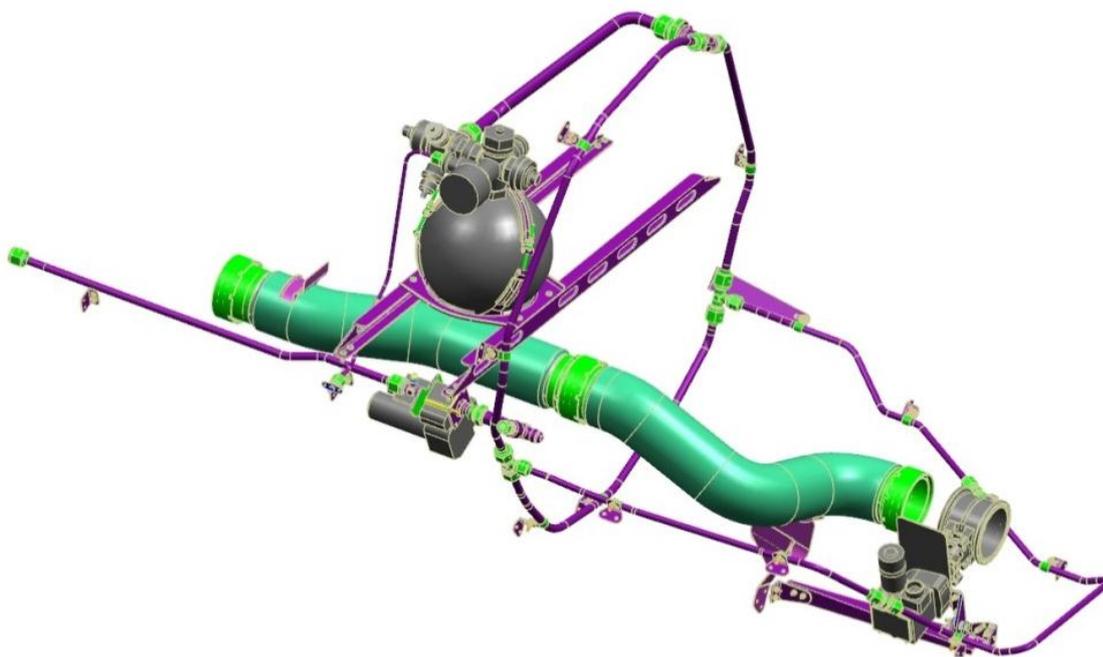


Рис. 1. Общий вид части законцовки хвостовой части фюзеляжа

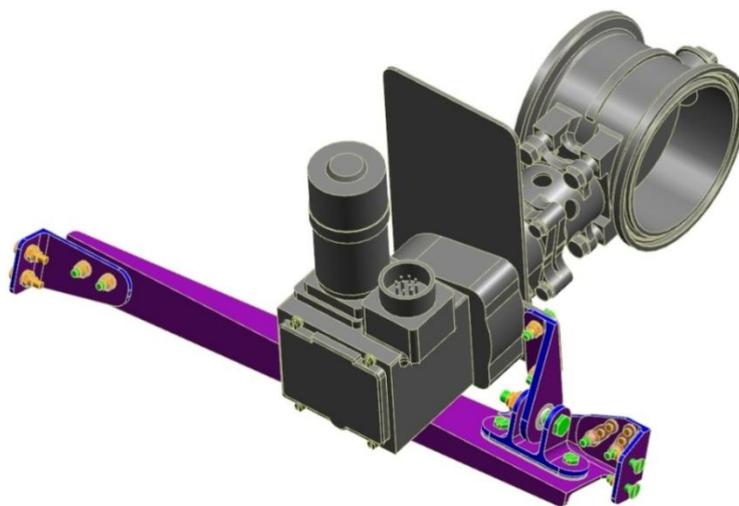


Рис. 2. Установка заслонки

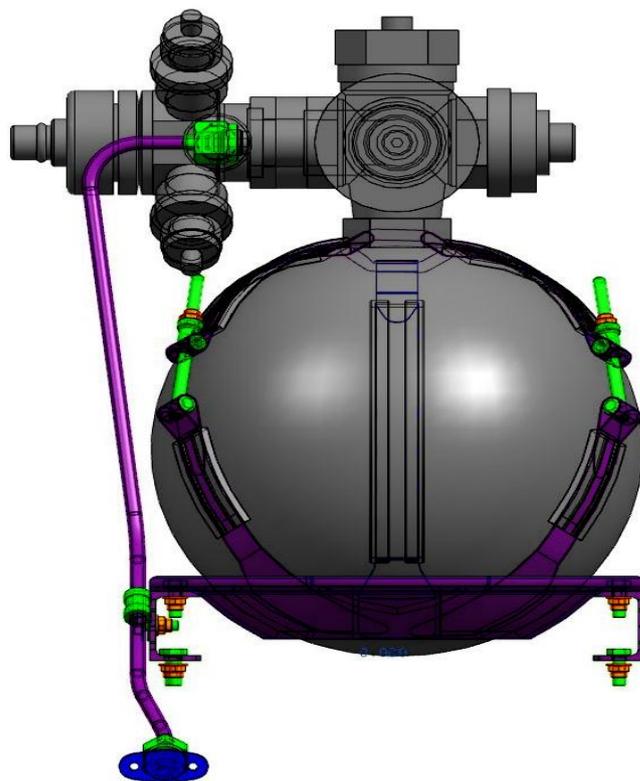


Рис. 3. Установка огнетушителя в специальную чашу

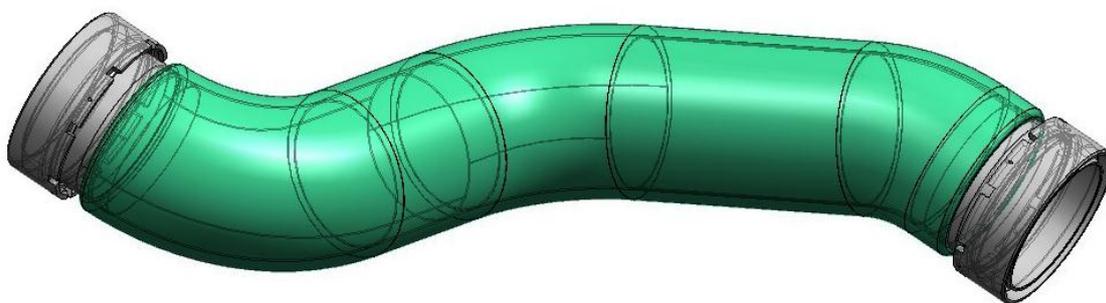


Рис. 4. Электронное макетирование трубы воздушного охлаждения

Переход на автоматизированное проектирование потребует частичной или полной реорганизации проектных и обслуживающих отделов и изменений в работе компании в целом.

Уйдет часть старых функций. Большинство рутинных операций будут выполняться быстрее, уменьшатся сроки выполнения работ, может быть изменен порядок выдачи заданий и согласований, а высвободившиеся сотрудники будут задействованы в других работах. Поменяется процедура обмена данными между специалистами - все изменения будут доступны в электронном виде для

каждого участника проекта в режиме реального времени. При внедрении трехмерного проектирования отпадет необходимость в части согласований.

В конкретном случае, за счет внедрения электронного моделирования повысится как общая технологичность транспортного самолета, так и трудоемкость работы на стадиях конструкторской и технологической подготовки производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гончаров, П.С. NX для конструктора-машиностроителя [Текст]: Учебное пособие / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптев, В.А. Осиюк. – Москва : Издательство ДМК, 2010. – 498 с.
2. Данилов, Ю. Практическое использование NX [Текст]: Учебное пособие / Ю. Данилов, И. Артаманов – Москва : Издательство ДМК, 2011. – 332 с.
3. Орлов, П.И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие в 3-х книгах/ П.И. Орлов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977.
4. Технологичность конструкции изделия: справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990. - 768 с. : ил.
5. Петров П. В. О методике отработки на технологичность различных объектов // Современные проблемы геодезии и оптики: Сб. материалов 53-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 70-летию СГГА (Новосибирск, 11–21 марта 2003 г.). – Новосибирск: СГГА, 2003. Ч. 2. – С. 184–185.
6. Петров П. В., Кутенкова Е. Ю. Отработка чертежей деталей на технологичность: учеб.-метод. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 151 с.
7. Амиров, Ю.Д. Основы конструирования: Творчество – стандартизация – экономика: Справочное пособие / Ю.Д. Амиров.– М.: Изд. Стандартов, 1991. – 392 с.
8. ГОСТ 14.201-83. ЕСТПП. Общие правила обеспечения технологичности конструкций изделий.
9. ГОСТ 14.205-83. ЕСТПП. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения.

© Е. А. Панков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, 2016

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКА ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В СОСТАВЕ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ

Наталья Андреевна Сейфи

Филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, инженер, тел. (383)330-91-88, e-mail: aag-09@yandex.ru

Александр Андреевич Голицын

Филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, ст. инженер-электроник, тел. (383)330-91-88, e-mail: aag-09@yandex.ru

Разработан оптико-электронный блок, позволяющий управлять ПЗС-фотоприемником при помощи сигналов произвольной формы. Изделие используется для исследования недокументированных возможностей фотоприемников с целью дальнейшего их использования в составе активно-импульсных приборов.

Ключевые слова: ПЗС-матрица, лазерный излучатель, активно-импульсный метод.

LABORATORY STAND FOR RESEARCH OF FEATURES OF THE CCD-SENSOR FOR USE IN THE COMPOSITION OF THE ACTIVE PULSE OF THE SURVEILLANCE DEVICE

Natalya A. Seifi

Design and Technology Institute of Applied Microelectronics (Branch of The Institute of Semiconductor Physics), 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 Lavrentev av., engineer, tel. (383)330-91-88, e-mail: aag-09@yandex.ru

Alexandr A. Golitsyn

Design and Technology Institute of Applied Microelectronics (Branch of The Institute of Semiconductor Physics), 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 Lavrentev av., electronic engineer, tel. (383)330-91-88, e-mail: aag-09@yandex.ru

The article describes optoelectronic complex designed to control the CCD image sensor by arbitrary waveforms in order to explore its opportunities to be used as a part of an active-pulse surveillance device.

Key words: CCD image sensor, laser emitter, active-pulse method.

В работе ставилась задача создания стенда для последующих исследований режимов работы ПЗС-фотоприемника, управляемого недокументированными способами. Основная цель исследований – узнать, можно ли (и если можно, то каким способом) подать на фотоприемник управляющие сигналы, чтобы с его помощью получать изображение синхронно с лазерным излучателем, подсвечивающим сцену. Такая возможность необходима для создания активно-

импульсного прибора наблюдения [1] без использования в своей конструкции электронно-оптического преобразователя.

Активно-импульсными приборами наблюдения называются приборы, имеющие в своей конструкции синхронно работающие фотоприемник и импульсный излучатель, используемый для подсветки сцены, причем фотоприемник получает изображение с некоторой задержкой относительно срабатывания излучателя, и тем самым воспринимает отраженный от интересующих оператора объектов свет излучателя, отсекая свет, отраженный от объектов, находящихся ближе заданного расстояния, например, от частиц пыли или тумана.

Примеры и принцип действия активно-импульсных приборов наблюдения подробно описаны в [1, 2]. В качестве основного элемента подобных приборов используется электронно-оптический преобразователь, выполняющий одновременно роль быстродействующего затвора фотоприемника и роль усилителя яркости.

Причин отказаться от использования в конструкции приборов электронно-оптического преобразователя несколько. Основная из них заключается в потребности уменьшить массогабаритные характеристики прибора за счет исключения из его конструкции как самого электронно-оптического преобразователя, так и необходимой для его согласования с ПЗС или КМОП фотоприемником проекционной схемы.

Разработанный стенд представляет собой бескорпусной оптико-электронный прибор, состоящий из платы управления, платы фотоприемника с прикрепленным к ней объективом, лазерного излучателя с фокусирующей оптической системой и основания, на котором упомянутые части прибора закреплены. В качестве устройства отображения используется монитор персонального компьютера, с которого также осуществляется управление стендом.

Плата управления осуществляет формирование управляющих ПЗС-фотоприемником сигналов по заранее описанным алгоритмам, принимает «сырой» видеопоток, осуществляет частичную обработку полученных изображений, передает итоговое изображение на персональный компьютер, управляет лазерным излучателем. В основе платы лежит реконфигурируемая система [3] на базе программируемой логической интегральной схемы и работающего в связке с ней сигнального процессора, что позволило сделать плату универсальной для нескольких типов ПЗС-фотоприемников, а также позволило максимально упрощенно изменять форму управляющих фотоприемников сигналов по желанию оператора.

Плата фотоприемника является аппаратно-зависимой и проектируется под конкретный ПЗС-фотоприемник. В настоящее время для работы со стендом спроектировано несколько видов плат для разных типов фотоприемников.

Стенд позволяет управлять фотоприемником, подавая на него управляющие сигналы произвольной формы по заданному оператором алгоритму, запускать в заданные моменты времени лазерный излучатель, получать изображение, передавать его на персональный компьютер и при необходимости производить несложный анализ и обработку получаемого изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков В.Г., Креопалов В.И. Малогабаритные активно-импульсные приборы ночного видения // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2006. – № 4. – С. 55-58.
2. Горобец В.А., Кабанов В.В., Кабашников В.П., Кунцевич Б.Ф., Метельская Н.С., Шабров Д.В. Активно-импульсные системы видения и алгоритмы определения расстояний до объектов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81. – № 2. – С. 283-291.
3. Журов Г. Е., Цивинский М. Ю. Применение парадигмы высокопроизводительных реконфигурируемых вычислительных систем для построения тракта обработки изображения в тепловизионных и многоканальных приборах // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 5, ч. 1. – С. 29–32.

© Н. А. Сейфи, А. А. Голицын, 2016

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СОСТАВЕ ЦИФРОВОГО ПРИЦЕЛА ФОТОПРИЕМНИКА С ИЗБЫТОЧНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Александр Андреевич Голицын

Филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, ст. инженер-электроник, тел. (383)330-91-88, e-mail: aag-09@yandex.ru

Описывается способ ввода поправок цифрового прицела путем перемещения изображения наблюдаемой сцены относительно неподвижного прицельного знака, постоянно находящегося в центре экрана. Возможность перемещения изображения реализуется путем использования в составе прибора фотоприемника с заведомо большим, по сравнению с дисплеем, разрешением.

Ключевые слова: цифровой прицел, угол прицеливания, ввод поправок.

THE USE OF THE IMAGE SENSOR WITH EXCESS RESOLUTION AS A COMPONENT OF THE DIGITAL SIGHT

Alexandr A. Golitsyn

Design and Technology Institute of Applied Microelectronics (Branch of The Institute of Semiconductor Physics), 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 Lavrentev av., electronic engineer, tel. (383)330-91-88, e-mail: aag-09@yandex.ru

The article describes the way of making the amendments while shooting with digital sight by moving the image on the sight's screen with fixed reticle in the screen center. The feature is implemented by using as a part of the device the image sensor with the resolution obviously higher than the display's one.

Key words: digital sight, angle of sighting, reticle adjustment.

Цифровой прицел – это устройство, предназначенное для наведения оружия на цель, принцип действия которого основан на преобразовании оптического изображения в электрические сигналы, их преобразованием и отображением на дисплее. Конструктивно он напоминает собой цифровую видеокамеру и отличается от нее наличием крепления к оружию, наличием встроенной в изображение прицельной шкалы и устойчивостью к ударным нагрузкам. Устойчивость к ударным нагрузкам позволяет прибору не выходить из строя в процессе стрельбы, а также обладать свойством «несбиваемости» – расположение и ориентация объектива и фотоприемника прибора относительно оружия после выстрела не изменяются [1].

При разработке цифрового прицела одной из задач является выбор фотоприемного устройства. Помимо очевидных характеристик, таких как чувствительность, кадровая частота, рабочий температурный диапазон, энергопотребление, тип фотоприемника (ПЗС или КМОП) важной характеристикой в процессе выбора конкретного фотоприемника является его разрешение. Для запол-

нения всего поля зрения на дисплее прибора разрешение фотоприемника должно быть не меньшим, чем разрешение дисплея. В противном случае необходимо будет прибегнуть либо к электронному масштабированию изображения, либо изображением сцены на дисплее будет заполнена не вся область. Типовым разрешением современных микромониторов является разрешение 800×600 элементов [2, 3], следовательно, для заполнения всего поля на дисплее разрешение фотоприемника должно быть не менее 800×600 . При использовании фотоприемника с большим разрешением, чем 800×600 на дисплее отображается не полный кадр изображения, а его фрагмент.

Наличие некоторого запаса по разрешению изображения, полученного фотоприемником, позволяет осуществлять смещение изображения относительно центральной точки дисплея. Применительно к цифровым прицелам на экран прибора изображение может выводиться таким образом, чтобы точка прицеливания большую часть времени использования прицела находилась в центре экрана (рис. 1), то есть при изменении точки прицеливания на дисплее осуществлялось не смещение прицельной шкалы относительно изображения, а наоборот смещение изображения относительно прицельного знака.

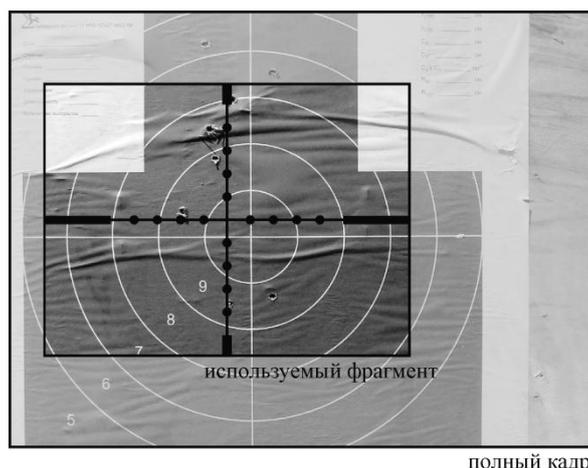


Рис. 1. Выбор фрагмента из изображения форматом 1280×960 для передачи на дисплей разрешением 800×600

Одна из причин смещения точки прицеливания относительно получаемого изображения обусловлена необходимостью выверки прицела на конкретном оружии [4]. Другая причина заключается в необходимости ввода поправок при стрельбе. При стрельбе на большие расстояния оружию могут потребоваться относительно большие углы прицеливания, особенно это касается оружия, предназначенного для стрельбы патронами с дозвуковой скоростью, пули которых имеют достаточно крутую траекторию полета. При больших углах прицеливания, прицельная марка в классических прицелах смещается вниз относительно наблюдаемого изображения, соответственно, при наведении марки на цель верхняя часть поля зрения прибора оказывается занятой изображением неба, а интересующие стрелка объекты и потенциальные цели, находящиеся ниже точки прицеливания, оказываются за пределами поля зрения. Смещение

же изображения вместо смещения прицельной шкалы позволяет потенциальным целям оставаться в пределах поля зрения, и таким образом, повышается информативность изображения на мониторе прибора. Схематично процесс прицеливания изображен на рис. 2.

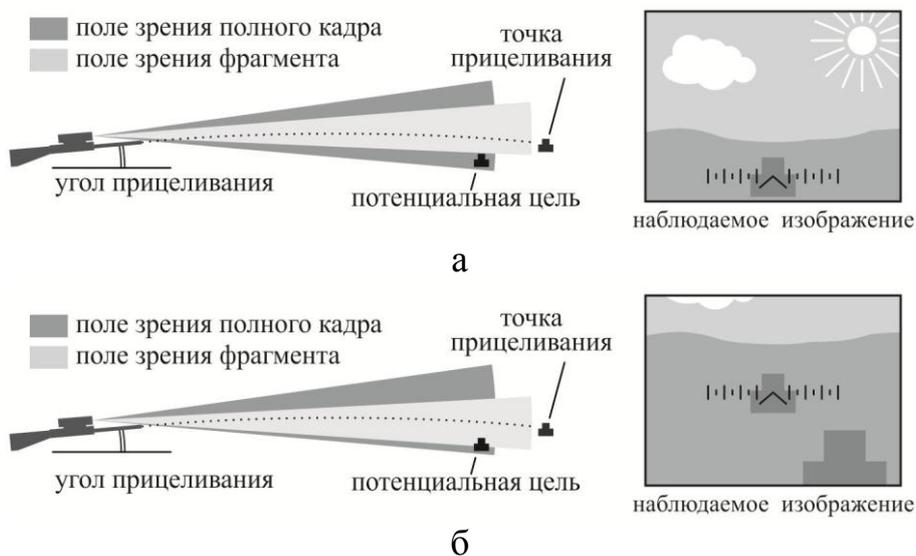


Рис. 2. Схематичное изображение процесса прицеливания:

- а) смещением прицельной шкалы – верхняя часть поля зрения не используется;
- б) смещение изображения – в нижней части поля зрения появляются ранее не видимые объекты, являющиеся потенциальными целями

Справедливый вопрос: каково должно быть разрешение фотоприемной матрицы, чтобы учесть все допустимые смещения точки прицеливания? Например, если прицел предназначен для использования на винтовке ВСС, то его угловое поле зрения по вертикали Ω по должно быть 6° – по аналогии с угловым полем зрения прицела ПСО-1 [5], угол прицеливания $\Omega_{\text{приц}}$ для винтовки ВСС составляет примерно от $0,1^\circ$ до $1,9^\circ$ при стрельбе на расстояния от 100 до 400 метров (данные получены расчетом, исходя из начальных скоростей пуль для патронов СП-5 и СП-6), а смещение прицельной шкалы $\Omega_{\text{выверки}}$ при выверке прицела на конкретной винтовке в угловых размерах примем равным $\pm 0,6^\circ$ или 10 тысячных дальности, что является наиболее распространенным диапазоном выверки линии прицеливания для оптических прицелов российского и зарубежного производства (диапазон выверки для прицела ПСО-1 составляет ± 8 тысячных [5]). Отсюда следует, что суммарный запас смещения прицельного знака относительно изображения должен составлять

$$\Omega_{\text{смещ}} = \Omega_{\text{приц}} + 2 \cdot \Omega_{\text{выверки}} = 1,9^\circ + 2 \cdot 0,6^\circ = 3,1^\circ, \quad (1)$$

а общее угловое поле зрения фотоприемной матрицы по вертикали должно быть равным

$$\Omega_{\text{общ}} = \Omega + \Omega_{\text{смещ}} = 6^\circ + 3,1^\circ = 9,1^\circ. \quad (2)$$

Разрешение фотоприемника по вертикали должно быть в $\Omega_{\text{общ}}/\Omega$ раз большим, чем соответствующее разрешение дисплея. Численно это значение равно

$$Y = 600 \cdot 9,1^\circ / 6,0^\circ = 910 \text{ [пикселей]} \quad (3)$$

Аналогично рассчитывается необходимое горизонтальное разрешение фотоприемной матрицы исходя из величины горизонтального смещения линии прицеливания при выверке и угловой величины боковых поправок.

Ближайшим типовым разрешением фотоприемников для вертикального размера более 910 элементов является разрешение 1280×960, таким разрешением обладают многие фотоприемники, например, ПЗС-фотоприемники серии ICX445 производства Sony.

Таким образом, при проектировании цифрового прицела на этапе разработки принципиальной схемы и выбора фотоприемника не следует ограничиваться разрешением дисплея. Более целесообразным является выбор фотоприемной матрицы с избыточным разрешением, дающим возможность реализовать метод пристрелки и ввода поправок в прицельный знак с неподвижной относительно центра поля зрения прибора прицельной шкалой. Численное значение разрешения может быть рассчитано по аналогии с приведенным в работе примером.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голицын А. А. Преимущества и недостатки цифровых прицелов для стрелкового оружия // Спецтехника и связь. – 2012. – №5-6. – С.14–18.
2. SVGA+ Rev3 XL Series Active Matrix OLED Microdisplay. User's Specification. Rev. 4 – USA: eMagin Corporation, 2010. – 46 p.
3. SVGA060 Series Low-Power AMOLED Microdisplay. Data Sheet / Olightek Opto-Electronic Technology Co., LTD [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.highnessmicro.com/lcdpanelspdf/SVGA060.pdf>.
4. Выверка прицелов, проверка боя и приведение к нормальному бою артиллерийского вооружения. Учебно-методическое пособие / Под общ. ред. В.Г. Сикерина [и др.] – Пермь: Звезда, 2001. – 69 с.
5. Изделие ПСО-1С (индекс 6Ц1С). Техническое описание и инструкция по эксплуатации. АЛЗ.812.000-01 ТО – Новосибирск: НПЗ, 1990. – 42 с.

© А. А. Голицын, 2016

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Геннадий Александрович Сырецкий

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования технологических машин; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

Представлено современное состояние в области искусственного интеллекта. Показаны направления и прогнозы развития искусственного интеллекта с учетом развития Интернета вещей. Отражена роль информационной безопасности в условиях современного прогресса техники и технологий.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационная безопасность, киберфизические системы, умные взаимодействующие изделия, Интернет вещей, форсайт, Нейронет.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INFORMATION SECURITY: THE PRESENT AND THE FUTURE

Gennady A. Syretsky

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, Prospekt K. Marksa, candidate of technical Sciences, associate Professor of engineering machinery industry; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo Str., candidate of technical Sciences, Associate Professor, Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (913)896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

Presented by the current state in the field of artificial intelligence. Showing trends and development forecasts of AI, taking into account the development of Internet of things. It reflects the role of information security in today's technological progress and technology.

Key words: artificial intelligence, information security, cyber physical systems, smart-connected-products, the Internet of Things, foresight, NeuroNet.

Сегодня в передовых странах мира возникли предпосылки для перехода на новый, шестой технологический уклад. Предполагается, что в его основе будут превалировать конвергентные науки и технологии. В списке прогноза составляющих нового технологического уклада содержатся, в частности, технологии, связанные с наноразмерными (10^{-9} м) структурами живого происхождения, неживой и гибридной природы, фемтосекундными (10^{-15} с) процессами, как *искусственный интеллект, робототехника* (одно из направлений современной мехатроники), технологии биотехнологизации и интеллектуализации мехатроники), программная системная инженерии, лазерная техника и энергосбережение.

Совершенствование как существующих (рис. 1), так и формирование новых подходов, парадигм и алгоритмов (методов) искусственного интеллекта находится в неразрывной связи с научно-техническим прогрессом. В нынешних

условиях мегатрендом развития научно-технического процесса является и новая волна индустриализации промышленности, в том числе затрагивающая и оптическое приборостроение: в Европе — четвертая промышленная революция, Industry 4.0 (<http://www.plattform-i40.de>), в США — Re-industrialization и в Японии — Industrial Intelligence (интеллектуальная, умная индустрия).

МУЛЬТАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ И СООБЩЕСТВА											
АВТОНОМНЫЕ		РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ		КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ			КВАНТОВЫЕ АЛГОРИТМЫ				
СТАТИЧЕСКИЕ		ДИНАМИЧЕСКИЕ		ДРОБНОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ			ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ				
ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ				ТЕОРИЯ ХАОСА СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЦЕПНЫЕ ДРОБИ			АЛГОРИТМЫ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ НЕЖИВОЙ ПРИРОДОЙ УМНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОИСКА ЭМ ПОИСКА		КУЛЬТУРНЫЙ МЕМЕНТИЧЕСКИЙ МИГРАЦИОННЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ РАЗУМА		ИСКУССТВЕННАЯ ЖИЗНЬ
МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ		НЕФОРМАЛЬНЫЕ		ПРОДУКЦИОННЫЕ		СЕМАНТИЧЕСКИЕ		ФРЕЙМОВЫЕ		ИСКУССТВЕННАЯ ЖИЗНЬ	
ФОРМАЛЬНЫЕ		ИСЧИСЛЕНИЯ ВЫСКАЗЫВАНИЙ		ИСЧИСЛЕНИЯ ПРЕДИКАТОВ ПЕРВОГО ПОРЯДКА		ИСЧИСЛЕНИЯ ПРЕДИКАТОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА		ИСЧИСЛЕНИЯ ВЫСКАЗЫВАНИЙ		ИСКУССТВЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ	
АБДУКТИВНАЯ		ДЕДУКТИВНАЯ		ИДУКТИВНАЯ		СХЕМЫ РАССУЖДЕНИЙ		НЕЙРОВЫЧИСЛЕНИЯ		ДНК-ВЫЧИСЛЕНИЯ	
ФИЗИЧЕСКАЯ СИМВОЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА				ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ							
ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ											
КОЛОНЧАТАЯ ЗРИТЕЛЬНАЯ КОРА ГОЛОВНОГО МОЗГА											
ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВ "ПАМЯТЬ ПРОГНОЗ"				ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ							

Рис. 1. Современные аспекты искусственного интеллекта

Движущей силой новой волны индустриализации становятся, прежде всего, новые технологии виртуализации, всепроникающий Интернет, поддерживающий уже сегодня информационный обмен по сетевому протоколу IPv6, киберфизические системы (англ. Cyber Physical Systems, CPS) («умные системы, охватывающие вычислительные (т.е. аппаратное и программное обеспечение) и эффективно интегрируемые физические компоненты, которые тесно взаимодействуют между собой, чтобы чувствовать изменения состояния реального мира») (<http://www.nist.gov>), или умные системы (англ. Smart Systems, SS) и умные, взаимодействующие по сети изделия (рис. 2), а также разнообразные интеллектуальные и неинтеллектуальные автоматизированные системы, комплексы и информационно-коммуникационные технологии нового поколения на базе конвергенции.

Ныне аналитики данных, работающие в области промышленности, определили для использования пятиуровневую архитектуру группировки задач, связанных с киберфизическими системами промышленного назначения (<http://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturingsystems/>)

1. Connection Level (уровень соединения умных полевых технических средств).

2. Conversion Level (уровень преобразования данных полевых устройств посредством базовых приложений).

3. Cyber Level (кибер-уровень. Ориентирован на концентрацию информации и ее комплексную обработку. Это уровень обработки информации в облаке).

4. Cognition Level (когнитивный уровень. В нынешних условиях это уровень диагностики, прогноза и предупреждения аварийных ситуаций).

5. Configuration Level (уровень конфигурирования: самоконфигурирования с целью поддержания устойчивости (self-configuration for resilience); самонастройки при изменении условий работы (self-adjust for variation); самооптимизации при возникновении неисправностей (self-optimize for disturbance).



Рис. 2. Умные, взаимодействующие по сети изделия с позиции компании PTC (<https://www.ptc.com/>):

а — функциональные уровни зрелости; б — категории возможностей

Очередной эволюционный этап интеграции и виртуализации реализует, в том числе, концепции, инфраструктуры и инструменты виртуальных сред (англ. Virtual Environments), облачных (англ. Cloud Computing) и туманных, или распыленных (англ. Fog Computing) вычислений («платформа с высоким уровнем виртуализации, предоставляющая вычислительные службы, службы хранения информации, а также сетевые службы между оконечными устройствами и центрами облачных вычислений, не обязательно расположенных на крайних уровнях сети». Концепция таких вычислений была предложена в 2012 году сотрудниками компании Cisco (<http://www.cisco.com>)), Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT) («глобальная инфраструктура информационного общества, обеспечивающая передовые услуги за счет организации связи между вещами (физическими или виртуальными) на основе существующих и развивающихся совместимых информационных и коммуникационных технологий») (<http://www.iot-a.eu/>), промышленного, промышленного Интернета (англ. Industrial Internet, II) (<http://www.iiconsortium.org/>), всеобъемлющего Интернета (Internet of Everything, IoE: объединение людей, физических устройств, процессов и данных), умных данных (англ. Smart Data), Умное всё (англ. Smart Anything) и больших данных (англ. Big Data). Кстати, промышленный Интернет — Интернет вещей, машин, компьютеров и людей, дающий возможность ускорено

выполнять на предприятии интеллектуальные операции для получения бизнес-результатов посредством инструментов расширенной аналитики данных (Industrial Internet Reference Architecture. – Industrial Internet Consortium, 2015. tech-arch.tr.001. Version 1.7).

Существуют различные взгляды к оценке развития научно-технического прогресса, среди них форсайт-проекты и дорожные карты. *Форсайт* — «система методов экспертной оценки стратегических направлений социально-экономического и инновационного развития, выявления технологических прорывов, способных оказать воздействие на экономику и общество в средне- и долгосрочной перспективе». В частности, к ним относятся прогнозы исследовательской и консалтинговая компаний Gartner, именуемые циклами зрелости технологий (Hype Cycle for Emerging Technologies). На рис. 3 приведена кривая цикла, отражающая прогноз 2015 года (<http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>).

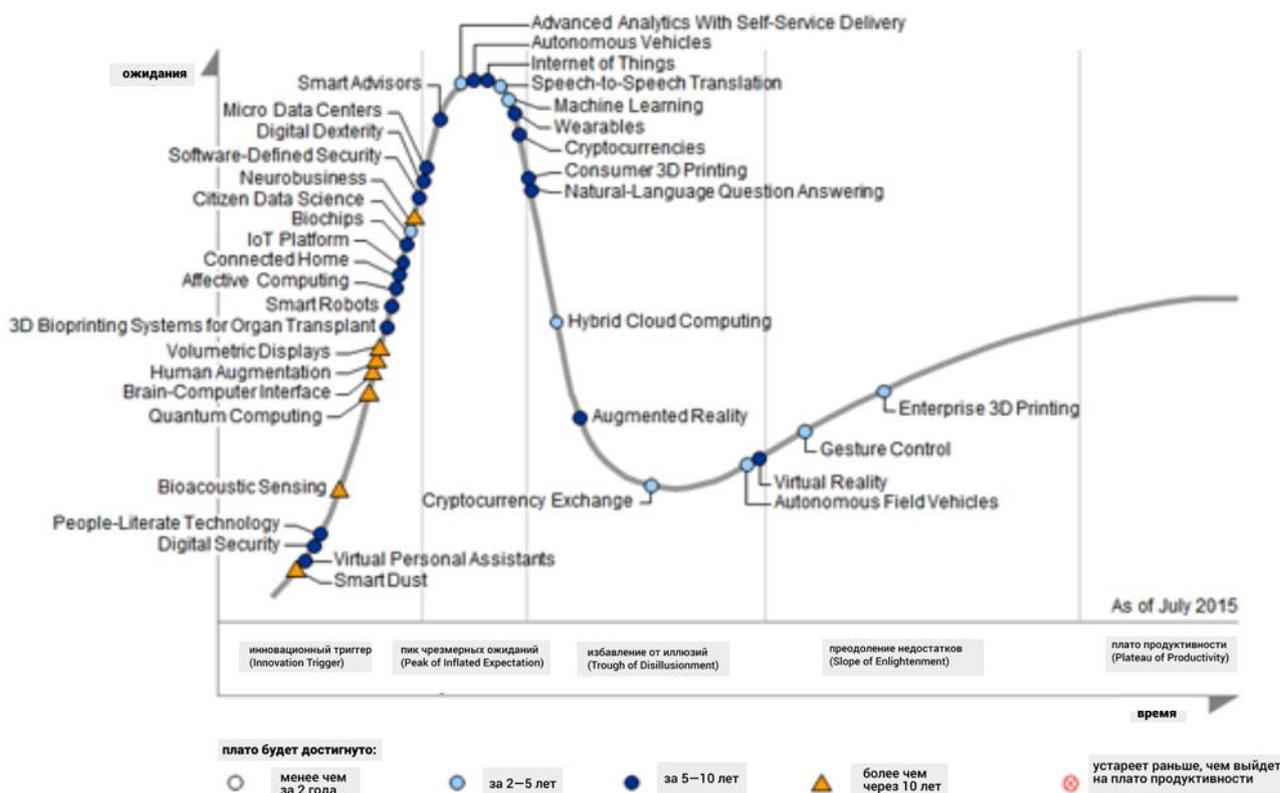


Рис. 3. Цикл зрелости новых технологий компании Gartner в 2015 году

Следует отметить, что в начале кривой зрелости отражается прогноз таких технологий, как умная пыль (Smart Dust – самоорганизующиеся микроскопические беспроводные устройства), цифровая безопасность (Digital Security), умные роботы (Smart Robots), платформы для Интернет вещей (IoT Platform), мысленно-компьютерный интерфейс (Brain-Computer Interface), эмоциональные вычисления (Affective Computing — определение эмоционального состоя-

ния человека по его лицу, жестикуляции и др. внешним проявлениям) и квантовые вычисления (Quantum Computing) и *нейробизнес* (Neurobusiness).

Одно из самых перспективных направлений научных исследований — создание интерфейса мозг-компьютер (Brain-computer Interface, BCI), являющегося отправной точкой для развития нейрокоммуникационных технологий разнообразных применений. Под BCI понимают создание технологии передачи информации напрямую из мозга в компьютер (дальнейшее логическое развитие этой технологии — передача сигнала из компьютера в мозг). Кроме того, сейчас пристальное внимание уделяется технологиям, которые способствуют возникновению и развитию Нейронет — Интернет для всех, в котором коммуникация и совместная деятельность осуществляется с использованием инструментов нейрокоммуникации. Ныне существуют различные дорожные карты его развития, как за рубежом, так и в России (рис. 4, 5).

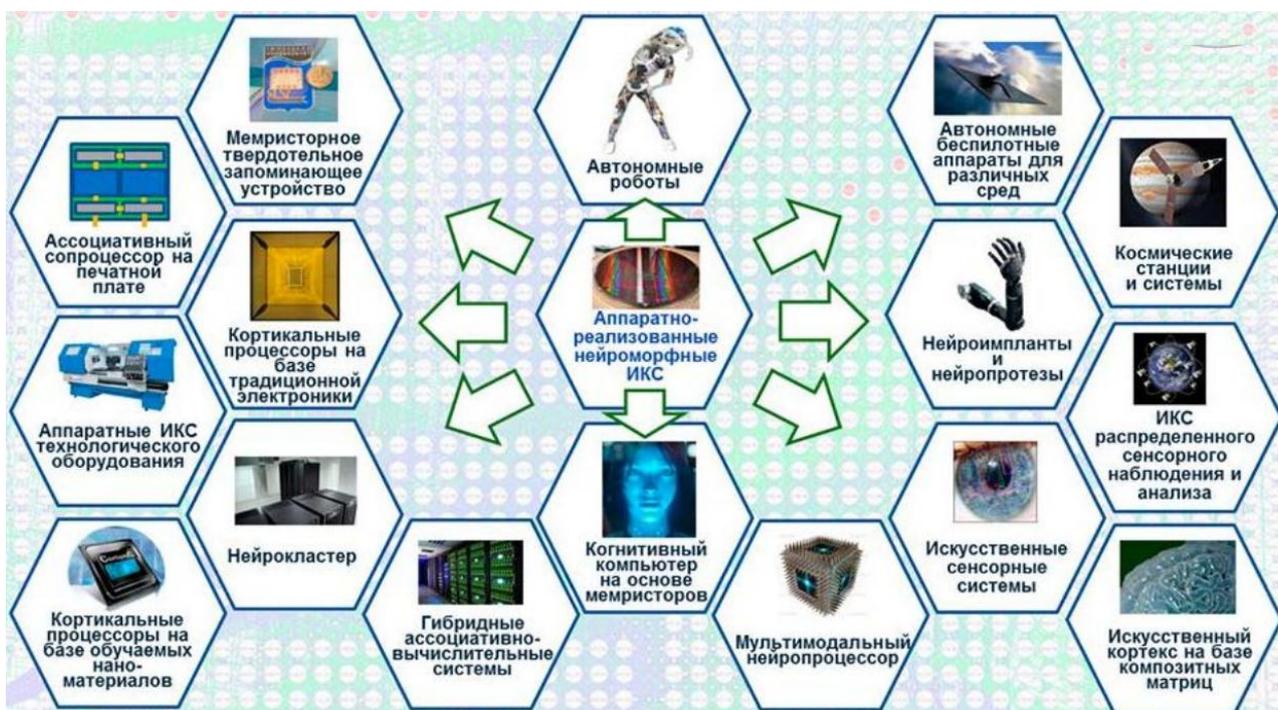


Рис. 4. Тренды Нейронет (заимствовано из материалов НИ РУССОФТ)



Рис. 5. Ключевые положения Российской национальной инициативы Co-Brain

Развитие всеобъемлющего Интернета и появление огромного числа беспроводных устройств разнообразного социального и промышленного назначения требует совершенствования существующих и создания новых технологий информационной безопасности.

© Г. А. Сырецкий, 2016

СИСТЕМНО-МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД КАК БАЗИС ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ И АВТОМАТИЗАЦИИ ЕГО ПРОЦЕССОВ

Геннадий Александрович Сырецкий

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования технологических машин; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

Приведено описание и изложены положения системно-ориентированного подхода для поддержки и автоматизации процессов жизненного цикла сложных изделий.

Ключевые слова: жизненный цикл, процесс, системно-ориентированный подход, модельно-ориентированное проектирование.

SYSTEM-MODEL APPROACH AS THE BASIS OF SUPPORT LIFE CYCLE OF PRODUCTS AND AUTOMATION ITS PROCESSES

Gennady A. Syretsky

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, Prospekt K. Marksa, candidate of technical Sciences, associate Professor of engineering machinery industry; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo Str., candidate of technical Sciences, Associate Professor, Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (913)896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

The description of the situation and sets out a system-oriented approach to support and automate the processes of complex product life cycle.

Key words: life cycle, process, system-oriented approach, model-based design.

Современный научно-технический прогресс, новая волна индустриализации промышленности (в Европе – четвертая промышленная революция, Industry 4.0 (<http://www.plattform-i40.de>), в США – Re-industrialization и в Японии – Industrial Intelligence (интеллектуальная, умная индустрия) и рынок диктуют промышленному сектору экономики создание в относительно короткое время конкурентно способных сложных изделий различного социального и специального назначения. Такого рода изделия – сложные интегрированные системы и гибко адаптируемые комплексы, которые могут эксплуатироваться в различных условиях, в том числе в динамически изменяемой среде, непредвиденных ситуациях и информационного риска.

Ныне непрерывно растет наукоемкость разрабатываемых изделий, сопровождаемая не пропорциональным увеличением ее стоимости, причем неоправданно высокими темпами. Решение данной проблемы может быть при использовании системно-ориентированного подхода, который способствует резкому снижению рисков. Естественно при наличии необходимых технологий, например, таких зарубежных компаний как Siemens, PTC и Dassault Systemes.

Создание сложных изделий возможно благодаря работе команды высококвалифицированных системных инженеров и эффективному функционированию цифрового предприятия, высокотехнологичных производств, в том числе ориентированных на потребителя. Системный инженер обладает компетенциями, позволяющими ему участвовать в полном жизненном цикле инженерного изделия, продукта (системы). Жизненный цикл (ЖЦ) – «эволюция системы, продукции, услуги, проекта или иного рукотворного объекта от замысла до прекращения использования» (ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2015). Системная инженерная деятельность предполагает использование передовых достижений зарубежных и отечественных разработчиков с целью выполнения работ для заинтересованных сторон (стейкхолдеров) в рамках обоснованно выбранной модели ЖЦ (согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010) – «структура процессов и действий, связанных с жизненным циклом, организуемых в стадии, которые также служат в качестве общей ссылки для установления связей и взаимопонимания сторон») как системы в целом, так и ее стадий (рис. 1).

Процесс	Определение выхода	Графическое представление	Описание	Пилотное внедрение	Использование и совершенствование	Ликвидация
Система	Идея	Разработка	Изготовление	Использование	Поддержка	Списание

Рис. 1. Примеры моделей ЖЦ (ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010)

Важной стадией ЖЦ продукции является проект – «уникальный процесс, состоящий из совокупности скоординированных и управляемых видов деятельности с начальной и конечной датами, предпринятый для достижения цели, соответствующей конкретным требованиям, включающий ограничения по срокам, стоимости и ресурсам» (ГОСТ Р ИСО 9000-2011), в том числе и инженерный проект (рис. 2).

Следует отметить, что в проекте наиважнейшая роль принадлежит этапу формирования требований, в большей степени определяющему успех проекта. Требование – «потребность или ожидание, которое установлено, обычно предполагается или является обязательным» (ГОСТ Р ИСО 9000-2011). Требования определяют те потребности заинтересованных сторон, которые являются для них необходимыми, а также тот функционал, которым система должна впоследствии обладать, чтобы удовлетворить эти потребности. Они служат базой для большинства процессов, фаз проекта (рис. 3).

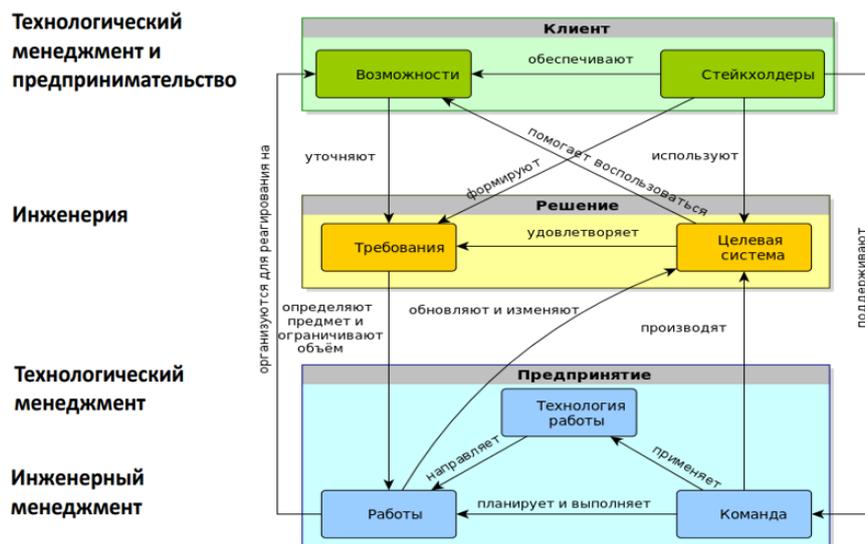


Рис. 2. Системная схема инженерного проекта согласно стандарту OMG Essence

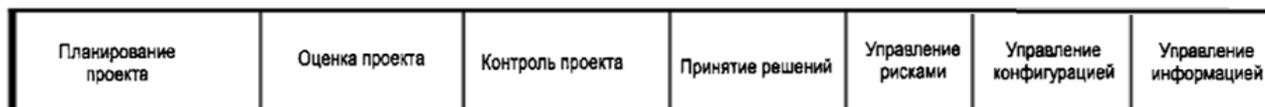


Рис. 3. Процессы проекта согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010

Кстати, требования есть основа начала технических процессов предприятия (рис. 4). Без требований не возможна организация приемочного тестирования (в соответствии с ГОСТ Р 51904 — «процесс выполнения системы или компонента системы в целях проверки того, что она/он удовлетворяет заданным требованиям, и обнаружения ошибок») и согласований, компромиссов (компромисс по ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288 — «действия по принятию решений, в ходе которых производится выбор из различных требований и альтернативных решений на основе конечной выгоды правообладателей»). Это означает, что «в проекте должна предусматриваться обратная связь от проанализированных требований к соответствующим правообладателям для гарантии того, что их потребности и ожидания были правильно зафиксированы и выражены» (ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010)).



Рис. 4. Технические процессы предприятия по ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288

В обеспечении ЖЦ проекта важная роль принадлежит управлению проектом, под которым понимается «планирование, организация и контроль трудовых,

финансовых и материально-технических ресурсов проекта, направленные на эффективное достижение целей проекта» (ГОСТ Р 54869 –2011). Задачи управления проектами формулируются и решаются с учетом одной или нескольких стандартизованных методологий, поддерживаемых программным инструментарием, например, стандарта PMBoK (Project Management Body of Knowledge – свод знаний по управлению проектами), стандартов IPMA (International Project Management Association) и методологии MSF (Microsoft Solutions Framework – согласованный набор концепций, моделей и правил от Microsoft).

С позиций системной инженерии, системно-ориентированного подхода приемлемой становится реализация V-модели ЖЦ проекта либо ее расширенного варианта, охватывающего до-проектные и пост-проектные фазы. Благодаря системно-ориентированному и процессному (рис. 5) подходам, поддерживаемым современными технологиями, появляется возможность непрерывно проверять обеспечение заданных требований от концептуального прототипа до рабочей конструкторской и технологической документации, отказаться от множества опытных образцов или изделий-лабораторий. Последнее существенно может снизить финансовые затраты на проект.

Кроме того, реализация концепции индустриального Интернета вещей дает возможность отслеживать в режиме реального времени работу компонент эксплуатируемого сложного изделия и своевременно выявлять реальные ресурсные ограничения и вносить проектные изменения. В частности, такая концепция реализуется инструментальными средствами компании РТС.

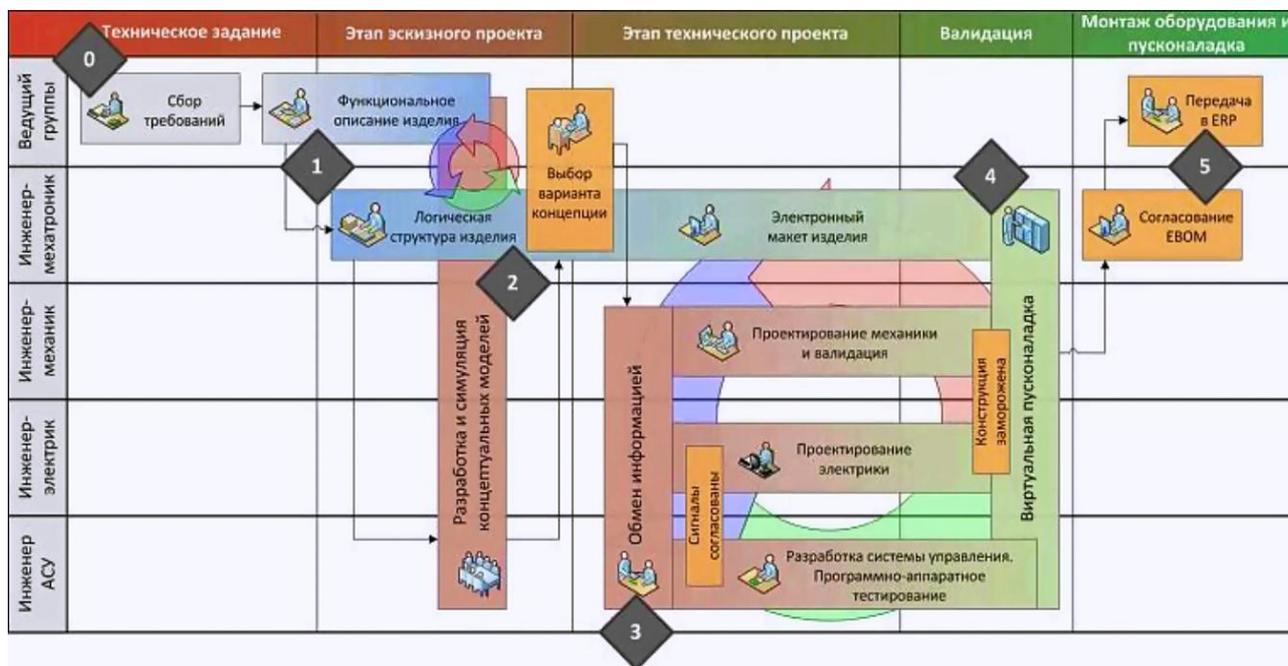


Рис. 5. Пример процессной разработки мехатронного изделия, начиная с эскизного этапа, с ориентацией на использование технологии NX Mechatronics Concept Designer компании Siemens

Базовые составляющие V-модели и инструменты их поддержки детально рассматриваются с учетом специфики, вносимой рядом компаний и их PLM-решений (рис. 6, 7).

Среди технологий модельно-ориентированного проектирования изделий различного назначения, включая встраиваемые, наиболее известны предлагаемые компаниями The MathWorks (MatLab&Simulink (рис.8)), PTC (Mathcad Prime), National Instruments (среда разработки LabVIEW для тестирования, измерений и управления), Maplesoft (Maple™ и MapleSim™ с опциональными модулями), и Wolfram Research (Wolfram Mathematica).

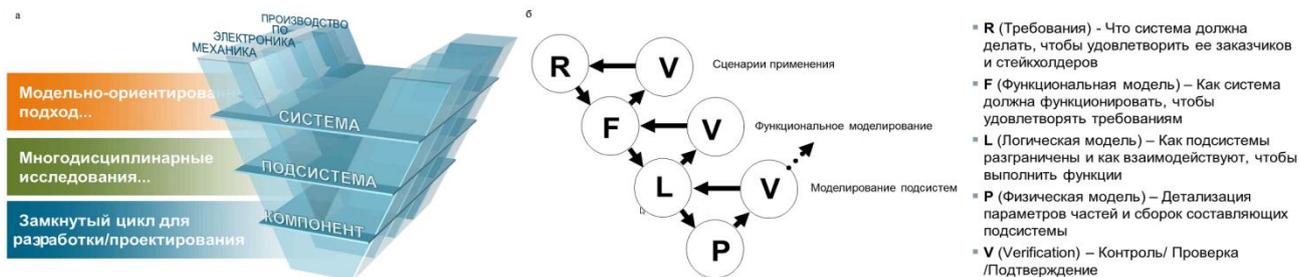


Рис. 6. Системно-ориентированная разработка продукта согласно концепции Siemens: а – обобщенное представление V-модели сложной системы; б – замкнутые циклы системного инжиниринга в RLFP процессе

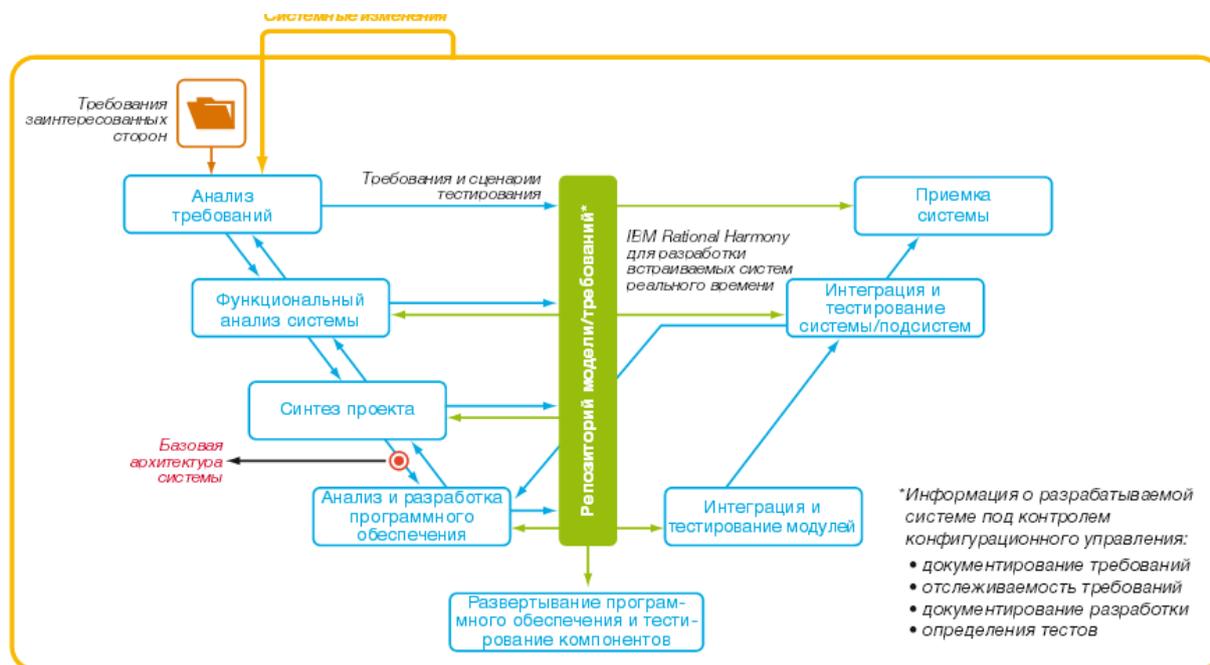
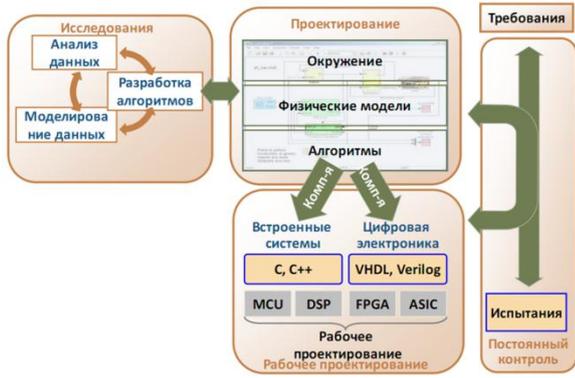


Рис. 7. V-модель системного инжиниринга компании IBM

Модельно-ориентированное проектирование



Физические системы в Simulink

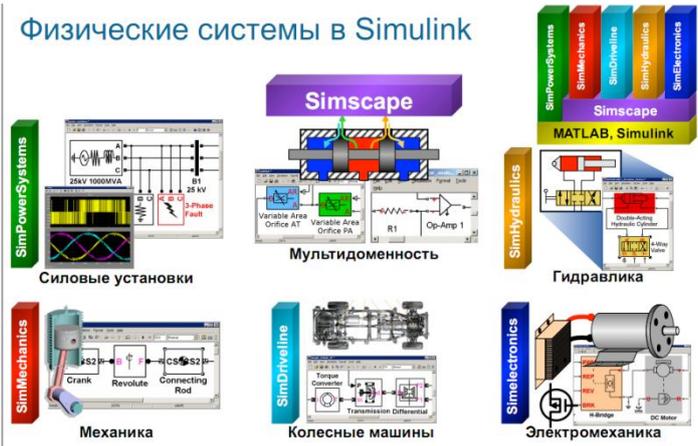


Рис. 8. Примеры технологического инструментария The MathWorks MatLab&Simulink

© Г. А. Сыреуцкий, 2016

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ РАЗБРАКОВКИ ТАБЛЕТОК КЕРАМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Дмитрий Геннадьевич Сырецкий

Публичное акционерное общество «Новосибирский завод химконцентратов», 630110, Россия, г. Новосибирск, ул. Б. Хмельницкого, 94, ведущий инженер, тел. (913)715-18-20, e-mail: dima_nstu@mail.ru

Геннадий Александрович Сырецкий

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования технологических машин; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

Петр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 633009, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Леонид Валентинович Финогенов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 633009, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)306-62-24, e-mail: finog@tdisie.nsc.ru

Евгений Владимирович Власов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 633009, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-24, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Алексей Вадимович Белобородов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 633009, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)306-59-40

Ян Викторович Килин

Акционерное общество «НЗХК-Инжиниринг», 630027, Россия, г. Новосибирск, ул. Б. Хмельницкого, 104, инженер, тел. (383)363-68-68 доб. 11-53, e-mail: k12989@mail.ru

Приведено описание и изложены принципы работы высокопроизводительного автоматизированного комплекса разбраковки керамических таблеток по поверхностным дефектам. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс, таблетка керамического ядерного топлива, опто-электронная разбраковка таблеток.

AUTOMATED COMPLEX OPTICAL-ELECTRONIC SORTING OF TABLETS CERAMIC NUCLEAR FUEL

Dmitriy G. Syretskiy

Novosibirsk Chemical Concentrates Plant (PJSC «NCCP»), 630110, Russia, Novosibirsk, 94 B. Khmelnitsky St., Engineer, tel. (913)715-18-20, e-mail: dima_nstu@mail.ru

Gennady A. Syretskiy

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, Prospekt K. Marksa, candidate of technical Sciences, associate Professor of engineering machinery industry; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo Str., candidate of technical Sciences, Associate Professor, Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (913)896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

Petr S. Zavyalov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 633009, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41, Ph. D., Laboratory head, tel. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Leonid V. Finogenov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 633009, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41, Ph. D., Senior scientist, tel. (383)306-62-24, e-mail: finog@tdisie.nsc.ru

Evgeny V. Vlasov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 633009, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41, Junior scientist, tel. (383)306-62-24, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Alexey V. Beloborodov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 633009, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41, lead coder, tel. (383)306-59-40

Yan V. Kilin

Stock company «NCCP-Engineering», 630027, Russia, Novosibirsk, 104 B. Khmel'nitsky St., Engineer, tel. (383)363-68-68 add: 11-53, e-mail: k12989@mail.ru

The description and principles of operation of high-performance automated grading of ceramic tablets of the surface defects. The results of experimental research.

Key words: automated complex, tablet ceramic nuclear fuel, opto-electronic grading pills.

В условиях дефицита природных энергоресурсов важное значение придается развитию ядерной энергетики. В ядерных реакторах используется ядерное топливо в виде таблеток, располагаемых в герметично закрытых тепловыделяющих элементах. По многим соображениям, в том числе и безопасности, производство и использование ядерного топлива требует соблюдения множества специальных мер как технического, так и организационного характера, а также привлечения квалифицированного персонала. Снижение уровня опасности и специальных требований может быть достигнуто за счет автоматизации технологических процессов, в их числе, и процессов контроля дефектов боковой и торцевой поверхностей таблеток керамического ядерного топлива и разбраковки их по внешнему виду (рис. 1).

Статья посвящена рассмотрению автоматизированного комплекса, ориентированного на оптико-электронную разбраковку таблеток керамического ядерного топлива (рис. 2).

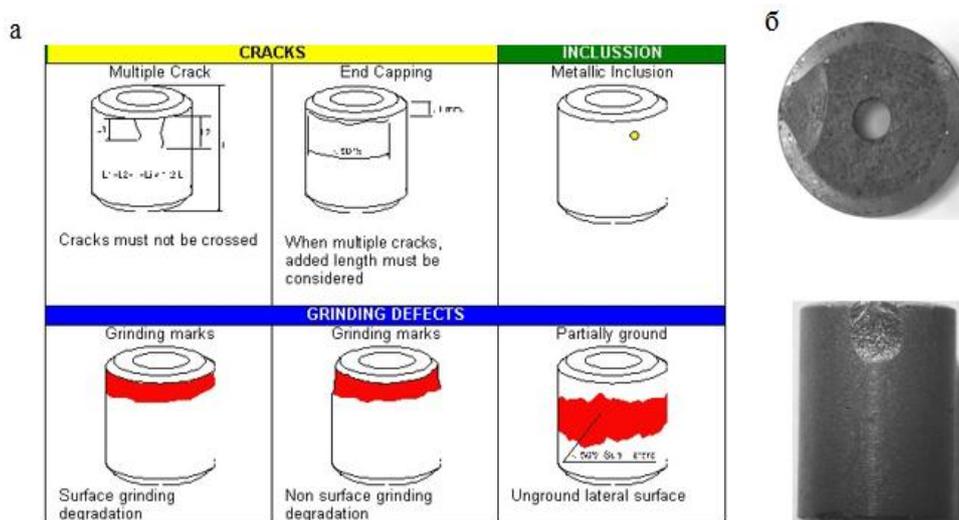


Рис. 1. Примеры дефектов таблеток:
 а — по атласу допустимых отклонений; б — реальных

Целями создания данного комплекса послужила необходимость:

- снизить влияние субъективного фактора (уменьшить вероятность попадания бракованных таблеток в годные);
- отказаться на опасном для здоровья производстве от утомительного труда контролеров визуального осмотра;
- повысить производительность труда;
- уменьшить себестоимость;
- беспрепятственного перехода на разбраковку таблеток более обогащенного топлива.

С учетом поставленных целей были сформулированы требования к комплексу и необходимые для их воплощения задачи, наиважнейшие из которых обсуждаются в докладе.

В настоящее время комплекс находится в стадии опытной эксплуатации в Публичном акционерном обществе «Новосибирский завод химконцентратов» (ПАО «НЗХК»).

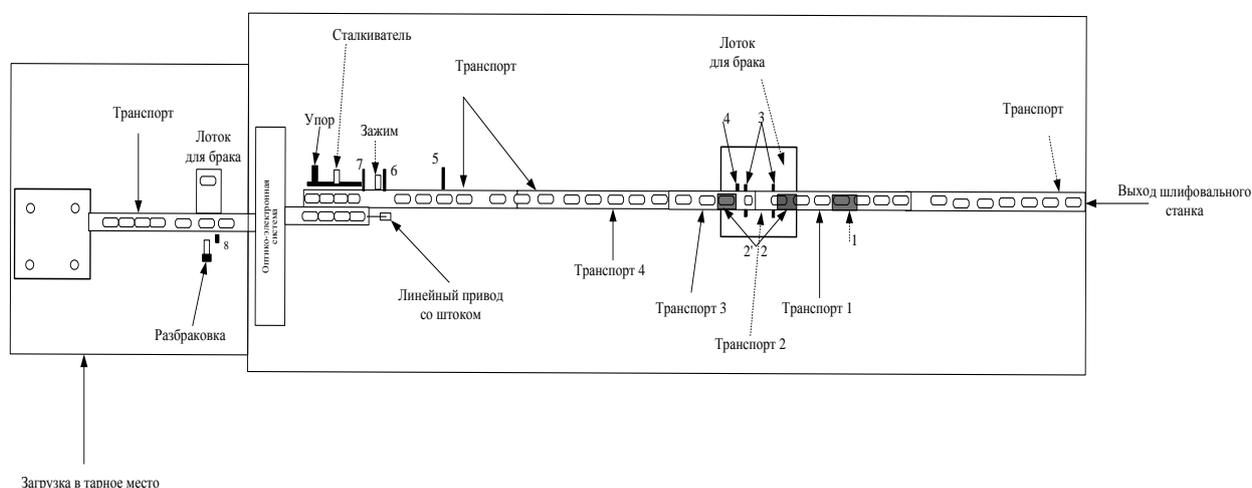


Рис. 2. Структурная схема автоматизированного комплекса

На рис. 3 приведены оптические схемы формирования изображений, реализованные в оптико-электронной системе комплекса. Для уменьшения габаритов системы в направлении движения топливных таблеток в спецобъективе 1, формирующем изображения боковой поверхности таблетки, использованы линзы с обрезанными краями.

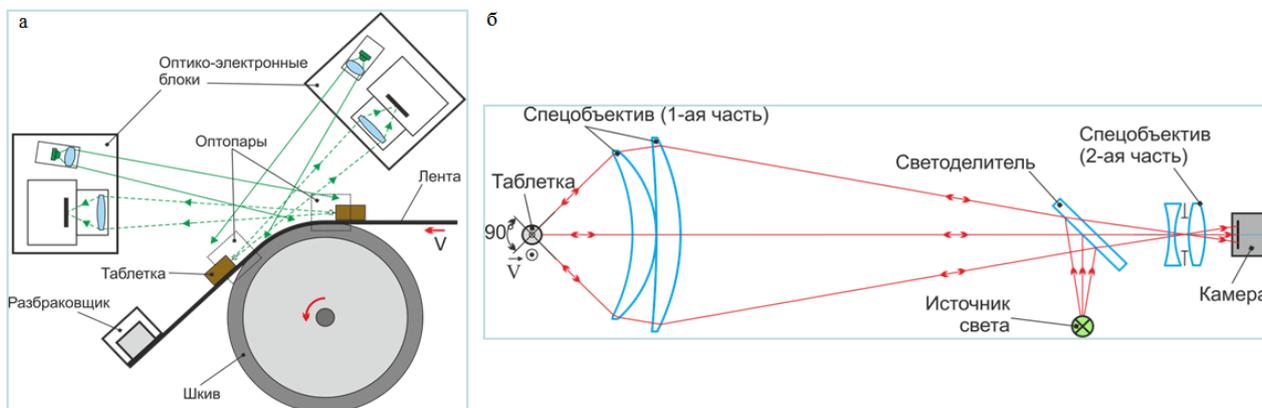


Рис. 3. Оптические схемы формирования изображений:
а – торца; б — боковой поверхности

Позиции комплекса, на которых выполняется контроль внешнего вида таблеток по торцевой и боковой поверхностям, показаны на рис. 4.

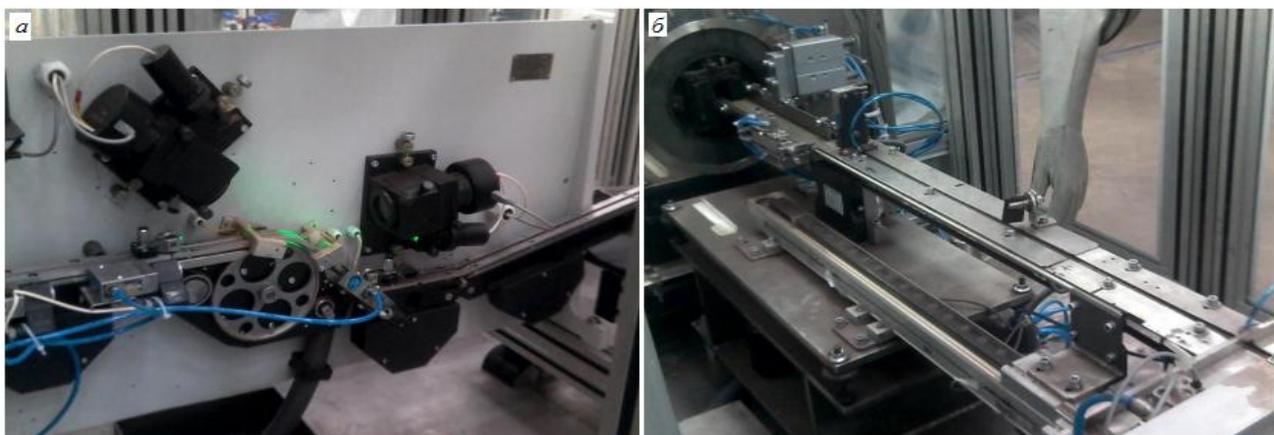


Рис. 4. Позиция контроля внешнего вида таблеток: а – торцевая; б – боковая

Настройка параметров контроля поверхностей осуществляется посредством программного обеспечения, установленного на персональном компьютере комплекса. Пример вкладки настройки параметров боковой поверхности приведен на рис. 5. Комплект настроечных образцов (НО), ориентированный на обеспечение контроля боковой поверхности, приведён на рис. 6.

Результаты экспериментальных исследований оптико-электронной системы комплекса свидетельствуют о следующем.

1. Измерительный канал системы контроля внешнего вида боковой поверхности таблеток ядерного керамического топлива позволяет контролировать топливные таблетки диаметром (7, 54 – 7,80) мм и высотой (9 – 12) мм.

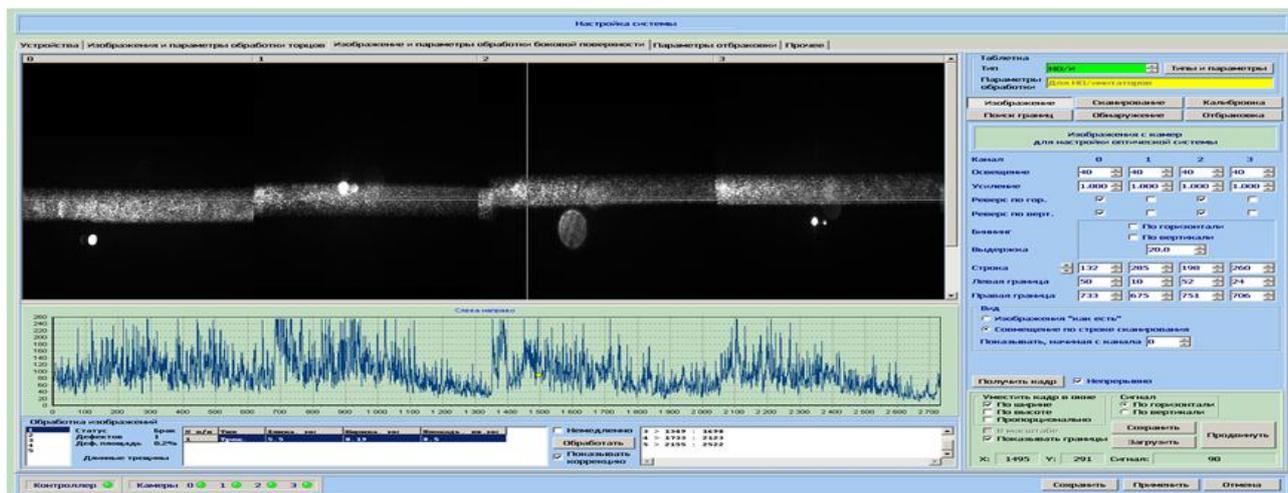


Рис. 5. Вкладка «Изображение и параметры обработки боковой поверхности»



- 1** - НО с недопустимым отклонением (трещина): длина 3,67 мм, ширина 0,40 мм;
- 2** - НО с допустимым отклонением (скол): площадь 7,02 мм²;
- 3** - НО с допустимым отклонением (трещина): длина 3,64 мм, ширина 0,24 мм;
- 4** - НО с недопустимым отклонением (трещина): длина 5,51 мм, ширина 0,19 мм;
- 5** - НО с недопустимым отклонением (скол): площадь 10,99 мм².

Рис. 6. Комплект настроечных образцов таблеток

2. Вероятность выявления недопустимых отклонений искусственных дефектов типа «скол» $S = 10,99 \text{ мм}^2$, «трещина» $L = 3,67 \text{ мм}$, $M = 0,40 \text{ мм}$, «трещина» $L = 5,51 \text{ мм}$, $M = 0,19 \text{ мм}$ составляет соответственно 1,0, 1,0 и 1,0.

Для дефекта типа «скол» $S = 7,02 \text{ мм}^2$ вероятность отнесения к допустимому отклонению составила 1,0. Для дефекта типа «трещина» $L = 3,64 \text{ мм}$, $M = 0,24 \text{ мм}$ вероятность отнесения к допустимому отклонению составила 0,35. Это вызвано тем, что ширина трещины $M = 0,24 \text{ мм}$ (паспортное значение) близка к границе максимально допустимого значения отклонения 0,3 мм.

3. Погрешность измерения:

– площади дефекта типа «скол» $S = 7,02 \text{ мм}^2$ составила $0,33 \text{ мм}^2$;

– площади дефекта типа «скол» $S = 10,99 \text{ мм}^2$ составила $1,04 \text{ мм}^2$;

– длины дефекта типа «трещина» $L = 3,64 \text{ мм}$ составила $0,40 \text{ мм}$, ширины $M=0,24 \text{ мм}$ составила $0,11 \text{ мм}$;

– длины дефекта типа «трещина» $L = 3,67 \text{ мм}$ составила $0,37 \text{ мм}$, ширины $M=0,40 \text{ мм}$ составила $0,14 \text{ мм}$;

– длины дефекта типа «трещина» $L = 5,51 \text{ мм}$ составила $0,46 \text{ мм}$, ширины $M=0,19 \text{ мм}$ составила $0,05 \text{ мм}$.

В заключение следует отметить, что посредством разработанного комплекса на этапе опытной эксплуатации

- удалось исключить субъективность оценки дефектов таблеток;
- уменьшить уровень опасности труда;
- обеспечить вероятность обнаружения дефектных таблеток не менее 95%;
- повысить скорость контроля до 10 таблеток/с и производительность труда на 10%;
- увеличить выход в годное на 1,5%;
- снизить себестоимость ~ 2-3%.

© Д. Г. Сырецкий, Г. А. Сырецкий, П. С. Завьялов,
Л. В. Финогенов, Е. В. Власов, А. В. Белобородов, Я. В. Килин, 2016

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ПРИЕМНИК ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Святослав Дмитриевич Иванов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, аспирант, тел. (383)330-79-86, e-mail: ivanow183@mail.ru

Эдуард Геннадьевич Косцов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор физико-математических наук, тел. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

Виктор Сергеевич Соболев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, тел. (383)333-28-39, e-mail: sobolev@iae.nsk.su

Рассматриваются характерные особенности регистрации коротковременных импульсов ИК-излучения с помощью приемников на основе тонких пироэлектрических пленок.

Ключевые слова: пироэлектричество, наносекундные импульсы, тонкая пленка, ИК-излучение, трансимпедансный усилитель.

FAST RESPONSE IR-RADIATION DETECTOR BASED ON PYROELECTRIC FILMS

Svyatoslav D. Ivanov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug ave. 1, Ph. D. student, tel. (383)330-79-86, e-mail: ivanow183@mail.ru

Eduard G. Kostsov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug ave. 1, Ph. D., tel. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

Victor S. Sobolev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug ave. 1, Ph. D., tel. (383)333-28-39, e-mail: sobolev@iae.nsk.su

This paper is devoted to the study of specific features of short pulse IR-radiation registration.

Key words: pyroelectricity, nanosecond pulses, thin film, IR-radiation, transimpedance amplifier.

В настоящее время для регистрации энергии ИК излучения наиболее широко применяются два класса тепловых приемников, болометрические и пироэлектрические. В первом из них с изменением температуры изменяется электрическое сопротивление, во втором случае имеет место чувствительность элемента не к значению температуры, а к скорости ее изменения.

Пироэлектрические элементы не требуют использования источников напряжения, поскольку сами в момент воздействия излучения, являются гене-

раторами тока. Это определяет и отсутствие шумов, характерных для болометров, и дает возможность оценивать предельную теоретическую чувствительность пироэлектрических элементов значительно выше, чем болометрических. В настоящее время производится несколько десятков типов одноэлементных пироэлектрических инфракрасных устройств, как отечественными, так и зарубежными фирмами.

Одноэлементные приемники основаны как на использование одного из лучших пироэлектрических материалов – керамики танталата лития LiTaO_3 , так и органических пироэлектриков. Они имеют обнаружительную способность, D^* , в частотном диапазоне 10 – 300 Гц, близкую к предельным для тепловых приемников с теоретическим значениям, до $2 \cdot 10^9 \text{ смHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$.

Известны экспериментальные работы, описывающие возможность регистрации коротких импульсов излучения, наносекундный диапазон, с использованием тонких монокристаллов LiTaO_3 или тонкой керамики, типа PZT, с толщиной 200 - 300 мкм. В то же время из общезначимых представлений следует, что с уменьшением толщины пироэлектрического слоя чувствительность приемника увеличивается.

Целью настоящей работы являлось исследование отклика тонкопленочного пироэлектрического приемника излучения на воздействие коротких импульсов излучения.

Объектом исследования были тонкопленочные структуры: электрод – пироэлектрический слой – электрод – подложка. Рассматривался случай, когда излучение поступает на поглощающий электрод в течение времени, t_p , импульс излучения, а на другой границе поддерживается постоянная температура.

Поток излучения $I(t)$ преобразуется в тепловой поток $\alpha I(t)$ (α – коэффициент поглощения излучения), который, проходя через поглощающий электрод с толщиной d_s , создает в пироэлектрике поток тепла F .

Для описания поведения пироэлектрического тока создана математическая модель распределения температуры, $T(x,t)$, в многослойных тонкопленочных структурах, включая пироэлектрическую пленку, когда энергия излучения выделяется во внешнем тонком электроде, расположенном на поверхности пироэлектрического слоя. Величина пироэлектрического тока, J_p , определяется как $J_p(t) = S\gamma \cdot d(T_{cp}(t))/dt$, где S – площадь электрода, T_{cp} – средняя по толщине пироэлектрика температура, γ – величина пироэлектрического коэффициента, его размерность $\text{Кл/м}^2\text{град}$. Очевидно, что чем тоньше пироэлектрический слой, тем больше величина $J_p(t)$ и величина удельного заряда генерируемого единицей энергии излучения, К/Дж .

Типичный характер изменения пироэлектрического тока J_p и T_{cp} , с уменьшением длительности излучения, t_p , следующий: быстрое первоначальное уменьшение величины $J_p(t)$, которое связано с уменьшением потока тепла на границе раздела электрод – пироэлектрик $\lambda_p dT/dx$ поскольку температура в первые моменты времени увеличивается именно в этой области, и чем меньше d_p тем быстрее уменьшается $\lambda_p dT/dx$.

Когда t_p больше времени тепловой релаксации пироэлектрической пленки d_p^2/χ_p (где χ_p – температуропроводность материала пироэлектрика), после окончания действия импульса происходит уменьшение T_{cp} , сопровождаемое проявлением тока противоположной полярности, при этом амплитуды токов, при нагреве и охлаждении образца близки.

С уменьшением t_p в первые моменты времени величина $J_p(t)$ практически не изменяется, но генерируемый заряд уменьшается. При дальнейшем уменьшении t_p эта закономерность сохраняется, но передний фронт импульса тока все в большей степени определяется толщиной поглощающего электрода, d_s , его тепловой емкостью, см. рис.1, на котором представлена чувствительность $J_p(t)$ к вариации d_s при действии на образец импульса излучения с $t_p = 0.5$ нс и $I(t) = 20$ Вт/м².

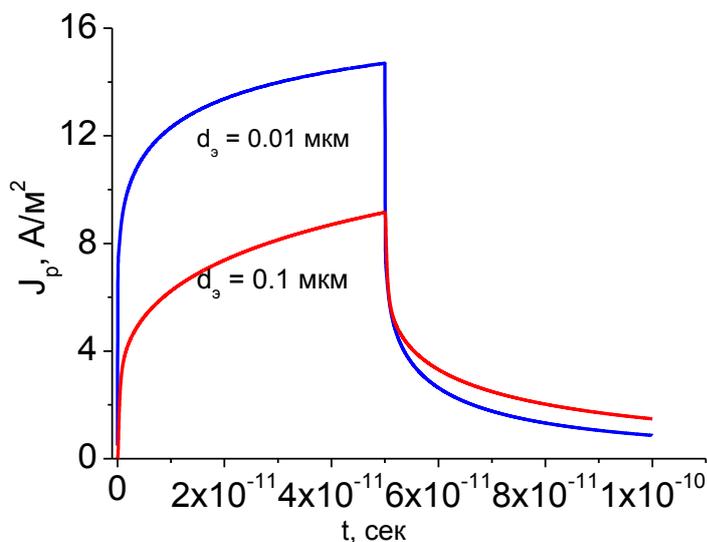


Рис. 1. Влияние толщины поглощающего электрода на $J_p(t)$

При воздействии на образец серии коротких импульсов излучения происходит постепенное установление равновесной температуры в объеме пироэлектрической пленки, в течении общего времени d_p^2/χ_p с перераспределением во времени соотношения положительного и отрицательного зарядов, генерируемых при каждом такте модуляции излучения, в установившемся режиме эти заряды равны (5 нс, энергия 10^{-8} Дж, заряд при величине $d_s = 0.01$ мкм составляет 7.35 К/Дж).

В рамках указанной модели следует, что минимальное время, $t_{мин}$, реакции образца на короткие импульсы излучения определяется временем тепловой релаксации поглощающего электрода, в первом приближении равной d_s^2/χ_s , где χ_s – температуропроводность его материала. Полагая что $d_s = 10^{-7}$ м, $\chi_s = 10^{-5}$ м²/сек, имеем $t_{мин} \approx 1$ нс, при $d_s = 10^{-7}$ м, $t_{мин} \approx 10$ пс.

Проведено экспериментальное исследование кратковременных пироэлектрических токов в тонкопленочных структурах: ИТО-SBN-Cr(Al). Пироэлектрические гетероэпитаксиальные пленки SBN ($Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb_2O_6$) с толщиной порядка 1 мкм, синтезированы на поверхности пленок ИТО, ($In_2O_3 + 10\% SnO_2$) или Pt,

расположенных на подложках кремния или сапфира. Монокристаллические пленки SBN, синтезированные на поверхности ИТО, имеют высокое значение пирозлектрического коэффициента до $8\text{--}20 \cdot 10^{-4}$ Кл/м², абсолютное значение которого определялось методом низкочастотной модуляции температуры [1- 3]. Величина диэлектрической проницаемости ϵ , достигает значений 1000–5000.

Цель исследований состояла в экспериментальном подтверждении возможности создания широкополосного по длинам волн быстродействующего пироприемника. Элемент облучался лазером, мощность которого модулировалась с изменением длительности и частоты импульсов излучения.

Как известно, для широкого круга пирозлектрических материалов – сегнетоэлектриков соотношение $\epsilon/\gamma^{0.5}$ является константой, (см., например, [4]), поэтому удельная емкость исследуемых структур, обладающих высоким значением ϵ , достаточно высока, до 10^{-3} Ф/м² и более. Площадь исследуемых элементов составляла $5 \cdot 10^{-7}$ м², их большая емкость накладывает определенные ограничения на точность оценки формы коротких импульсов пирозлектрического тока. Последний с помощью быстродействующего трансимпедансного усилителя линейно преобразовывался в напряжение, подаваемое на вход широкополосного цифрового осциллографа. Это давало возможность фиксировать форму и параметры пиротока. Основной узел измерительного стенда – трансимпедансный усилитель построен на двух широкополосных операционных усилителях с обратной связью по току типа AD-8001. Первый усилитель собран по схеме преобразователя ток/напряжение с сопротивлением обратной связи 1 кОм, а второй служит усилителем напряжения с коэффициентом усиления 10. Связь между выходным напряжением и пиротоком линейна $U \approx 5000 J_p$. Пироток в 1 мкА дает на выходе усилителя напряжение 5 мВ. Установлено, что частотная характеристика пироприемника простирается до 100 МГц, а длительность фронта импульса выходного напряжения при освещении лазерным импульсом составляет 50 нс. Применение преобразователя ток/напряжение позволяет существенно снизить влияние емкости пироэлемента, поскольку входное сопротивление такого преобразователя очень низкое, оно равно сопротивлению входного транзистора, деленному на коэффициент усиления операционного усилителя. Если, например, входное сопротивление транзистора равно 10 кОм, а коэффициент усиления усилителя реально составляет 10000, то входное сопротивление составит порядка 1 Ом.

Типичные примеры поведения пирозлектрического тока в многослойной структуре, при толщине пирозлектрической пленки 1.25 мкм, представлены на рис.3, где верхние желтые кривые – импульсы излучения, нижние синие – пирозлектрический ток, поглощающий электрод - пленка Cr, с толщиной 0.1 мкм, сопротивление нагрузки 4.7 кОм, площадь образца 10^{-7} м², $I = 10^3$ Вт/м².

Анализ экспериментальных данных дает возможность утверждать, что поведение пирозлектрического тока в исследуемых структурах достаточно точно соответствует созданной теоретической модели распределения температуры в многослойной тонкопленочной структуре, включая пирозлектрик, когда энер-

гия излучения выделяется во внешнем тонком электроде, расположенном на поверхности пироэлектрического слоя. Установлено, что максимальная величина генерируемого заряда энергией, поступающей на образец за каждый такт, длительность которого меньше времени перемещения тепловым фронтом межэлектродного расстояния вне зависимости от площади электродов и длительности импульсов излучения, составляет $1-4 \cdot 10^{-3}$ Кл/Дж. Эта цифра при указанных значениях γ и d_p соответствует теоретически возможной величине.

Проведенные исследования показали, что основе описанных тонкопленочных структур может быть создано новое семейство высокочувствительных быстродействующих неохлаждаемых тепловизионных устройств [5].

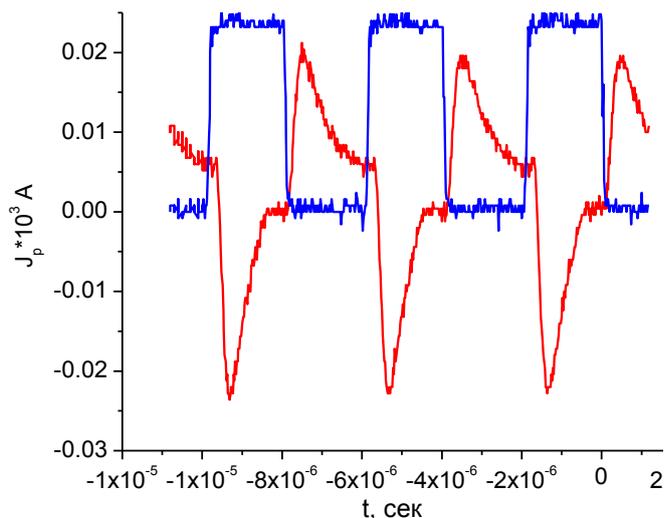
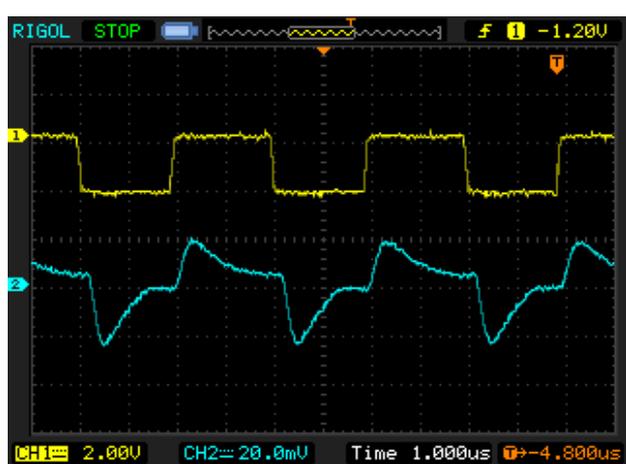


Рис. 2. а) Пироэлектрический ток в пленках SBN. б) – оцифровка пироэлектрического тока и импульсов излучения

Заключение

Показана возможность создания нового поколения быстродействующих детекторов инфракрасных излучений с полосой пропускания до 100 МГц и более.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анцыгин В.Д., Косцов Э.Г., Соколов А.А. Пироэлектричество в тонких сегнетоэлектрических пленках // Автометрия. -1986. - № 2. С. 30 - 40.
2. Косцов Э.Г. Микроэлектронные тепловизионные системы на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Микроэлектроника, 1996, №3, С. 177 -186.
3. Kostsov E.G. Ferroelectric barium-strontium niobate films and multi-layer structures // Ferroelectrics, 2005, 314, pp.169-187.
4. Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением // Москва «Наука», 1982 г.
5. Иванов С.Д., Косцов Э.Г. Тепловые приемники неохлаждаемых многомерных тепловизионных матриц, Часть 2. Новые, не теплоизолированные элементы // Автометрия, 2016, №1, С. 104-115.

© С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов, В. С. Соболев, 2016

ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ СОВРЕМЕННЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Юрий Александрович Трясов

АО «Швабе – Оборона и Защита», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179а, зам. генерального директора, e-mail: npzkanc@ponpz.ru

Игорь Борисович Южик

АО «Швабе – Оборона и Защита», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179а, ведущий конструктор, e-mail: npzkanc@ponpz.ru

Приоритетное направление деятельности предприятий АО «Швабе – Приборы» и АО «Швабе – Оборона и Защита» – освоение базовых прорывных технологий и производство ключевых элементов современной оптоэлектронной техники на уровне лучших мировых образцов. Эти результаты оказалось возможным достигнуть только с использованием импортных комплектующих элементов. Программа импортозамещения в сегодняшних условиях становится государственной и признана стать ключевым фактором повышения устойчивости страны к внешнему воздействию и защиты ее безопасности. В связи с мерами принятыми правительством России в части импортозамещения в настоящее время на Российском рынке электронных компонентов произошли положительные сдвиги.

Ключевые слова: оптоэлектронные приборы, цифровой импульсный ЭОП, модуль тепловизионный, импортозамещение, спектральный диапазон.

THE PROBLEM OF IMPORT SUBSTITUTION IN THE DESIGN AND PRODUCTION OF MODERN OPTO-ELECTRONIC COMPLEXES

Yuri A. Trjasov

Joint-stock company «Shvabe – Defense and Protection», 630049, Russia, Novosibirsk, street Dusy Kovalchuk, 179a, deputy general director, e-mail: npzkanc@ponpz.ru

Igor B. Juzhik

Joint-stock company «Shvabe – Defense and Protection», 630049, Russia, Novosibirsk, street Dusy Kovalchuk, 179a, leading engineer, e-mail: npzkanc@ponpz.ru

Priority direction of activity of the enterprises of joint-stock company «Shvabe – Devices» and joint-stock company «Shvabe – Defense and Protection» – development base technologies and manufacture of key elements modern electronictechnicsat a level of the best world samples. These results it has appeared possible to reachonly with use of import completing elements. The program import of replacement in today's conditions becomes state and is recognized to become the key factor of increase of stability of the country to external influence and protection of its safety. In connection with measures accepted the government of Russia regarding import of replacement now in the Russian market of electronic components have occurred positive shifts.

Key words: optical and electronic devices, the digital pulse electronic optical converter, infrared imager, import and replacement, a spectral range.

Акционерное общество АО «Швабе – Приборы» было создано более 40 лет назад в период взлета российской оборонной промышленности для разработки

и организации серийного производства современных оптико-электронных приборов, комплексов и систем ночного видения. За эти годы предприятие завоевало заслуженный авторитет и уважение среди разработчиков, заказчиков и потребителей оптоэлектронной техники. В настоящее время форма собственности предприятия - акционерное общество. Приоритетное направление деятельности предприятия - освоение базовых прорывных технологий и разработка ключевых элементов современной оптоэлектронной техники на уровне лучших мировых образцов.

Важное место в деятельности АО «Швабе – Приборы» занимает проводимая техническая политика совместно с АО «Швабе - Оборона и Защита» с целью обеспечения силовых структур и гражданских потребителей современными оптико-электронными приборами - очками ночного видения на основе ЭОП III поколения, тепловизионными и телевизионными приборами и комплексами с использованием электронной навигации и электронной индикации.

Большие перспективы сейчас имеют прицельные приспособления, повышающие удобство ведения боя, с применением различной электроники для цифровой обработки сигналов, ввода и вывода информации. Судя по темпам развития электроники, это действительно та область, где в ближайшее время будут самые серьезные прорывы.

АО «Швабе – Приборы» совместно с АО «Швабе - Оборона и Защита» проводит в этом направлении серьезную модернизацию оптоэлектронных приборов и комплексов различного назначения.

В АО «Швабе – Приборы» разработаны приборы ночного видения нового поколения с использованием цифрового импульсного электронно-оптического преобразователя, шифр «Кайма» рис. 1 [1].



Рис. 1. ЭОП «Кайма» с "auto-gating"

Применение новой технологии производства ЭОП поколения 2+ и 3 с импульсным источником питания значительно расширяет возможности приборов ночного видения, увеличивает ресурс работы ЭОП и делает их всесуточными. В зарубежных ЭОПах подобная технология называется "auto-gating".

Цифровые источники питания с электроникой в интегральном исполнении, совместно с традиционными ЭОПами, обеспечивают импульсный режим рабо-

ты и необходимы для повышения динамического диапазона, чувствительности, а также для увеличения ресурса и надежности приборов при эксплуатации.

Прибор ночного видения с цифровым источником питания может временно безопасно работать в дневное время суток, не бояться вспышек света и интенсивных источников освещения, которые могут повредить прибор ночного видения без импульсного режима. Эта особенность делает рабочий ресурс ПНВ с цифровыми источниками питания практически неограниченным.

Широкий динамический диапазон рабочих освещённостей достигается за счёт возможности работы в пассивном, активно-импульсном и в пассивно-импульсном режимах. В пассивно-импульсном режиме высокий уровень освещённости на местности ослабляется в число крат, равное скважности работы ЭОП. Переход от чисто пассивного режима к пассивно-импульсному режиму позволяет реализовать практически круглосуточное наблюдение.

Управление прибором можно осуществлять с использованием компьютера через последовательный порт, что является достаточно привлекательным в процессе производства и для пользователя.

В свете приведенных характеристик следует отметить несомненную перспективность развития и усовершенствования цифровых технологий в приборах ночного видения.

Специалисты АО «Швабе – Приборы», используя последние достижения науки, техники и технологии, впервые в России создали образцы наблюдательных систем ночного видения повышенной дальности для Сухопутных войск РФ, что позволяет обнаруживать и сопровождать цели днем и ночью на больших дальностях в пассивном режиме. Эти результаты оказалось возможным достигнуть только с использованием импортных комплектующих элементов, таких как фотоприемные матрицы, системы отображения информации, интегральные микросхемы высокой степени интеграции и использования зарубежного программного обеспечения.

Схожая ситуация и с тепловизионными приборами.

Например в АО «Швабе – Приборы» разработан тепловизионный модуль МТП834М «Пика –М». Тепловизионный модуль представлен на рис. 2 [2]. Модуль предназначен для использования в тепловизионных наблюдательных приборах, тепловизионных прицелах. Позволяет выводить тепловизионное изображение в видеостандарте по ГОСТ 7845-92 и обеспечивает возможность работы как со встроенной калибровочной шторкой, так и без неё.

Для использования модуля в носимых малогабаритных приборах реализована возможность управления с помощью непосредственно подключаемой к модулю внешней трёхкнопочной клавиатуры.

Однако массовое поступление в войска новых прицельных комплексов ограничено не только из-за большой цены комплексов, отсюда возникают проблемы с поступлением государственного финансирования, но главное, что в нашей стране не налажено серийное производство электронных компонентов, необходимых для реализации технических решений.



Рис. 2. Тепловизионный модуль МТП834М «Пика – М»

Из-за недостатка электронных компонентов отечественного производства, в конструкции оптоэлектронных приборов наметилась неуклонная тенденция роста объема импортных комплектующих. Рост объема импортных комплектующих в составе оптоэлектронных приборов приведен на графике рис. 3.

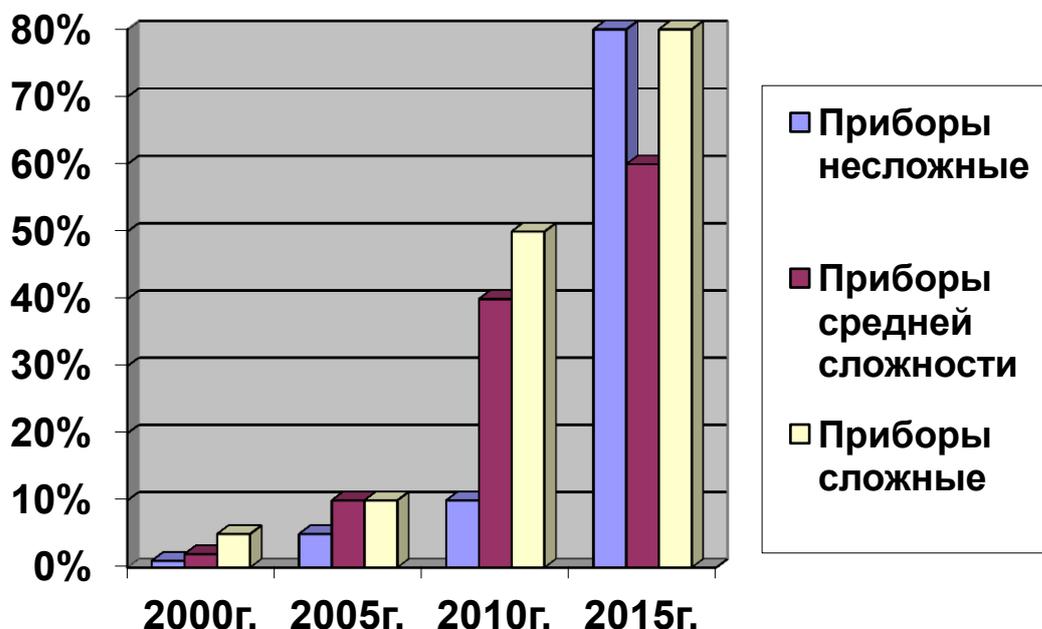


Рис. 3. График роста объема импортных комплектующих в оптоэлектронных приборах

В предыдущие годы из-за остановки производства большинства электронных компонентов в России на ряде российских предприятий стало невозможно изготавливать ранее разработанные приборы. Это заставило производителей и разработчиков срочно модернизировать приборы и при этом использовать импортную комплектацию.

В 2014 году санкции западных стран и предпринятые российской стороной ответные шаги привели к тому, что стратегия импортозамещения стала одним из приоритетных направлений деятельности российской промышленности.

Программа импортозамещения в сегодняшних условиях становится государственной и признана стать ключевым фактором повышения устойчивости страны к внешнему воздействию и защиты ее безопасности [3].

По результатам анализа, проведенного Минпромторгом, наиболее перспективными с точки зрения импортозамещения являются электронная промышленность. Импортозамещение в этой отрасли возможно в случае наличия соответствующих свободных производственных мощностей и конкурентоспособных предприятий, которые могут предложить качественную продукцию по рыночным ценам.

В долгосрочной перспективе снижение импортной зависимости возможно за счет инноваций и стимулирования инвестиций в отрасль и создания новых производств. По оценке Минпромторга, в случае реализации продуманной политики импортозамещения к 2020 году можно рассчитывать на снижение импортозависимости в электронной промышленности с уровня 70-90% до уровня 50-60%.

В 2015 году Министерство промышленности и торговли Российской Федерации провело специальное совещание. Тема совещания: Состояние работ по импортозамещению для образцов вооружения и военной техники российского производства. На совещании было отмечено, что в большинстве разработанных оптоэлектронных приборах содержание комплектующих изделий и ЭРИ ИП достигает 70% и более. Причем такая ситуация сложилась во всей отрасли.

Для выполнения государственного оборонного заказа по поставкам техники для вооруженных сил РФ предприятиям изготовителям рекомендовано принять меры по формированию страхового запаса необходимых материалов, комплектующих изделий и ЭРИ иностранного производства на период проведения мероприятий по импортозамещению.

Минпромторгом России, совместно с российскими промышленными предприятиями, был успешно проведен ряд НИОКР, в результате которых создан значительный научно – технический и технологический задел в области производства электронных компонентов.

Следует отметить, что мерой по содействию импортозамещению может быть стандартизация. Она является средством обеспечения взаимозаменяемости отдельных элементов, повышения надежности, обеспечения норм безопасности и экологических требований. Развитие национальных стандартов позволит сократить импорт некачественной продукции, а также мотивировать отечественные предприятия на производство конкурентоспособной продукции.

Серьезной проблемой является импортозамещение примененных в выпускаемых приборах зарубежных ЭРИ, составляющих большую часть комплектующих оптоэлектронных каналов.

В декабре 2014 года был разработан перечень первоочередных ОКР в части разработки перспективных электронных компонентов. Эти работы планируется завершить в 2018 году.

В перечень НИОКР в рамках работы по импортозамещению включены следующие разделы:

1. разработка сверхвысокочастотной электронной компонентной базы;
2. разработка радиационно-стойкой электронной компонентной базы;
3. разработка интегральных микросхем для средств цифровой обработки и преобразования сигналов, сетей обмена данными, а также информационной безопасности;
4. разработка изделий полупроводниковой электроники;
5. разработка комбинированных устройств электроники;
6. разработка изделий пассивной электроники;
7. разработка электротехнических изделий.

По результатам рассмотрения проблемных вопросов и предложений ФГУП «МНИИРИП» АО «Швабе – Приборы» и АО «Швабе - Оборона и Защита» разработали планы – графики и мероприятия по импортозамещению иностранных комплектующих в ранее разработанных изделиях. «Швабе-Приборы» и «Швабе–Оборона и Защита» проводят мероприятия по импортозамещению электронной компонентной базы, комплектующих и материалов иностранного производства в 11 типах изделий военной техники.

Работы по импортозамещению предусматривают проведение полного цикла доработки конструкторской документации и проведения всех видов испытаний, для чего необходимо время от 1 года до 3 лет. Кроме того механизм компенсации затрат на импортозамещение не рассматривается заказывающими управлениями. Поэтому стоимость доработанных изделий неуклонно растет.

Ожидаемые показатели по снижению зависимости от поставщиков импортных комплектующих электро-радио элементов приведены на графике рис. 4.

По результатам доработки изделий получается, что в оптоэлектронных приборах, где применяются комплектующие, такие как телевизионные матрицы, микроболометрические тепловизионные матрицы и цифровые микросхемы с высокой степенью интеграции возможна замена импортных ЭРИ не более 50%.

Не секрет, что наша электронная промышленность не может похвастать выпуском качественных электро-радио элементов, поэтому после проведения испытаний доработанных приборов появляются проблемы связанные с качеством, долговечностью и энергопотреблением оптико-электронных приборов. В результате, решая проблему импортозамещения, нам неизбежно приходится идти на снижение ряда технических характеристик приборов.

Однако, в связи с мерами принятыми правительством России в части импортозамещения, в настоящее время на Российском рынке электронных компонентов произошли положительные сдвиги.

В 2014 году российская радиоэлектронная промышленность завершила разработку собственной технологии создания микросхем (транзисторов) по топологии 65 нанометров. В 2014 году выпущены первые процессоры «Эльбрус-2СМ» по топологии 90 нанометров, на базе которых планирует осуществить производство компактных материнских плат. В настоящее время ведутся научно-исследовательские работы по созданию технологии уровня 45 нанометров. В ближайшие годы предприятие планирует перейти к производству микросхем по топологии 45 и 32 нанометра.

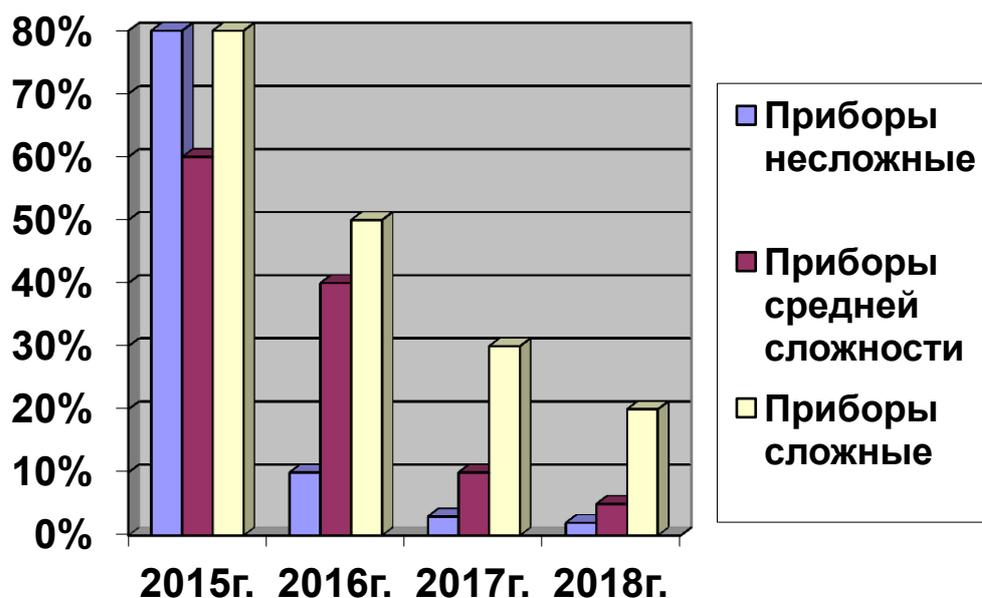


Рис. 4. График объема импортных комплектующих в составе оптоэлектронных проборов в 2015 – 2018 годах

В перспективе планируется переходить на выпуск чипов с топологией 28 нанометров. Современные микрочипы нужны для производства отечественной автоматики, управляющей электроники и оборудования в рамках импортозамещения.

Следует отметить, что ряд российских предприятий занимающихся созданием и модернизацией производств в сфере электроники и микроэлектроники, обеспечили бурный рост производства - на 50-70% в год, причём стабильный в течение последних нескольких лет. Интерес обусловлен переходом на микросборки, гибридные сборки, СВЧ ГИС, МЭМС и 3D-интеграцию.

Направление особой важности в отечественной электронике - это производство радиационностойких ЭРИ. Работы в этом направлении постоянно находятся под контролем государства. В этом направлении мы имеем приоритет

в мировом производстве электроники. Занимаются этой тематикой базовые предприятия, их продукция позволяет производить конкурентоспособную твердотельную СВЧ-электронику, перекрывающую все важнейшие спектральные диапазоны, которые используются от сотовой телефонии до локационных станций различных диапазонов гражданского и военного применения.

В России уже более 100 компаний-производителей электронной продукции и потребность в них ширится. Те же компании, которые лишь недавно вышли на новые для себя рынки, выросли по продажам своей продукции даже в разы. Особенно это касается тех, кто работает не под гособоронзаказ, а на экспорт. У ряда компаний годовой оборот уже превысил 50 млрд. долларов. Отдельные отечественные производители в 2014 г. сумели выйти на европейский рынок компьютерной техники.

Сложилась ситуация, что у нас собственных технологий по производству электронных компонентов, которые могли бы конкурировать с мировыми производителями, не существует. Распространена ситуация с покупкой зарубежных технологий, которые за границей оказываются невостребованными. В России же им находят применение, и устаревшая технология приживается на внутреннем рынке как новая.

Под натиском поставщиков зарубежных электро-радио элементов российские производители электроники даже не задумывались о том, чтобы производить отечественные компоненты. Ведь до санкций всегда была возможность купить за границей, теперь эта возможность находится под угрозой. Глобальное лидерство в высокопроизводительных процессорах остается в США и Европе. Поэтому нам необходимо проводить политику импортозамещения, преследуя конечную цель в виде полной технологической независимости от стран, проводящих недружественную политику.

Анализ схемотехнических решений в наших разработках оптико-электронных приборов показал, что аналогов основных импортных комплектующих ЭРИ на российском рынке нет и в настоящее время возможна замена только пассивной электроники таких как резисторы, конденсаторы, разъемы и элементы силовой электроники. Поэтому полное решение вопроса импортозамещения в ранее разработанных приборах, а так же проектирование оптоэлектронных приборов на элементной базе отечественного производства будет возможно не раньше 2020 года. Для выполнения ГОЗ наше предприятие создает страховой запас.

В России к настоящему времени есть ряд компаний, обладающих достаточными инженерными кадрами и технологическими ресурсами для решения практически 100% задач, которые ставят разработчики систем вооружений. Если убрать необоснованные бюрократические препоны в части согласования применения ЭРИ с приемкой «1», то наш научно-технический и интеллектуальный потенциал станет надежной платформой импортозамещения электроники при проектировании и производстве современных оптоэлектронных комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев А.Б., Южик И.Б, Дейснер А.А. Импульсный электронно-оптический преобразователь // Патент РФ № 2521599. 10.07.2014. Бюл. № 19.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wiki-prom.ru/543zavod.htm>.
3. Минпромторг внес в правительство программу импортозамещения: журнал Forbs / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.forbes.ru/news/261157-minpromtorg-vnes-v-pravitelstvo-programmu-importozameshcheniya> (дата обращения: 02.04.16).

© Ю. А. Трясов, И. Б. Южик, 2016

ОПТИКО-КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ СТРЕЛЬБЫ ПРЯМОЙ НАВОДКОЙ ПО ДВИЖУЩИМСЯ ЦЕЛЯМ

Олег Кузьмич Ушаков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоотехники, 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 метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, 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 управления и предпринимательства, тел. (383)361-01-24, e-mail: lera-pavlenko1@yandex.ru

В статье рассматривается принципиальная оптико-кинематическая схема учебного тренажера для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям. Тренажер необходим как элемент методического обеспечения спецкурсов по кафедре наносистем и оптоотехники, а также кафедре спецустройств и технологий. Изложен принцип работы тренажера.

Ключевые слова: тренажер, стрельба прямой наводкой, движущаяся цель, оптико-кинематическая схема тренажера.

OPTIC-KINEMATIC TRAINER FOR FIRING DIRECT AIMING ON MOVING-TARGETS

Oleg K. Ushakov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of department of the nanosystem and optotekhniki, tel. (903)931-08-52, e-mail: ushakovo@bk.ru

Pavel V. Petrov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of department of metrologii and technology of optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

Valeria A. Pavlenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of economic sciences, associate professor, associate professor of department of upravlenia and bizness, tel. (383)361-01-24, e-mail: lera-pavlenko1@yandex.ru

The article discusses the formulation of the problem to create a training simulator for direct fire at moving targets. The simulator is required as an element of methodological support of specialized courses in the Department of nanosystems and optical engineering, as well as the Department of spetsustroystv and technologies.

Key words: fitness machine, direct fire, moving target, firing circuit, functional diagram simulator.

Данный проект тренажёра предлагается как элемент учебно-методического обеспечения спецкурсов по кафедре наносистем и оптотехники, а также – кафедре спецустройств и технологий. Наиболее предпочтительный принцип действия тренажёра – имитационный, а вариант исполнения – компьютерная модель. При наличии соответствующей аппаратной части не исключается реальный вариант светосигнального тренажёра.

Прямой наводкой является такая, при которой траектория полёта снаряда не превышает высоту цели. Для наведения орудия на подвижную цель необходимо в прицеле установить угол места цели ($\alpha_{ц}$) и угол упреждения ($\alpha_{у}$). На рис. 1 показана схема стрельбы. Необходимо заметить, что визирная ось прицела должна быть согласована с осью канала ствола орудия.

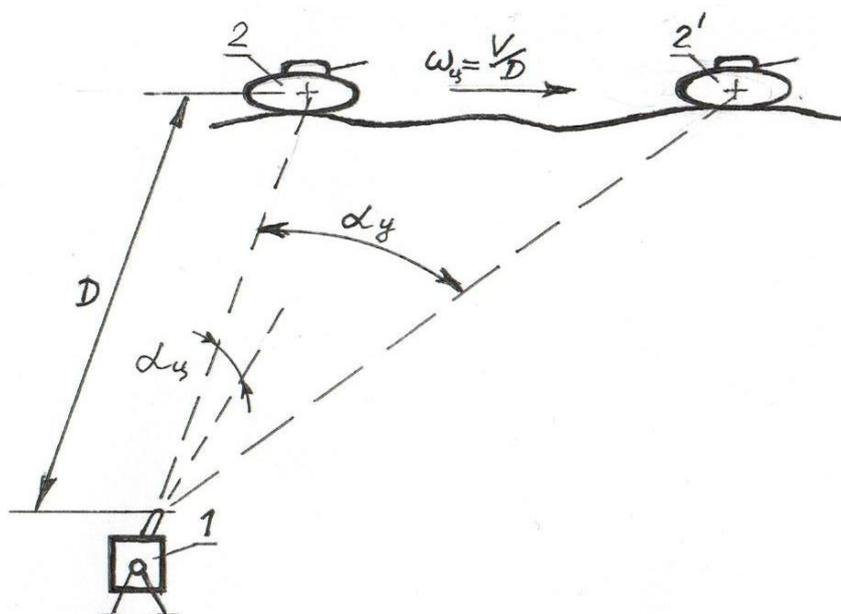


Рис. 1. Схема стрельбы по подвижной цели:

1 – прицел и орудие; 2 – цель; 2' – цель после перемещения за время t ;
 $\alpha_{ц}$ – угол места цели; $\alpha_{у}$ – угол упреждения; D – дальность до цели;
 V – линейная скорость цели; $\omega_{ц}$ – угловая скорость цели

Измерение дальности до цели обычно не представляет трудности. Её определяют с помощью лазерных дальномеров, стереодальномеров, радиолокацией, при помощи дальномерной шкалы прицела и т.д.

Угол места цели зависит от дальности до цели и от баллистики используемого при стрельбе снаряда.

Угол упреждения определяется либо наводчиком по шкале прицела в поле зрения (субъективно, с внесением дополнительных погрешностей), либо слежением (сопровождением) за целью при помощи поворота подвижной части орудия вместе с прицелом, т.е. выравниванием угловых скоростей поворота орудия

и движения цели. Последнее приводит к значительному усложнению конструкции тренажёра.

Функциональная схема тренажёра приведена ранее [1].

Принцип работы тренажёра рассматривается по его оптико-кинематической схеме, которая показана на рис. 2.

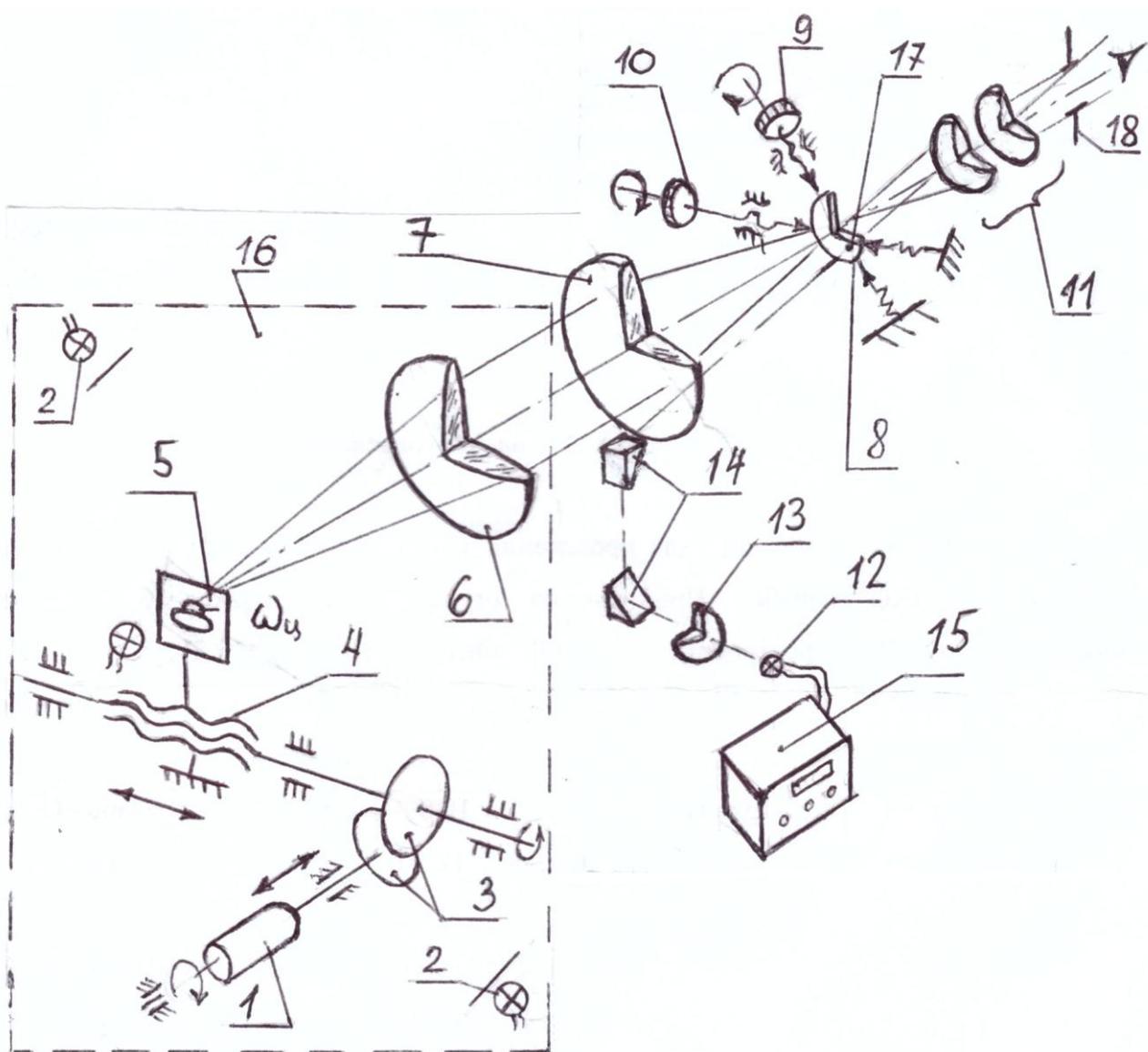


Рис. 2. Оптико-кинематическая схема тренажёра для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям:

1 – электродвигатель; 2 – источники света; 3 – вариатор; 4 – микровинт-гайка; 5 – изображенные цели; 6 – широкоугольный коллиматор; 7 – объектив прицела; 8 – сетка; 9, 10 – винтовые механизмы; 11 – окуляр; 12 – светодиод; 13, 14 – элементы проекционной системы; 15 – электронный блок; 16 – фотометрический шар; 17 – световое пятно; 18 – выходной зрачок

Электродвигатель 1 через вариатор 3 задаёт скорость перемещения цели 5 (через передачу микровинт-гайка (4)), которая находится в задней фокальной плоскости объектива широкоугольного коллиматора 6. Условия стрельбы моделируются соответствующими устройствами в фотометрическом шаре 16.

Моделируются, в частности, параметры атмосферы (влажность, давление, освещённость, и т.д.); контраст фона и цели; времена года (зима, лето, весна, осень).

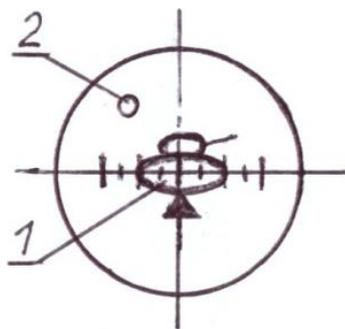


Рис. 3. Вид поля зрения:

1 – изображение цели; 2 – изображение светового пятна

Изображение цели 5 объективом прицела 7 проектируется в плоскость сетки 8 и далее рассматривается наводчиком через окуляр 11. Сетка имеет возможность перемещения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях при помощи винтовых механизмов 9 и 10. При помощи их вводятся угол места цели и угол упреждения. Угол места цели вводится перемещением сетки в вертикальной плоскости, исходя из дальности до цели и типа снаряда. Угол упреждения определяется по световому сигналу 17 в поле зрения прицела, длительность свечения которого соответствует полётному времени снаряда до цели. В поле зрения вводится световой сигнал от светодиода 12 при помощи проекционной системы 13, 14, 7. Длительность свечения устанавливается при помощи электронного блока 15, с погрешностью не более 0.01 сек.

Вид поля зрения представлен на рис. 3

Задача наводчика состоит в том, чтобы определить на какое расстояние перемещается цель в поле зрения прицела (отсчёт по сетке) за время свечения светодиода (полётное время снаряда до цели). Другими словами, наводчик наводится центром сетки на центр цели и нажимает кнопку «пуск». В поле зрения загорается световой индикатор, который будет светиться время, равное полётному времени снаряда (устанавливается по электронному блоку 15). В момент, когда световое пятно гаснет, наводчик замечает то деление на сетке прицела, которое совпадает с центром цели. Именно по нему и нужно наводить орудие, чтобы учесть упреждение до выстрела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков О. К., Петров П. В. Тренажёр для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям // 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 168–170.

© О. К. Ушаков, П. В. Петров, В. А. Павленко, 2016

ОБ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Александр Викторович Макеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)361-07-31, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

В работе предлагается обзор современных оптических методов и устройств, для исследования и контроля микрогеометрии поверхностей деталей. Уделено особое внимание совершенствованию метода оптической интерферометрии с применением лазерного излучения с короткой длинной волны и цифровой обработкой результатов, как наиболее перспективному направлению при исследовании шероховатости поверхности.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, оптические методы контроля шероховатости поверхности деталей, профилограф, интерферометрические измерения, спекл-интерферометрия, вейвлеты.

OPTICAL METHODS FOR CONTROL OF SURFACE MICROGEOMETRY

Alexander V. Makeev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a post graduate student, tel. (383)361-07-31, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

The paper provides an overview of modern optical methods and devices for the study and control of surface microgeometry details. Paying special attention to the improvement of optical interferometry method using laser light with a short wavelength, and the digital processing of the results, as the most promising directions in the study of surface roughness.

Key words: The surface roughness, optical methods to control surface roughness profiler details interferometric measurement of speckle interferometry, wavelets.

Создание высокоэффективных методов для контроля состояния поверхностных слоев деталей предоставляет большие резервы, для повышения качества выпускаемой продукции. В зависимости от материала, и в соответствии с требованиями к микрорельефу поверхности, и точности размеров обрабатываемой детали возможно применение различных методов и средств для контроля обрабатываемой поверхности. Контроль состояния поверхностного слоя деталей должен обеспечивать высокую точность, скорость, локальность и воспроизводимость получаемых в процессе измерения результатов. Важной задачей является создание бесконтактных автоматических систем контроля с компьютерной обработкой результатов [1, 2, 4, 5].

Цель работы состоит в обзоре оптических методов измерения шероховатости поверхности деталей. В таблице представлены характеристики таких методов.

Особое внимание предлагается уделить интерферометрическим методам, и возможностям улучшения качества измерений путем цифровой обработки результатов.

Характеристики методов измерения шероховатости поверхности деталей

Название метода	Изменяемые высоты микронеровностей	Длина волны источника излучения	Возможность цифровой обработки результатов
МИИ-4 Микроинтерферометр Линика	R _{max} 0,1-0,8	545нМ	Нет
Метод спекл-структур с применением спиральных пучков	R _a 0,7	630нМ	Есть
Определение шероховатости поверхности с помощью поля направлений.	$\frac{1,5\lambda}{(n_2 - n_1)}$	633нМ	Есть
Фотометр	R _a 0,01-0,50	632нМ	Есть
Метод псевдоцветового кодирования изображений	R _a 1,26-10	Данных нет	Есть
МИС 2	0,1-0,8	-	Нет

На рис. 1 показана схема оптической системы МИИ-4.

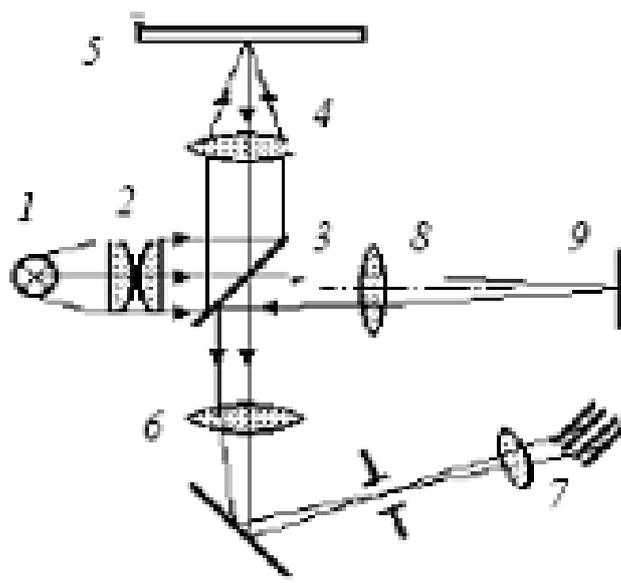


Рис. 1. Схема оптической системы МИИ-4

Свет от лампы 1 через конденсор 2 попадает на полупрозрачную пластинку 3, где разделяется на два пучка лучей. Один, отражаясь, попадает в объектив 4 и фокусируется на поверхности объекта 5. Отразившись от нее, он через объектив и промежуточную линзу 6 приходит в окуляр 7. Второй пучок от конденсора 2 проходит через полупрозрачную пластинку 3 и через компенсатор 8 падает на эталонное зеркало 9 интерференционной головки. Отразившись от него и вернувшись к полупрозрачной пластине, второй пучок лучей также приходит в окуляр 7 [6].

Определение параметров шероховатости поверхностей оптически непрозрачных деталей выполняется методом спекл-структур с применением спиральных пучков (рис. 2).

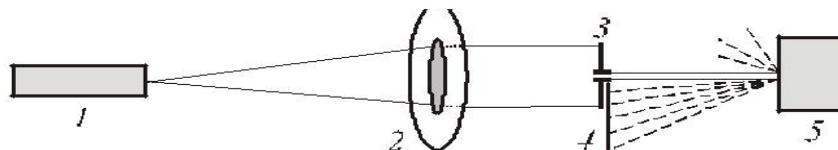


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – лазер ГН-40; 2 – ДООЭ; 3 – диафрагма; 4 – ПЗС-матрица; 5 – контролируемый объект

В качестве источника когерентного излучения применяется He-Ne лазер ГН-40 с длиной волны $\lambda=630$ нм и мощностью 40 мВт (или лазерный диод с близкими параметрами). Регистрирующим элементом выступает ПЗС-матрица от цифровой видеокамеры ACE-S560CHB с разрешением 640×480 пикселей, регистрирующая изображения в чёрно-белых тонах. При использовании в качестве зондируемого волнового фронта спирального погрешность измерения параметров шероховатости составляет $0,03$ мкм [8].

Определение шероховатости поверхности может выполняться с помощью поля направлений (рис. 3).

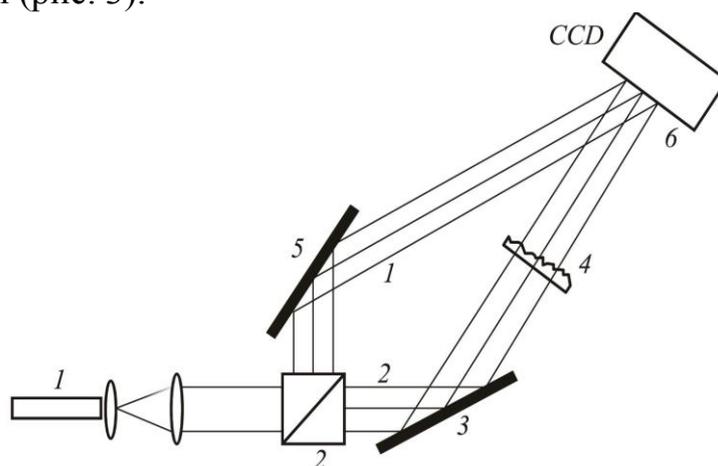


Рис. 3. Схема лазерной установки

Луч лазера (1) разделяется оптическим кубиком (2), после чего луч (2) отражается от зеркала (3) и, проходя через испытуемый прозрачный образец, регистрируется CCD камерой, а луч (1) – опорный пучок – отражается от зеркала 6 и попадает на чувствительный элемент CCD камеры.

Расстояние между элементом (4) и чувствительным элементом CCD камеры – 6 см, длина волны лазера – 633 нм, максимальная величина шероховатостей на поверхности $h_{max} = \frac{1,5\lambda}{(n_2-n_1)}$, где n_2 – показатель преломления испытуемого образца, n_1 – показатель преломления окружающей среды. При $n_1 = 1$, $n_2 = 1,5$ (стекло) максимальная амплитуда шероховатостей составит $1,9$ мкм, частота горбов шероховатости – 200 мкм [7].

Интерференционная картина излучения, рассеянного от шероховатой поверхности дает сложную структуру с нерегулярной периодичностью, может оказываться зашумленной. Используемое при обработке интерференционных сигналов преобразование Фурье обладает недостаточной информативностью при анализе нестационарных сигналов, а также не позволяет анализировать их особенности и для исследования и обработки требуются методы, которые позволяют определять локальные особенности пространственно-частотных характеристик интерференционных полос. Таким методом может служить вейвлет преобразование [14,15]. Двумерное вейвлет преобразование хорошо решает задачи выделения полезного сигнала в случае сложной картины интерференционных полос [15]. Блок схема вейвлет обработки интерферограммы представлена на рис. 4.

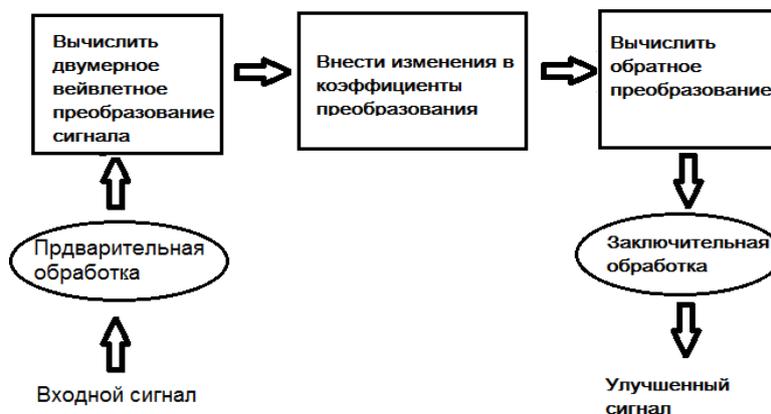


Рис. 4. Блок схема вейвлет обработки интерферограммы

На рис. 5 представлена обработка зашумленного сигнала двумерным вейвлет преобразованием в среде MatLab.

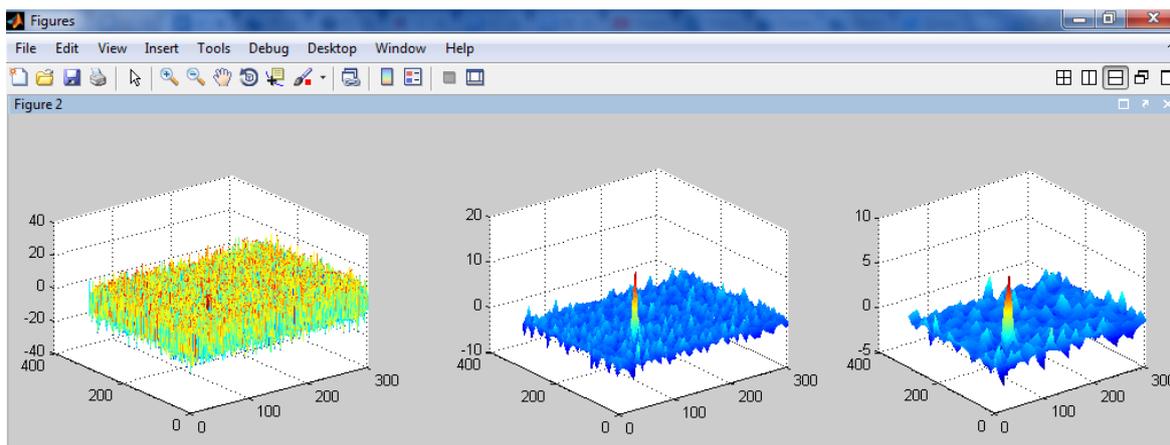


Рис. 5. Компьютерный вид обработки зашумлённого сигнала

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ю.Ф. Назаров, А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, И.В. Компанец, Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов ФП ФИП PSE, 2007, т. 5, № 3-4, vol. 5, No. 3-4.

2. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. / Под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд., перераб. и доп.. — М.: Машиностроение, 2001.
3. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Измерение параметров шероховатости поверхности детали. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012
4. Айрапетян В.С., Губин С.Г., Макеев А.В. Оптические исследования шероховатости. // Труды XV Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». Новосибирск.: НГТУ. – 2014. – С.8 – 10.
5. Макеев А. В., Киндиров А. А., Губин С. Г. Анализ композиционных материалов для изготовления боеприпасов с отсечкой пороховых газов в переменном объеме // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 120–123.
6. МИИ 4 техническая документация [Электронный ресурс] Режим доступа: nnc.cdu.edu.ua/downloads/Техдокументація...МИИ-4.doc
7. Определение шероховатости поверхности с помощью поля направлений. А.Г. Налимов, В.В. Котляр, Р.В. Скиданов Институт систем обработки изображений РАН, Самарский государственный аэрокосмический университет.
8. Определение шероховатости поверхности оптически непрозрачных деталей методом спекл-структур с применением спиральных пучков. Малов А.Н.1, Павлов П.В.2 1 Амурский государственный университет (Благовещенск), 2 Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Компьютерная оптика, 2012, том 36, №3
9. Айрапетян В. С. Рассеяние света от поверхности лазерной керамики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 115–119.
10. Овчинников С. С., Тымкул В. М., Кузнецов М. М. Оптический способ контроля шероховатости поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 282–285.
11. Р. Джонс, К. Уайкс. Голографическая и спекл-интерферометрия /пер.с англ. А.А.Колоколова и др.; под. ред. Г.В.Скороцкого. - М. : Мир, 1986. - 327 с.
12. С. Н. Степанов, А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов. Метрологическое обеспечение производства. Нормирование параметров и способы измерения текстуры поверхности / - Спб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. - 147с.
13. В.Е. Привалов. Лазерные интерферометры для механических измерений / - Спб. : Мех. ин-т. 1992. - 56 с.
14. Информационные, вычислительные и управляющие системы. Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 6 / Главн. ред. В.Н. Васильев. - СПб.: СПбГИТМО, 2002. – С.153-157
15. Давыдов А.В. Курс лекций по вейвлетам. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://geoin.org/wavelet/>

© А. В. Макеев, 2016

РАЗРАБОТКА 3D-ПРИНТЕРА НА ОСНОВЕ SLA ТЕХНОЛОГИИ

Максим Михайлович Бузиков

ООО «СибКМТ», 630051, Россия, г. Новосибирск, пр. Дзержинского, 87, офис 217, тел. (923)171-33-29, e-mail: 89kozerog89@mail.ru

Марина Петровна Егоренко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

Игорь Николаевич Карманов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, зав. кафедрой физики, тел. (383)343-29-33, e-mail: kaf.physic@ssga.ru

В статье приводится описание 3D-принтера, разработанного на основе технологии SLA. Устройство спроектировано с использованием распространенной элементной базы с целью достижения низкой конечной стоимости.

Ключевые слова: прототипирование, 3d-принтеры, лазерный диод, фотополимеры, микроконтроллер, зеркальные призмы.

DEVELOPMENT OF 3D-PRINTERS BASED ON SLA TECHNOLOGY

Maxim M. Buzikov

«SibKMT» Ltd., 630051, Russia, Novosibirsk, Dzerzhinsky Avenue, 87, office 217, tel. (923)171-33-29, e-mail: 89kozerog89@mail.ru

Marina P. Egorenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Senior lecturer, Department of Nanosystems and Optics Engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

Igor N. Karmanov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., head of the Department of Physics, Ph. D., Associate Professor, tel. (383)343-29-33, e-mail: kaf.physic@ssga.ru

The article describes the developed 3D-printer, built on the basis of SLA technology. The device is designed with a common element base to achieve lower final cost.

Key words: prototyping, 3D-printers, laser diode, photopolymers, microcontroller, mirrored prism.

В современном мире все больше и больше набирают популярность новые термины: 3D - принтер, трехмерная печать, быстрое прототипирование. Активное развитие современных электронно-вычислительных систем, появление но-

вых источников излучения и программных возможностей привело к тому, что сегодня стало возможным «напечатать» практически что угодно – от простейших пластиковых кубиков до искусственных костей черепной коробки головного мозга человека. Освоив главный принцип синтеза твердотельных объектов, разработчики постоянно находят способы «печати» новыми веществами – пластмасса, фотополимер, металл, бетон, биоматериалы [2]. Трехмерный синтез объектов востребован во многих областях науки и техники.

При всех своих преимуществах технологии трехмерного синтеза имеют один существенный недостаток – высокую стоимость оборудования, которое способно дать приемлемое качество изготавливаемых прототипов и моделей.

Данная статья посвящена разработке 3D - принтера, в основе работы которого лежит технология SLA – локальная засветка лазерным лучом жидкого фотополимера, вследствие чего происходит полимеризация последнего в засвеченных областях. Основной упор при проектировании устройства был сделан на его конечную дешевизну и доступную элементную базу. Благодаря этому для производства устройства не требуется, каких-либо дорогостоящих и нестандартных технологий и оборудования.

3D - принтер разделен на отдельные функциональные узлы. Внешний вид устройства показан на рис. 1.

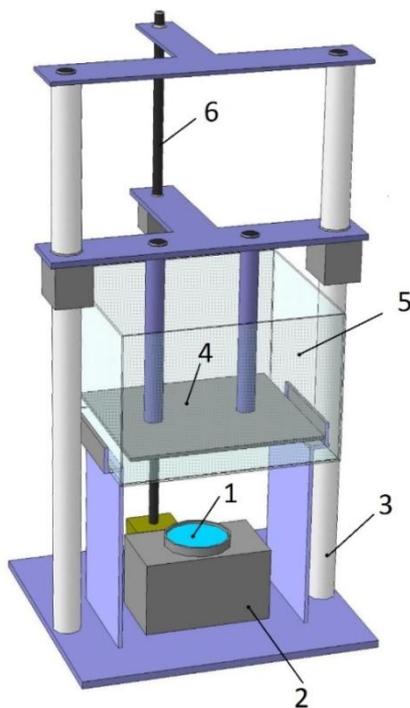


Рис. 1. Внешний вид 3D -принтера

Основу устройства составляет опико-электронная система 2. Она включает в себя электронный блок управления и блок разверток лазерного луча. Электронный блок управления осуществляет модуляцию лазерного луча, излучаемого лазерным диодом, управляет блоком разверток для перемещения лазерного луча в координатах X и Y по поверхности фотополимера, а также задает положение подвижной платформы 4 для перемещение выращиваемого объекта по

координате Z при помощи ходового винта 6. Платформа перемещается по направляющим 3. Прозрачная пластиковая емкость 5 предназначена для заливки жидкого фотополимера. Лазерное излучение фокусируется на дне емкости с помощью f - $teta$ объектива 1. Модуляция лазерного луча и перемещение подвижной платформы задается данными об объекте, находящимися в носителе информации. Роль такого носителя выполняет карта памяти стандарта $micro\ SD$. На карту предварительно записывается информация о каждом слое будущего трехмерного объекта, который в последствие будет выращиваться из фотополимера.

Работает устройство следующим образом. При включении питания подвижная платформа опускается в крайнее нижнее положение, образуя зазор между собой и дном емкости, равный 5 мм. Этот слой необходим для надежного «прилипания» будущего изделия к платформе. Далее следует заполнить емкость необходимым количеством жидкого фотополимера. После запуска процесса синтеза, электронный блок управления, считывая информацию с карты памяти о трехмерном объекте, засвечивает лазерным лучом фотополимер в соответствии с контуром первого слоя изделия. Затем происходит поднятие платформы на толщину одного слоя, равную 0,1мм и засветка контура следующего слоя изделия. Далее процесс повторяется, пока не будет засвечен последний слой синтезируемого изделия. Когда весь объект слой за слоем будет построен, произойдет подъем платформы в крайнее верхнее положение, после чего следует извлечь из креплений емкость с остатками фотополимера и отделить готовое изделие от платформы.

Ходовой винт 6 подвижной платформы соединяется с валом электродвигателя и фиксируется стопорным винтом. В качестве электродвигателя использован шаговый униполярный электродвигатель марки ПБМГ-200, имеющий 200 шагов на один оборот. 1 шаг соответствует повороту вала на $1,8^\circ$.

На одной из направляющих подвижной платформы расположены концевые выключатели, которые сообщают электронному блоку управления о достижении платформой крайних верхнего или нижнего положения рабочей зоны. Оптическая система 3D – принтера показана на рис. 2.

Она состоит из лазерного излучателя 1, цилиндрических линз коллиматора 2 и 3, f - $teta$ объектива 6, вращающихся зеркальных призм 4 и 5. Зеркальные призмы вращаются во взаимно перпендикулярных плоскостях, образуя строчную и кадровую развертку лазерного луча, перемещающегося по поверхности фотополимера. Скорости вращения призм строго стабилизированы при помощи датчиков Холла и согласованы между собой при помощи датчиков начала строки и кадра. F - $teta$ объектив 6 фокусирует параллельный пучок лазерного излучения в пятно размером 0,1мм в плоскости фотополимера.

В качестве лазерного излучателя применен одномодовый полупроводниковый лазерный диод с длиной волны излучения 405 нм и мощностью 700 мВт.

Изначально в устройстве для управления лазерным лучом были использованы гальванометрические сканаторы. Однако, полученные результаты оказались не удовлетворительными ввиду высокой нелинейности перемещения ска-

наторами лазерного луча в рабочей зоне. В данной оптической системе, благодаря моменту инерции зеркальных призм, стало возможно добиться гораздо более стабильного сканирования лазерным лучом плоскости фотополимера и как следствие, синтезировать более сложные и качественные изделия.

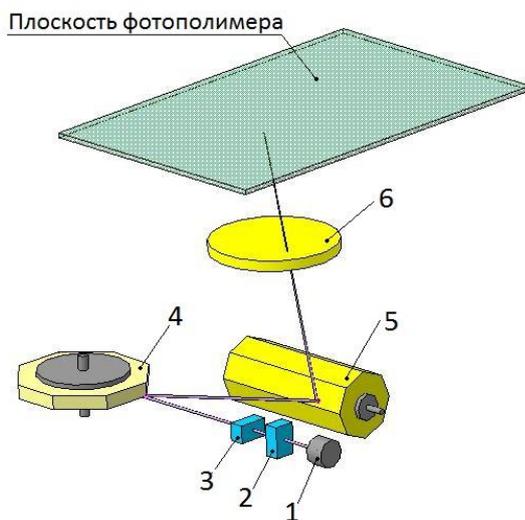


Рис. 2. Оптическая система 3D-принтера

Для обеспечения функционирования 3D – принтера разработан электронный блок управления, принципиальная схема которого показана на рис. 3.

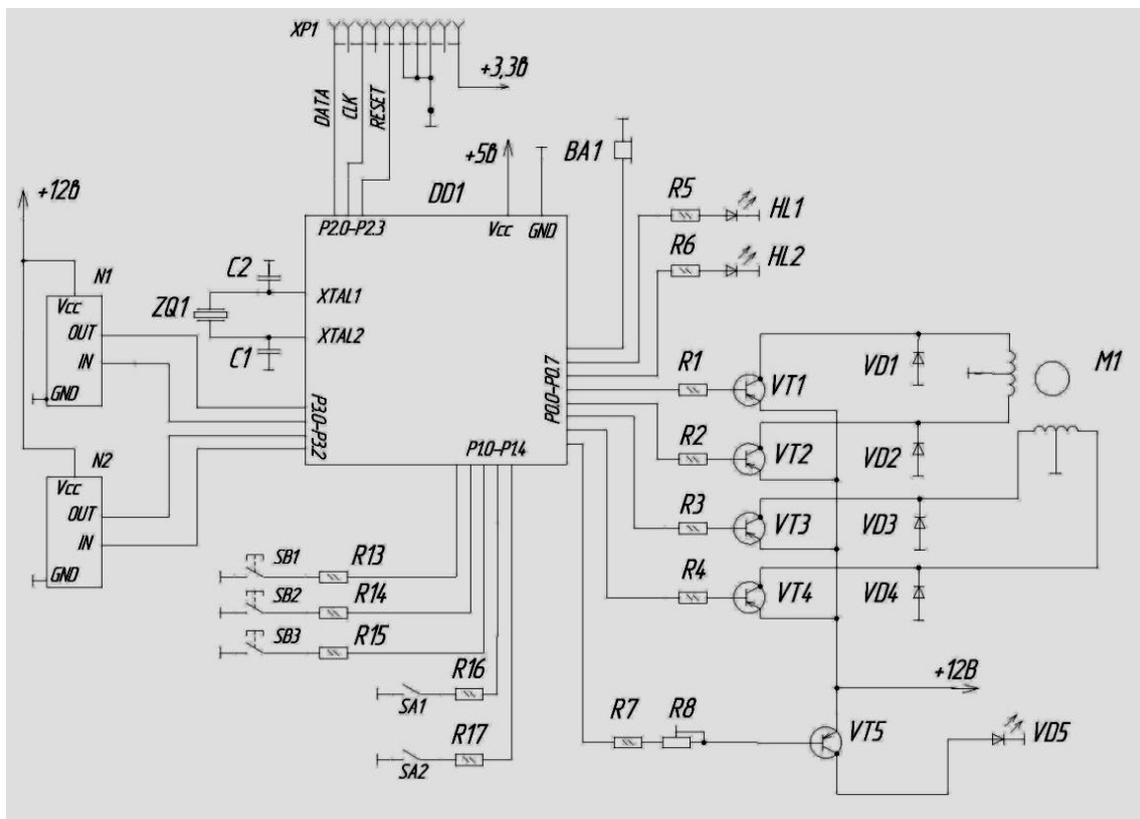


Рис. 3. Электронный блок управления

Основу схемы составляет микросхема DD1, которая представляет собой восьмиразрядный микроконтроллер ATmega8 фирмы ATMEL. Микроконтроллер имеет встроенный 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 2 восьмиразрядных таймера, 32 линии ввода/вывода, встроенный последовательный интерфейс SPI для обмена данными с другими устройствами. К порту P0 (выводы P0.0-P0.3) подключены транзисторные ключи VT1-VT4, которые служат усилителем тока для коммутации обмоток шагового электродвигателя M1. Резисторы R1-R4 являются ограничителями тока через базы транзисторов VT1-VT4. Диоды VD1-VD4 предотвращают возможный пробой транзисторов коммутационными выбросами напряжения обмоток шагового электродвигателя. На транзисторе VT5 собран силовой ключ управления лазерным диодом VD5. Подстроечным резистором R8 устанавливают в процессе отладки принтера максимальный рабочий ток, протекающий через лазерный диод. Разъем XP1 служит для подключения карты памяти microSD. Кварцевый резонатор ZQ1 задает тактовую частоту микроконтроллера, которая составляет 24 МГц. Блоки строчной и кадровой разверток N1 и N2 подключены к порту P3 микроконтроллера для передачи информации о начале строки/кадра, необходимой для правильной модуляции лазерного излучения и регулировки частоты вращения зеркальных призм. Кнопки SB1, SB2 служат для ручного управления шаговым электродвигателем M1 и, соответственно, положением платформы. Кнопка SB3 служит для запуска процесса послойного отверждения фотополимера. По завершению засветки последнего слоя изделия пьезокерамический излучатель BA1 издает короткий оповещающий сигнал. Светодиод HL1 сигнализирует о наличии карты памяти в разьеме XP1. Если микроконтроллер обнаруживает в карте памяти требуемый файл будущего трехмерного объекта, он зажигает светодиод HL2.

Погрешность работы устройства рассчитана по формулам, приведенным в [1] и составляет 0,1 мм. В настоящий момент происходит тестирование некоторых узлов устройства и программного обеспечения. При их удачном завершении будет произведена полная сборка и обкатка с целью выявления конструктивных недоработок и их устранения. В случае успешных испытаний возможна организация мелкосерийного производства, разработанного 3D - принтера в рамках импортозамещения в связи с реиндустриализацией страны, развитием инновационного промышленного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вейко В.П., Губанов Д.Л. Анализ схем доставки лазерного излучения // Известия РАН. Серия физическая. - 1997. - т.61. - № 8. - С. 1619-1626.
2. Обзор лучших 3D принтеров /отдел «Тесты и обзоры». – Режим доступа: <http://www.tehnoobzor.com/>.

© М. М. Бузиков, М. П. Егоренко, И. Н. Карманов, 2016

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ ПВЗ ЗА СЧЕТ КОМБИНИРОВАНИЯ РАЗНЫХ МЕТОДОВ

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирский НИИ Метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, начальник сектора «траекторных измерений», тел. (913)458-07-81, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Александр Алексеевич Вараксин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры метрологии, стандартизации и сертификации

В настоящей работе приведены результаты сравнительного анализа прогнозов ПВЗ полученных разными методами. Показаны основные преимущества сводного прогноза ПВЗ по данным результатов отдельных методов.

Ключевые слова: Земля, вращение, координаты полюса, методы прогноза.

THE ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF INCREASE OF ACCURACY OF FORECASTS ERP DUE TO THE COMBINATION OF DIFFERENT METHODS

Victor M. Tissen

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Novosibirsk, 4 Pr. Dimitrova, Cand. tehn. Sciences, beg. sector «trajectory measurements», tel. (913)458-07-81, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Alexander A. Varaksin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student of the Department of Metrology, Standardization and Certification

This paper presents the results of a comparative analysis of forecasts EOP obtained by different methods. The basic advantages of the composite according to the OBP forecast results of the individual methods.

Key words: earth rotation, polar coordinates, methods of forecasting.

С выходом человека в космическое пространство и дальнейшим развитием космических технологий гражданского и военного назначения актуальность информации о ПВЗ значительно возросла. Если во времена астрооптических измерений звездного времени и географической широты достаточно было определять значение ПВЗ с периодичностью порядка 5-7 суток, то в настоящее время с развитием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) необходимы уже ежесуточные определения. При этом, во много раз выросли требования к точности определяемых параметров. Так, в тактико-технических требованиях на эфемеридно-временное обеспечение (ЭВО) ГЛОНАСС, записано, что СКП прогнозов всемирного времени $UT1$ на 15 дней (вернее поправки часов: $dUT1 = UT1 - UTC$, необходимой для перехода от шкалы всемирного времени к шкале универсального координированного времени UTC) не должна превосходить 1,5 мс, а для координат полюса x_p , y_p не более 0,01 с дуги [1].

В перспективе постоянное совершенствование методов и алгоритмов учета поправок за задержки распространения радиосигналов в атмосфере и аппаратуре, за влияние многопутности и более точного учета других мешающих факторов и сил, действующих на КА, неизбежно будет приводить к непрерывному росту требований к качеству прогнозов ПВЗ. Выполнение этих растущих требований уже сегодня выходит за рамки возможностей отдельных методов. Поэтому, в последнее время все большее внимание уделяется так называемым комбинированным методам, частично включающим в себя возможности всех других методов, вследствие объединения по определенным правилам получаемых с их помощью прогнозов.

Проблемы, возникающие при прогнозировании ПВЗ условно можно разделить на две основные группы. Первая группа обусловлена многообразием действующих на Землю сил и факторов, приводящих к сложным и зачастую непредсказуемым изменениям всех ПВЗ. Ко второй группе следует отнести недостатки статистических методов, начиная от обычного Фурье анализа с последующей аппроксимацией методом наименьших квадратов (МНК) наиболее значимых гармоник и кончая использованием нейронных сетей и моделей на основе нечёткой логики. Несмотря на появление новых все более изощренных методов прогноза проблема остается до конца не решенной. Тем не менее, в настоящее время статистические методы применяются во всех мировых службах времени, в том числе и в МСВЗ. Это связано с тем, что создание аналитической модели вращения Земли на основе дифференциальных уравнений Эйлера-Лиувилля с учетом всех действующих сил невозможно из-за неполноты сведений о процессах, происходящих в земных недрах. Вместе с тем при упрощении моделей внутреннего строения Земли наибольшее развитие получила теория лунно-солнечных приливов, которая совместно со статистическими методами с успехом применяется для вычисления прогнозов всемирного времени.

Сложные случаи при расчете прогнозов возникают в местах, где в результате наложения квазипериодических колебаний различной частоты и амплитуды возникают минимумы и максимумы суммарного колебания. При этом, в точках минимума (точки бифуркации) условия для определения параметров отдельных гармонических составляющих значительно ухудшаются ввиду их взаимной компенсации, а также вследствие относительного увеличения вклада нестационарных изменений по сравнению с предсказуемыми регулярными изменениями. В частности, для всемирного времени на 15 день отклонение прогноза может достигать 3-5 мс при использовании любого метода прогноза.

В движении северного полюса наиболее заметны свободное чандлеровское и вынужденное годовое колебания. Основная проблема состоит в том, что параметры этих колебаний крайне неустойчивы. Так, например, с периодом прядка 40 лет происходит изменение фазы чандлеровского колебания на 180 градусов. Кроме этого, спектр циклических перемещений полюса содержит большой набор частот близких к основной частоте чандлеровского колебания около 1,19 года, а также к годовому периоду [2].

Поскольку заранее трудно определиться с выбором наиболее подходящих методов прогноза в различных случаях, то целесообразно рассмотреть возможности улучшения качества прогнозов за счет комбинирования результатов, полученных разными методами. Выбор какой-либо одной наилучшей модели или комбинации моделей затруднителен, как вследствие наличия в ПВЗ нестационарных изменений, так и в силу ограниченности их применения к различным изменениям временного ряда.

Основная цель формирования сводного прогноза за счет осреднения состоит в уменьшении методических и случайных погрешностей прогнозирования. Из 11 методов прогноза, представленных, в проводящемся в настоящее время, международном пилотном проекте: ЕОРСРРР.

Для проведения статистического анализа выбраны методы с лучшими результатами. На первом этапе вычислялись сводные прогнозы по лучшим методам, которые затем комбинировались с результатами остальных участников ЕОРСРРР. После этого выбирались комбинации с меньшими погрешностями. Наиболее интересные результаты комбинированных прогнозов всемирного времени показаны на рис. 1.

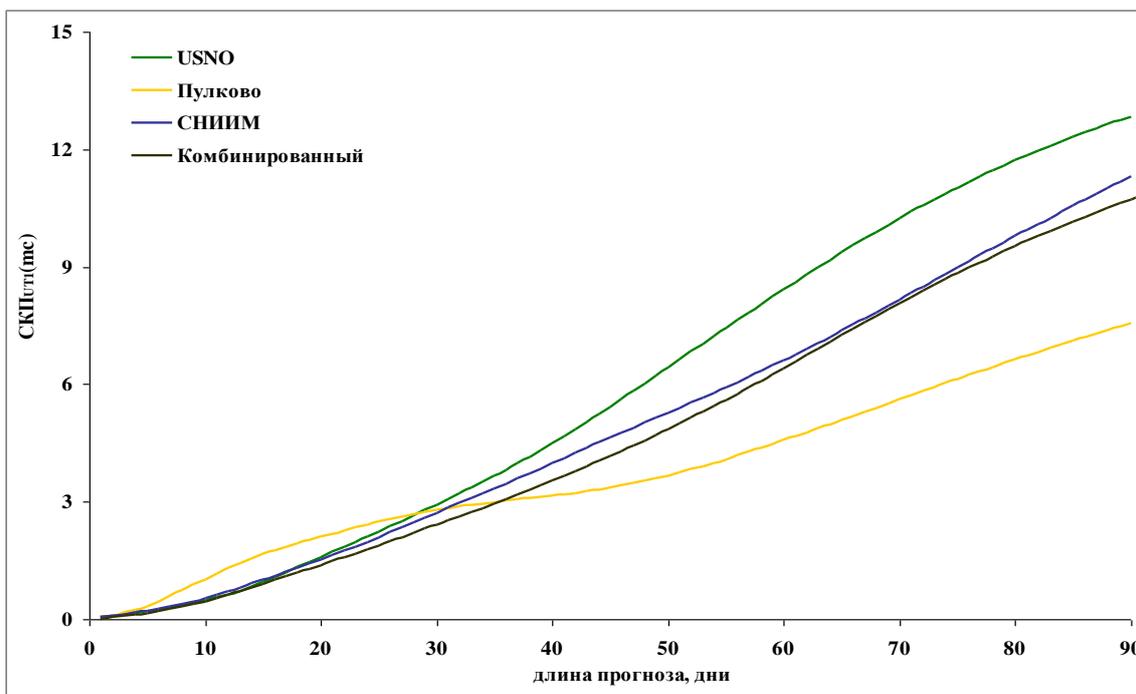


Рис. 1. Сравнение СКП прогнозов всемирного времени за 2014 г.

Анализируя приведенный на рис. 1 графики погрешностей прогнозов всемирного времени участников ЕОРСРРР, следует отметить, что лучшим является комбинированный прогноз, составленный по правилу простого арифметического среднего. Отсюда можно сделать вывод о том, что в данном случае ошибки методов, которые были использованы при осреднении результатов, частично компенсировались, что доказывает целесообразность применения комбиниро-

вания методов для повышения точности прогнозов всемирного времени. На рис. 2 и 3 показаны СКП прогнозов координат полюса различных служб в сравнении с USNO и комбинированным прогнозом.

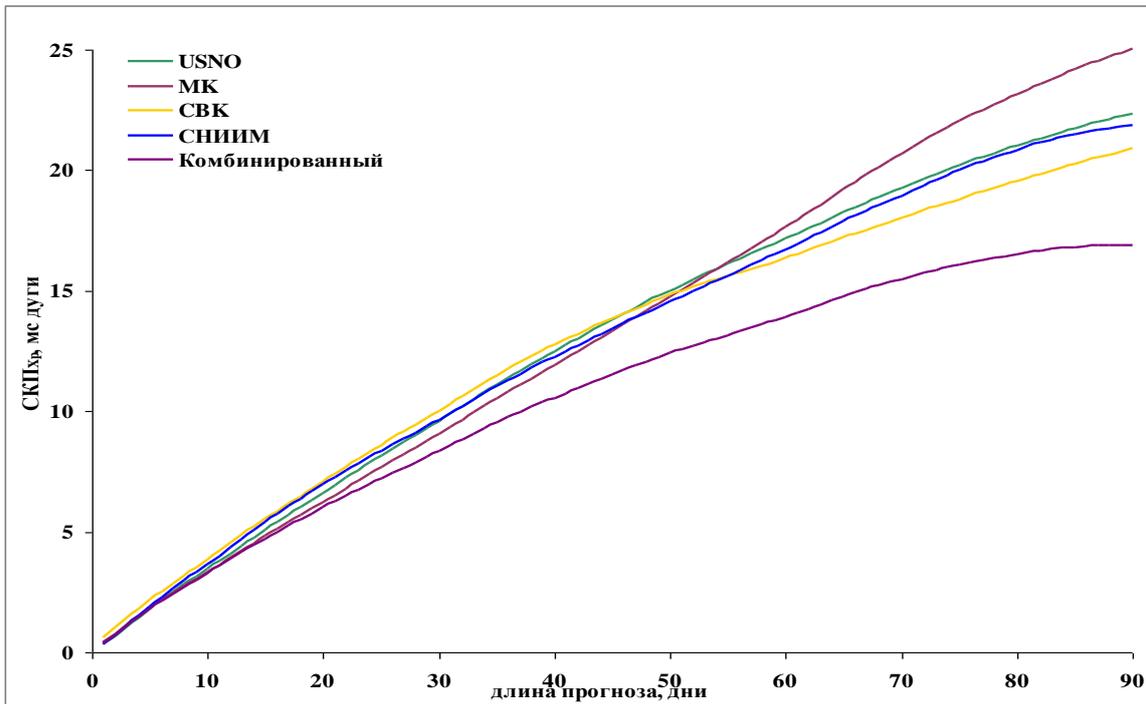


Рис. 2. Сравнение СКП прогнозов координаты полюса x за 2014 г.

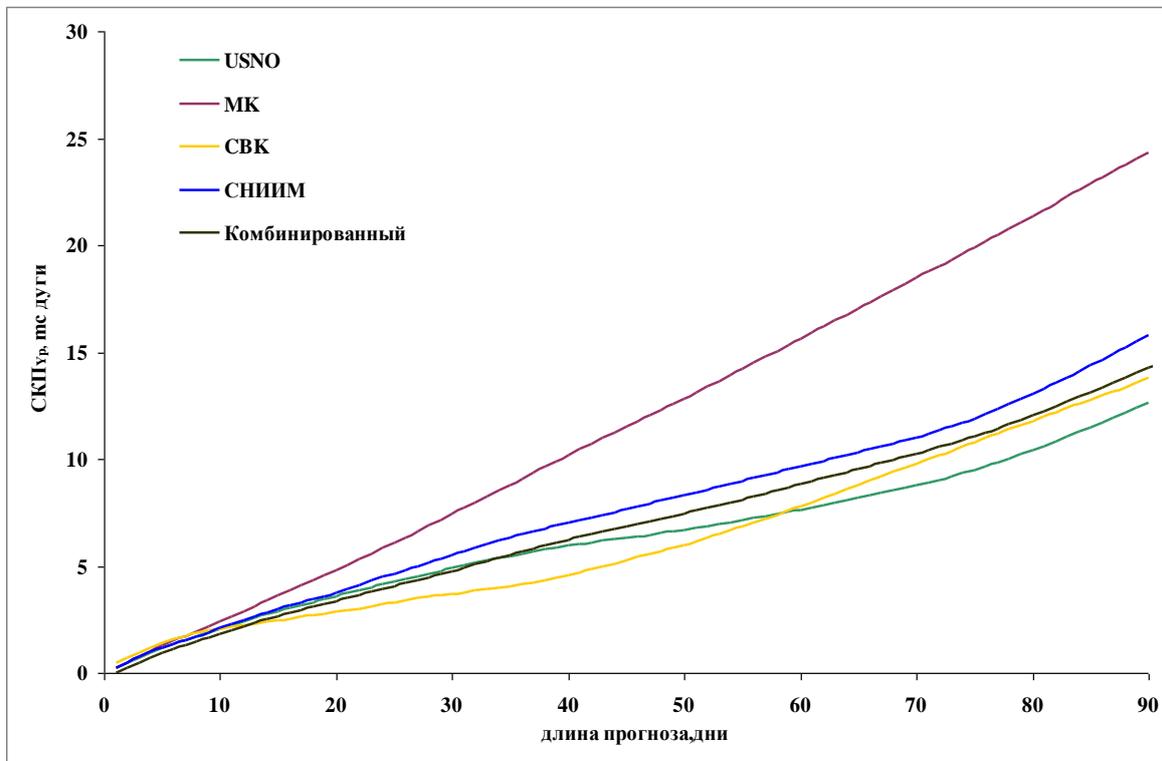


Рис. 3. Сравнение СКП прогнозов координаты полюса y_p за 2014 г.

Анализируя графические данные, приведенные на рис. 1-3 можно сделать вывод о том что, полученные результаты показывают целесообразность применения комбинирования методов для повышения точности прогнозов всемирного времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программа "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 - 2020 годы".
2. Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. Исследование основных составляющих в движении полюса земли, 2002, Изв. ГАО, №214, с.

© В. М. Тиссен, А. А. Вараксин, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАЛИБРОВКИ ЛАЗЕРНЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Михаил Сергеевич Малыгин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, магистрант 2-го года обучения института естественных наук, тел. (912)263-64-54, e-mail: mihail.malygin@gmail.com

Владимир Иванович Шлычков

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной физики, тел. (343)240-68-55, e-mail: perspektiva@ru66.ru

Определена ошибка измерения толщины при совместной работе двух триангуляционных устройства с использованием набора эталонов и калибровки по методу наименьших квадратов. Приведены результаты измерений в зависимости от числа эталонов и количества измерений.

Ключевые слова: калибровка, смещение лазерного пятна, толщина эталона, ошибка измерения.

RESEARCH OF THE CALIBRATION EFFICIENCY OF LASER TRIANGLE DEVICES

Mikhail S. Malygin

Ural Federal University named after the first president of Russia B. N. Eltsin, 620002, Russia, Ekaterinburg, 19 Mira St., undergraduate of the 2nd year of education of natural sciences institute, tel. (912)263-64-54, e-mail: mihail.malygin@gmail.com

Vladimir I. Shlychkov

Ural Federal University named after the first president of Russia B. N. Eltsin, 620002, Russia, Ekaterinburg, 19 Mira St., Ph. D., associate professor of computer physics, tel. (343)240-68-55, e-mail: perspektiva@ru66.ru.

Thickness gauging error has been detected under joint operation of two triangulation devices with use of standards set and calibration by the least squares method. The measurement results are demonstrated subject to number of standards and quantity of measurements.

Key words: on-line calibration, displacement laser spot, standart thickness, error compensation.

В работе рассматриваются вопросы калибровки двух лазерных триангуляционных устройств у которых излучение, сформированные полупроводниковыми излучателями с формирующей оптикой направлено перпендикулярно сверху и снизу относительно контролируемой поверхности. Сформированные излучением на контролируемой поверхности световые метки, фиксируются линейными приемниками. Калибровка предназначена для установления зависимости между проведенными замерах в устройстве и контролируемым разме-

ром. Ранее для калибровки уже использовались два эталона последовательно устанавливаемые на нижнюю границу зоны измерения [1], последовательная калибровка триангуляционных измерителей, а затем всего устройства [3]. Перечисленные способы обеспечили работу в узкой зоне измерения. В данной работе рассматривается способ минимизации ошибки измерения толщины t относительно толщины эталона $t_{\text{эт}}$ с использованием метода наименьших квадратов МНК.

Структурная схема лазерного триангуляционного толщиномера приведена на рисунке.

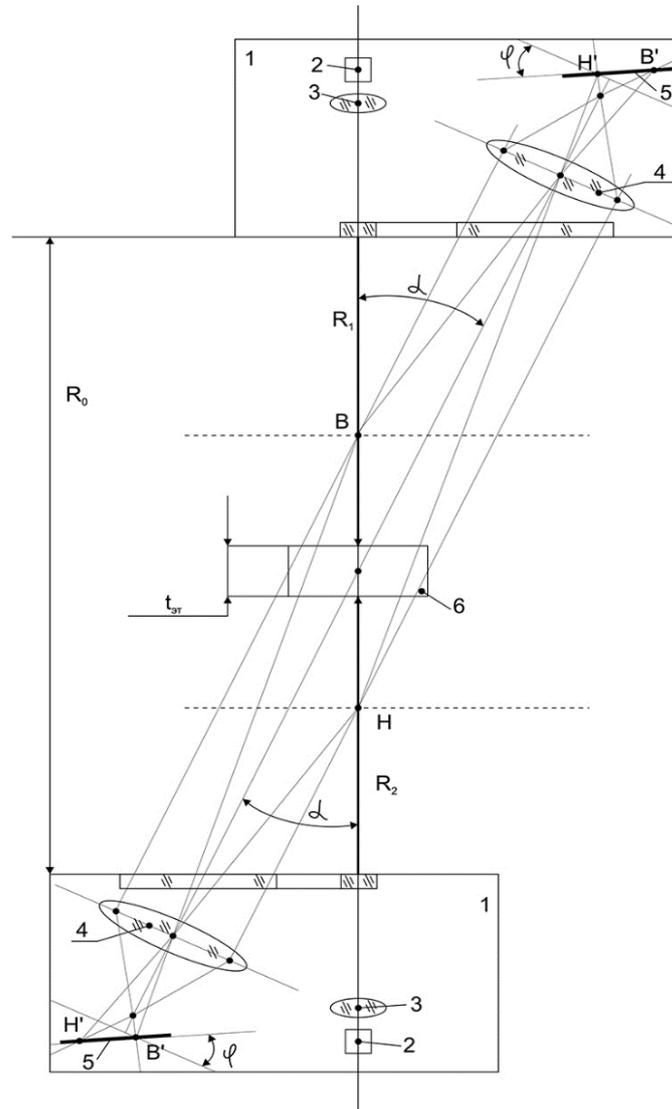


Рис. Структурная схема лазерного триангуляционного толщиномера:

1 - лазерные триангуляционные устройства, 2- полупроводниковые излучатели, 3- формирующая оптика, 4-приемный объектив, 5- линейный приемник, 6-эталон толщины. R_0 - расстояние между верхним и нижним триангуляционными измерителями, (R_0 - база толщиномера), R_1 – расстояние от верхнего триангуляционного измерителя до поверхности эталона, R_2 – расстояние от нижнего триангуляционного измерителя до поверхности эталона, $t_{\text{эт}}$ - толщина эталона, α - угол триангуляции, φ - угол Шемпфлюга. В - верхняя, Н - нижняя границы зоны измерения

Толщиномер был разработан [1] и изготовлен для измерения проката толщиной от 3 до 15 мм при его движении на стане со скоростью 30-60 м/мин. Погрешность измерения ξ должна быть не более 20 мкм. Как следует из рис 1, толщину измерения можно рассчитать, как

$$t = R_0 - (R_{1i} + R_{2i}), \quad (1)$$

где R_0 – база толщиномера, R_{1i} , R_{2i} – расстояния от верхнего и нижнего триангуляционного измерителя до контролируемой поверхности, соответственно.

Расстояния R_{1i} , R_{2i} для i -ого измерения аппроксимируем:

$$R_{1i} = k_1 n_{1i} + b_1, \quad (2)$$

$$R_{2i} = k_2 n_{2i} + b_2, \quad (3)$$

где k_1 , k_2 - угловые коэффициенты, b_1 , b_2 – свободные члены, n_{1i} , n_{2i} – номера элементов, зафиксированные линейными приемниками.

Для определения номеров элементов при считывании видеосигналов в триангуляционных устройствах использовался метод «порога» [2], при котором пороговый уровень устанавливался автоматически и соответствовал $\sim 20\%$ от максимального значения видеосигнала.

Соотношение (1) с учетом (2) и (3), можно записать, как:

$$t = (R_0 - b_1 - b_2) - k_1 n_{1i} - k_2 n_{2i} = C - k_1 n_{1i} - k_2 n_{2i}. \quad (4)$$

Для определения коэффициентов $C=(R_0-b_1-b_2)$, k_1 и k_2 необходимо выполнить калибровку устройства.

Для этого эталон толщины $t_{эТ}$ устанавливают в калибровочное устройство [3] на одной из границ зоны измерения, фиксируют номера n_{1i} и n_{2i} , вычисленные верхним и нижним триангуляционным измерителями. Затем эталон смещается на величину δ (~ 3 мм.) с фиксацией номеров n_{1i} , n_{2i} . Вышеперечисленная последовательность операций повторяется для всех эталонов $1 \leq i \leq M$ и всех $1 \leq j \leq k$ измерений.

Для расчета коэффициентов C , k_1 и k_2 используем метод наименьших квадратов (МНК),

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (t_{эм_i} - t_i)^2 = \min \quad (5)$$

где N – число замеров при калибровке, i -ое измерение толщины t_i , $t_{эм_i}$ -толщина i -го эталона. В соответствии с рекомендациями по МНК [4] можно записать:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (t_{эм_i} - (C - k_1 n_{1i} - k_2 n_{2i}))^2 = \min \quad (6)$$

Чтобы найти минимум функции (6), надо вычислить производные по каждому из коэффициентов и приравнять их к нулю. В нашем случае уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial C} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_1} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_2} = 0 \quad (7)$$

После преобразований (7) получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} CN - k_1 \sum_{i=1}^N n_{1i} - k_2 \sum_{i=1}^N n_{2i} &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \\ C \sum_{i=1}^N n_{1i} - k_1 \sum_{i=1}^N (n_{1i})^2 - k_2 \sum_{i=1}^N n_{1i} \cdot n_{2i} &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \cdot n_{1i} \\ C \sum_{i=1}^N n_{2i} - k_1 \sum_{i=1}^N n_{1i} \cdot n_{2i} - k_2 \sum_{i=1}^N (n_{2i})^2 &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \cdot n_{2i} \end{aligned} \quad (8)$$

Для решение системы уравнений (8) использованы два пакета программ Mathcad [5] и Maxima [6]. Результаты вычислений этими программами совпадают. Коэффициенты имеют значения: $k_1 \approx -7.52$, $k_2 \approx -8.007$, $C \approx -24856.019$.

Результаты измерения толщины в соответствии с (1), линейной аппроксимацией расстояний R_{1i} (2), R_{2i} (3), и калибровке по трем эталонам, показали ошибку измерения ξ до 400 мкм на краях зоны измерения и ξ до 200 мкм в середине.

В связи с этим аппроксимируем соотношения (2) и (3) квадратичными зависимостями,

$$R_{1i} = b_1 + k_1 n_{1i} + g_1 n_{1i}^2 \quad (9)$$

$$R_{2i} = b_2 + k_2 n_{2i} + g_2 n_{2i}^2, \quad (10)$$

где g_1 и g_2 – коэффициенты при квадратичных членах.

Соотношение (1) с учетом (9) и (10) примет вид:

$$t = C - k_1 n_{1i} - k_2 n_{2i} - g_1 n_{1i}^2 - g_2 n_{2i}^2 \quad (11)$$

В соответствие с методом решения для МНК имеем:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (t_{эм_i} - (C - k_1 n_{1i} - k_2 n_{2i} - g_1 n_{1i}^2 - g_2 n_{2i}^2))^2 = \min \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial C} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_1} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_2} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial g_1} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial g_2} = 0 \quad (13)$$

После преобразований (13) получим систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 CN - k_1 \sum_{i=1}^N n_{1i} - k_2 \sum_{i=1}^N n_{2i} - g_1 \sum_{i=1}^N n_{1i}^2 - g_2 \sum_{i=1}^N n_{2i}^2 &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \\
 C \sum_{i=1}^N n_{1i} - k_1 \sum_{i=1}^N (n_{1i})^2 - k_2 \sum_{i=1}^N n_{1i} \cdot n_{2i} - g_1 \sum_{i=1}^N n_{1i}^3 - g_2 \sum_{i=1}^N n_{1i} \cdot n_{2i}^2 &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \cdot n_{1i} \\
 C \sum_{i=1}^N n_{2i} - k_1 \sum_{i=1}^N n_{1i} \cdot n_{2i} - k_2 \sum_{i=1}^N (n_{2i})^2 - g_1 \sum_{i=1}^N n_{1i}^2 \cdot n_{2i} - g_2 \sum_{i=1}^N n_{2i}^3 &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \cdot n_{2i} \\
 C \sum_{i=1}^N n_{1i}^2 - k_1 \sum_{i=1}^N n_{1i}^3 - k_2 \sum_{i=1}^N n_{1i}^2 \cdot n_{2i} - g_1 \sum_{i=1}^N n_{1i}^4 - g_2 \sum_{i=1}^N n_{1i}^2 \cdot n_{2i}^2 &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \cdot n_{1i}^2 \\
 . C \sum_{i=1}^N n_{2i}^2 - k_1 \sum_{i=1}^N n_{1i} \cdot n_{2i}^2 - k_2 \sum_{i=1}^N n_{2i}^3 - g_1 \sum_{i=1}^N n_{1i}^2 \cdot n_{2i}^2 - g_2 \sum_{i=1}^N n_{2i}^4 &= \sum_{i=1}^N t_{эм_i} \cdot n_{2i}^2
 \end{aligned} \tag{14}$$

При решении системы уравнений (14) с использованием пакетов программ Mathcad [5] и Maxima [6]. и калибровки по трем эталонам были получены коэффициенты: $C = -26002.525$, $k_1 = -8.215$, $k_2 = -9.063$, $g_1 = 2.012 \cdot 10^{-4}$, $g_2 = 2.997 \cdot 10^{-4}$.

Результаты измерения толщины в соответствии с (1) и квадратичной аппроксимацией расстояний R_{1i} (9), R_{2i} (10) показали ошибку измерения ξ , не более 20 мкм в зоне измерения ~ 50 мм. При уменьшении числа эталонов до 2, погрешность измерения не изменилась.

Калибровка по способу численной минимизации требует исходные данные только значения толщин эталонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент RU № 2419068. Способ измерения толщины и устройство для его осуществления. / Шлычков В. И., Кислицын А. У., Тоцкий И. Т., Мулахметов И. Д. – Оpubл. БИ. № 14, 2011.
2. Шлычков В. И. Исследование точностных характеристик алгоритмов измерения координат в триангуляционных устройствах / В. И. Шлычков // Оптический журнал, 2005, № 6. с.73-76.
3. Патент RU № 2542633. Лазерный толщиномер и способ его калибровки. / Шлычков В.И., Кислицын А.У., Макаров К.В. – Оpubл. БИ. № 5, 2015.
4. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
5. PTC Mathcad [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad>. – Загл.с экрана.
6. Sourceforge.net [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maxima.sourceforge.net>. – Загл.с экрана.

© М. С. Малыгин, В. И. Шлычков, 2016

ВЛИЯНИЕ СЫРЬЕВЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТАЛЬКА НА КАЧЕСТВО ФОРСТЕРИТОВОЙ КЕРАМИКИ

Людмила Борисовна Воробьёва

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат химических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

Светлана Арсеньевна Степанова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79, e-mail: svetlana.himiya@mail.ru

В статье рассмотрено влияние сырьевых особенностей состава талька на качество форстеритовой керамики. Рекомендована модификация стеклофазы, обеспечивающая надежность вакуумно-плотных металлокерамических спаев.

Ключевые слова: форстеритовая керамика, сырье, микроструктура, тальк.

INFLUENCE OF RAW TALC FEATURES ON THE QUALITY OF CERAMICS FORSTERITE

Ludmila B. Vorobyeva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the chemical sciences, docent, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

Svetlana A. Stepanova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, docent, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-79, e-mail: svetlana.himiya@mail.ru

The article considers the influence of raw talc composition features the quality forsterite ceramics. Recommended glass phase modification that provides reliable vacuum-tight ceramic-metal junctions.

Key words: forsterite ceramics, raw, microstructure, talc.

Высокие механическая прочность, коэффициент термического расширения, близкий к титану, электрофизические характеристики, в том числе при повышенных температурах, обеспечили форстеритовой керамике широкое применение в изделиях электротехнической и электронной техники. Форстерит – ортосиликат магния ($2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$), не имеющий полиморфных форм и модификационных превращений. Он является конечным членом оливинового ряда твёрдых растворов.

Одним из основных сырьевых материалов при изготовлении форстеритовых керамик является природный минерал тальк – кристаллообразующий ком-

понент [1]. Тальк относится к подклассу слоистых(листовых) триоктаэдрических магнезиальных ортосиликатов состава $Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$. Остовом структуры талька являются сетки кремнекислородных тетраэдров, образованных тетраэдрами радикалов $[Si_2O_5]^{2-}$. Они располагаются параллельно друг другу и чередуются с плоскими сетками другого состава, образуя трехслойные 2:1 симметричные пакеты слоев: $\{(Si_2O_5)(OH)-Mg-(Si_2O_5)(OH)\}$. Два слоя тетраэдров обращены друг к другу вершинами, между ними в октаэдрических пустотах располагается магний. Суммарный заряд пакетов равен нулю. Образование плоского пакета можно выразить уравнением:



Тальк – оптически анизотропный минерал с показателями преломления: $n_\alpha = 1.538 - 1.550$; $n_\beta = 1.589 - 1.594$; $n_\gamma = 1.589 - 1.600$. Различная плотность упаковки атомов внутри слоя и между пакетами слоев обеспечивает тальку свойство двойного лучепреломления. Максимальное значение величины дву-преломления талька $\delta=0.051$. В структуре талька соседние пакеты скреплены слабыми остаточными электростатическими силами. Легко осуществляемые в природе, из-за малых сил связей между пакетами смещение (сдвиг) и разворот слоев друг относительно друга формирует тальк разных политипов с сингониями: моноклинной (чаще всего), гексагональной, ромбической, тригональной, триклинной. В качестве примесей тальк обычно содержит оксиды железа (II, III), алюминия, кальция, натрия, калия и воду. Химически чистый ортосиликат магния бесцветен. Цвет природного талька зависит от наличия в минерале элементов-хромофоров в первую очередь железа: в присутствии двухвалентного железа белый тальк приобретает зеленую окраску разной интенсивности, небольшая примесь трехвалентного железа обуславливает появление в окраске коричнево-серой составляющей.

В производстве форстеритовой керамики с высокими диэлектрическими свойствами используется тальк с минимальным содержанием оксидов натрия и калия, а содержание оксидов железа не должно превышать 1 масс.%. Применение природного минерала в качестве основного сырья неизбежно влечет за собой колебания состава и структуры керамики, что не может не отразиться на ее свойствах. В термохимическом процессе спекания керамики при протекании реакций в твердой фазе тальк имеет тенденцию к сохранению своих структурных особенностей, так как при нагревании не распадается на оксиды, а образует метасиликат магния и свободный кремнезем. В результате прослеживается тесная структурная взаимосвязь между исходным минералом и вновь образующейся кристаллофазой керамики. Тальк различных месторождений отличается не только составом (в части природы и содержания примесей), но и структурой. Политипический полиморфизм структуры талька может варьироваться даже в пределах одного месторождения.

В данной работе изучено влияние сырьевого минерала талька на микроструктуру форстеритовой керамики марки ВФ-52 и герметичность титано-

керамических сплавов. Использовался тальк двух маложелезистых месторождений: давно разрабатываемого стеатитового онотского (Восточные Саяны) и алгуйского (Кузбасская область), к разработке которого приступили в конце XX века. Состав и содержание примесей в различных партиях сырья может колебаться в значительных пределах и приведено в табл. 1.

Таблица 1

Состав проб талька разных месторождений
и потери при прокаливании (п.п.п.)

Примесь	Содержание примеси, масс. % для месторождений	
	Онотское	Алгуйское
SiO ₂	52,7 – 78,4 (ср. 59,7)	63,4 – 81,0 (ср. 68,9)
MgO	17,0 – 39,5 (ср. 32,8)	16,5 – 31,5 (ср. 25,9)
Al ₂ O ₃	0,1 – 0,7 (ср. 0,45)	0 – 0,4 (ср. 0,25)
Fe ₂ O ₃	0,3- 1,0 (0,85)	0 – 0,3 (ср. 0,15)
CaO	0 - 0,4 (0,14)	0 – 0,3 (ср. 0,05)
п.п.п.	2,8 – 5,4 (ср. 4,5)	2,5 – 5,0 (ср. 4,0)

Визуально онотский тальк представляет собой кусковую породу белого цвета с мелкой чешуйчато-волокнутой структурой и цветами плеохроизма от бледно-зеленого до серо-зеленого. В волокнутой структуре хорошо прослеживаются следы спайности, двупреломлением обладают в среднем 65% зерен (микроскопический анализ в иммерсии [4]). Показатели преломления $n_g=1,586$ и $n_p=1,542$, величина двупреломления $\delta = 0.044$. Одноосные (недвупреломляющие) зерна имеют близкую к кубической или округлую форму.

Тальк Алгуйского месторождения в природном состоянии белая или светло-серая глиноподобная масса, легко рассыпающаяся в тонкий порошок при растирании вручную. Зерна алгуйского талька более крупные, неправильной призматической формы с включением небольшого количества волокнутых зерен со следами спайности. Двупреломлением обладает большая доля зерен до 75-80 %. Алгуйский тальк подлежит обогащению методом флотации. Флотированный алгуйский тальк представляет собой мономинеральную разновидность, приближенную по содержанию основных оксидов к чистой разновидности талькового минерала, что подтверждается значениями показателей преломления $n_g=1,580$ и $n_p=1,538$. В обогащенном тальке содержание SiO₂ не более 65 масс.%, MgO не менее 30 масс.%. Такой тальк является высококачественным сырьем для производства вакуумно-плотной форстеритовой керамики.

С целью сравнения технологических свойств сырьевого талька двух месторождений применительно к производству вакуумно-плотной форстеритовой керамики были изучены процессы, происходящие при нагревании талька до температур близких к условиям спекания керамической массы: 1050, 1250

и 1370 °С. Изучение изменения структуры талька при этих температурах в конечном итоге дает возможность управлять синтезом форстерита с целью достижения требуемой микроструктуры и свойств керамики. Результаты наблюдений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение микроструктуры талька при нагревании

Наблюдаемые качества	Месторождение	До нагрева	Температура нагрева, °С		
			1050	1250	1370
Цвет талька	Онотское	Бледно-зеленый	Бледно-кремовый	Белый	Белый
	Алгуйское	Белый	Белый	Белый	Белый
Форма зерен в плоскости шлифа	Онотское	Волокнистая со следами спайности	Таблитчатая, округлая или неправильные квадраты. Без следов спайности	Таблитчатая, округлая или неправильные квадраты. Без следов спайности	Мелкие округлые
	Алгуйское	Крупные призматические с небольшой долей волокнистых включений; присутствует спайность	Основная форма - таблитчатая; встречаются неправильные квадраты и округлые	Основная форма - неправильные квадраты; отдельные таблитчатой формы	Мелкие округлые
Доля двупреломляющих зерен, %	Онотское	65	40-45	30-45	5-10
	Алгуйское	75-80	40-45	35-40	25-30
Цвета плеохроизма	Онотское	Бледно-зеленый; серо-зеленый	Ярко желтый, ярко-зеленый	Желтый-зеленый, красный-зеленый	Бледно-красный, бледно-синий
	Алгуйское	Ярко-желтый, ярко-зеленый, ярко-оранжевый, красно-зеленый	От желто-зеленого до сине-зеленого	От желто-зеленого до красно-синего	От желто-зеленого до красно-синего

Микроскопические исследования по методике [3,5] показали, что при температурной обработке в структуре талька изменяются размер и форма зерен и цвета плеохроизма. Волокнистая структура талька онотского месторождения при 1050°С трансформируется в чешуйчатую. При дальнейшем повышении температуры появляются зерна округлой формы; одновременно уменьшается как доля зерен, обладающих двупреломлением, так и величина двупреломления δ с 0,042 до 0,013. Начиная с 1200°С, первоначальные волокнистые агрегаты структуры переходят в мелкозернистое состояние с размерами зерен не более 2 мкм.

При нагревании алгуйского талька происходят изменения структуры аналогично онотскому тальку, но со сдвигом температуры начала изменения в сторону больших значений примерно на 100°. При максимальной температуре отжига в 1370°С в продуктах отжига исследуемых образцов талька полностью исчезают волокнистые и пластинчатые разновидности, образцы приобретают тонкозернистую структуру со слабым двупреломлением зерен, однако средний размер зерен больше, чем в случае онотского талька. Спекание форстеритовых изоляторов из керамических масс на основе талька онотского и алгуйского месторождений было выполнено при температурах 1350°С и 1370°С соответственно. Для керамики из алгуйского талька было увеличено время выдержки при максимальной температуре. Анализ микроструктуры полученной керамики показал, что установленным критериям микроструктуры, обеспечивающим получение надежных спаев с титаном, соответствует керамика из онотского талька. Для керамики из алгуйского талька характерны более крупные кристаллы форстерита, их большая неравнозернистость и пониженное содержание стеклофазы. Последнее должно отразиться на прочности спаев керамики с титаном. Испытание спаев с титаном для полученных образцов керамики показало значительное превышение брака по негерметичности для изделий из керамики на основе алгуйского талька в сравнении с керамикой из онотского талька: 13% и 1,5% соответственно.

На основании данных проведенного исследования особенностей сырьевого талька разных месторождений для получения керамики ВФ-52 установлено, что алгуйский тальк природного состава не позволяет получить герметичные спаи с титаном вследствие избыточного содержания SiO₂. Использование качественного низкопримесного талька Алгуйского месторождения для изготовления вакуумно-прочной керамики возможно после корректировки технологического режима приготовления шихты и ее состава с целью подбора содержания и свойств стеклофазы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакунов В. С., Лукин Е. С. Особенности спекания оксидной керамики // Стекло и керамика. – 2011, № 7. – С. 9-13.
2. Воробьева Л. Б., Зонова А. Д., Степанова С. А. Оценка погрешности измерений параметров микроструктуры керамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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.

3. Воробьёва Л. Б., Зонова А. Д., Степанова С. А. Состав и размеры стеклофазы в микроструктуре корундовой керамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. выставка и науч. конгр. «Электронное геопропространство на службе общества» : сб. материалов (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГГА, 2015. Т. 2. – С. 202–206.

4. Воробьёва Л. Б., Зонова А. Д., Степанова С. А. Влияние способа получения оксида магния на микроструктуру форстеритовой керамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 115–120.

© Л. Б. Воробьёва, С. А. Степанова, 2016

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЕЙ НА СИСТЕМЕ «КВАНТИМЕТ 720»

Геннадий Владимирович Шувалов

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

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Анна Дмитриевна Зюнова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Изложены результаты поэтапного решения объектно-ориентированных задач метрологического обеспечения измерений размеров частиц аэрозолей, создания и внедрения инновационных технологий измерений на примере использования системы «Квантимет 720». Возможно расширение диапазона измерений аэрозольных частиц в субмикронную область, включая наноаэрозоли.

Ключевые слова: аэрозоль, частицы, методика измерений, измерительная система «Квантимет 720».

MEASUREMENT PROCEDURE OF AEROSOL PARTICLE SIZE ON THE «QUANTIMET 720» SYSTEM

Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. of Tech. Sci., director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Anna D. Zonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Cand. of Tech. Sci., associate professor of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

The results of the step-by-step solutions of object-oriented tasks metrological support of measurements of aerosol particle size, creation and implementation of innovative technologies on the example of the use of «Quantimet 720» measurement system are described. It is possible to expand of measurements range of aerosol particles to the submicron region, including nanoaerosol.

Key words: aerosol, particles, measurement procedure, «Quantimet 720» measurement system.

Многие вопросы оптики аэрозоля требуют знания распределения частиц аэрозоля по размеру. В частности, вопросы, возникающие при изучении особенностей распространения лазерного излучения в атмосфере, самой атмосферы и ее верхних слоев.

Измерения размеров несферических частиц аэрозоля микроскопическим методом или по фотографиям представляют собой очень трудоемкий процесс и требуют большого количества времени.

С целью ускорения процесса измерений, снижения трудоемкости и повышения защищенности процесса измерений была разработана методика измерений размеров частиц аэрозоля и вычисления распределения частиц по размерам на системе «Квантимет 720» [1].

В работе приведены результаты исследования распределения частиц тонкого микропорошка окиси алюминия марки М7 (ГОСТ Р 52381-2005 [2]) по радиусам. Измерение площади частиц проводилось на системе «Квантимет 720» по разработанной методике. Измеренные значения площадей частиц передавались по защищенному каналу на ЭВМ, где последовательно обрабатывались. При этом вычислялись числовые характеристики распределения, плотность вероятностей распределения частиц по радиусам и интегральная функция распределения частиц по радиусам [3].

Измерение площади частицы. Измерение площади отдельной частицы на системе «Квантимет 720» проводилось следующим образом.

Частицы микропорошка окиси алюминия напылялись на предметное стекло микроскопа. Для этого был применен метод электростатического распыления одноименно заряженных частиц. Затем оптическое изображение проектировалось на фотокатод сканера и преобразовывалось в видеосигнал.

С помощью двух порогов А и В модуля 2D Автодетектор «вырезалось» такое сечение видеосигнала, чтобы размер видеоизображения частицы совпадал с размером протектированного изображения (рис. 1).

Для этого использовался так называемый «метод мерцания», то есть попеременное проецирование на экран дисплея видеоизображения и протектированного изображения.

«Световым пером» выделялось изображение одной из частиц, и измерялась её площадь в точках изображения (ТИ). Полученное число вводилось в

память ЭВМ и обрабатывалось по разработанной программе и запоминалось. Затем «световым пером» выделялось изображение другой частицы, измерялась её площадь и т.д.

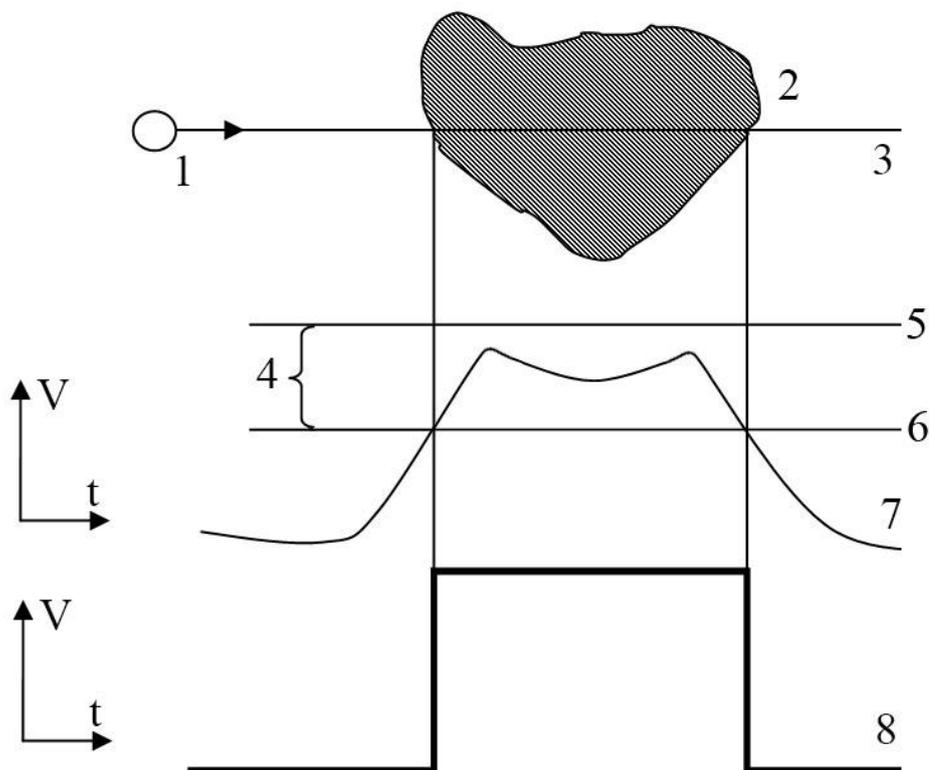


Рис. 1. Обработка видеоизображения объекта:

1 – сканирующее пятно; 2 – изображение объекта; 3 – линия сканирования; 4 – «сечение»; 5 – порог А; 6 – порог В; 7 – видеосигнал; 8 – продетектированный сигнал

Калибровка. Система «Квантимет 720» прокалибрована в точках изображения. Все площади, периметры и другие параметры измеряются в ТИ. Поэтому для калибровки в абсолютных единицах необходимо только найти линейный эквивалент длины образца в ТИ для применяемой оптической системы.

В качестве эталона при калибровке использовалась линейная мира ОМП № 663983 ГОСТ 7513-75 [4] с ценой деления 10 мкм. Было получено, что для данной оптической системы изображение 80 мкм миры имело размер на экране 700 ТИ. Отсюда коэффициент K будет равен

$$K = (700 \text{ т.и.} / 80 \text{ мкм})^2 = 76,5625 \text{ т.и.} / \text{мкм}^2 ,$$

то есть в 1 мкм² содержится 76,5625 ТИ.

Режим работы программы и расчетные формулы. Разработанная программа «DiRadius» предназначена для последовательной обработки данных, вводимых с системы «Квантимет 720», получения числовых характеристик распреде-

ления, плотностей вероятностей распределения частиц по радиусам и интегральной функции распределения частиц.

Перед началом работы требуется ввести несколько чисел, определяющих режим работы программы, то есть

$S_1 = 0$ – обработка данных (ввод данных с системы «Квантимет 720»);

$S_1 = 1$ – проверка программы (ввод чисел с клавиатуры калькулятора);

$K = 70,5625$ – коэффициент, равный количеству ТИ в 1 мкм²;

$R_7 = 1$ – нижний предел распределения частиц по радиусам, мкм;

$R_8 = 6$ – верхний предел распределение, мкм;

$C = 0,25$ – ширина ячейки гистограммы для нахождения плотностей вероятностей распределения, мкм.

В программе вычисляются характеристики распределения частиц, имеющих эффективный радиус R_i в полуинтервале (R_7, R_8) . Кроме того, считается число частиц, имеющих эффективный радиус R_7 и R_8 .

Программа составлена таким образом, что позволяет прервать ввод данных с Квантимет 720, распечатать числовые характеристики распределения или таблицу распределения частиц по ячейкам (плотности вероятностей распределения) и гистограмму, а затем продолжить ввод данных.

Эффективный радиус частицы R_i (мкм) вычисляется по формуле:

$$R_i = \sqrt{\frac{B}{\pi K}}, \quad (1)$$

где B – площадь частицы в ТИ.

В программе насчитываются пять чисел R_1, R_2, R_3, R_4 и N :

$$R_1 = \sum_{i=1}^N R_i, \quad R_2 = \sum_{i=1}^N R_i^2, \quad R_3 = \sum_{i=1}^N R_i^3, \quad R_4 = \sum_{i=1}^N R_i^4, \quad R_N = \sum_{i=1}^N R_i^N, \quad (2)$$

где N – число частиц, а также минимальный R_{MIN} и максимальный R_{MAX} радиуса частиц.

По этим числам вычисляются все характеристики распределения. Первые четыре момента распределения $M_1 \div M_4$ вычисляются по формулам [3]:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i; & M_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \right)^2; \\ M_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i^3 - \frac{3}{N} \sum_{i=1}^N R_i \cdot \sum_{i=1}^N R_i^2 + 2 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \right)^3; \\ M_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i^4 - \frac{4}{N^2} \sum_{i=1}^N R_i \cdot \sum_{i=1}^N R_i^3 + \frac{6}{N} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^N R_i^2 - 3 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \right)^4. \end{aligned} \quad (3)$$

Среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{\bar{x}}$, СКО σ_x отдельных результатов x_i измерения относительно среднего \bar{x} и коэффициент вариации V вычисляются по формулам:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}; \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad V = \sigma_x / \bar{x}. \quad (4)$$

Средний $\langle R1 \rangle$, среднеквадратический $\langle R2 \rangle^{1/2}$ и среднекубический $\langle R3 \rangle^{1/3}$ вычисляются по формулам:

$$R1 = R_1 / N; \quad R2 = \sqrt{R_2 / N}; \quad R3 = \sqrt[3]{R_3 / N}. \quad (5)$$

Кроме того, вычисляются коэффициенты асимметрии A_s и эксцесса E_x , характеризующие отклонение распределения от нормального

$$A_s = \mu_3 / \sigma^3; \quad E_x = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (6)$$

где μ_3 – третий центральный момент; μ_4 – четвёртый центральный момент.

При $N = 1$ коэффициенты асимметрии и эксцесса не вычисляются. Одновременно насчитывается массив $P[Y]$, характеризующий плотности вероятностей распределения частиц:

$$Y = INT\left(\frac{R_i - R_7}{C} + 1\right); \quad P[Y] = P[Y] + 1. \quad (7)$$

где $Y = 1 \div 100$ – номер ячейки; $INT(X)$ – целая часть X ; $P[Y]$ – число частиц в ячейке под номером Y .

Результаты измерений. Из всех пяти упаковочных мест полученной партии тонкого микропорошка окиси алюминия марки М7 ГОСТ Р 52381-2005 [2] были взяты пробы и проведены измерения.

Полученные числовые характеристики каждого из 5-ти распределений, а также суммарного распределения по формуле (8) приведены в табл. 1. В той же таблице (п. 15) приведены результаты определения зернового состава микропорошка [1].

Из таблицы видно, что средний радиус частиц равен приблизительно 2,933 мкм, дисперсия – около 0,626 мкм.

Так как коэффициенты асимметрии A_s и эксцесса E_x близки к нулю, то распределение можно аппроксимировать нормальной функцией $f(R)$:

$$f(R) = A_s \cdot e^{-((R-2,933)/0,791)^2}. \quad (8)$$

Результаты измерений параметров частиц

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение параметра	Проба					
			1	2	3	4	5	Σ
1	Число частиц	N	1000	1000	1000	1000	1000	5000
2	Минимальный радиус частиц, мкм	R_{MIN}	1.579	1.001	1.069	1.042	1.005	1.001
3	Средний радиус, мкм	$\langle R1 \rangle$	3.044	2.947	3.047	2.821	2.806	2.933
4	Среднеквадратический радиус, мкм	$\langle R2 \rangle$	3.107	3.048	3.157	2.923	2.948	3.038
5	Среднекубический радиус, мкм	$\langle R3 \rangle$	3.171	3.142	3.258	3.019	3.078	3.136
6	Максимальный радиус, мкм	R_{MAX}	5.384	5.529	5.808	5.626	5.772	5.808
7	Дисперсия (2-ой момент), мкм ²	$M2$	0.384	0.605	0.680	0.587	0.820	0.626
8	3-й момент распределения, мкм ³	$M3$	0.155	0.086	0.084	0.087	0.180	0.093
9	4-й момент распределения, мкм ⁴	$M4$	0.488	1.035	1.293	1.028	1.858	1.178
10	Среднее квадратическое отклонение (СКО), мкм	σ_x	0.620	0.778	0.825	0.766	0.905	0.791
11	СКО относительно среднего \bar{x} , мкм	σ_x	0.620	0.025	0.026	0.024	0.029	0.011
12	Коэффициент вариации	V	0.204	0.264	0.271	0.272	0.323	0.270
13	Коэффициент асимметрии	A_s	0.650	0.182	0.150	0.193	0.242	0.188
14	Коэффициент эксцесса	E_x	0.299	-0.172	-0.207	-0.016	0.236	0.004
15	Содержание основной фракции, 0.7–5 мкм	–	58,3%	46,3%	52,9%	47,1%	40,2%	47,7%
16	Содержание комплексной фракции, 0.7–3 мкм	–	76,6	73,7	67,9	77,9	70,5	73,7
17	Содержание мелкой фракции, < 3 мкм	–	1.8	2.0	2.2	3.7	8.3	3.2
18	Содержание предельной и крупной фракции, 0.14–7 мкм	–	21.6	24.3	29.9	18.4	21.2	23.1

Содержание основной фракции составляет 47,7 % (радиусы частиц $2,5 \text{ мкм} \leq R_i < 3,5 \text{ мкм}$), а зерновой состав соответствует порошку марки М7-П [2].

Результаты вычисления плотностей вероятностей суммарного распределения частиц по радиусам (% *REL FREQ*) и интегральная функция распределения частиц по радиусам (*S*, %) приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что в 8-й ячейке содержится 666 частиц, имеющих эффективный радиус в диапазоне $2,75 \text{ мкм} \leq R_i < 3 \text{ мкм}$, что составляет 13,3 % от общего числа частиц равного 5000. При этом 54,8 % частиц имеют радиус менее 3 мкм.

Таблица 2

Результаты вычислений параметров частиц

№ ячейки	Нижний предел эффективного радиуса	Количество частиц в ячейке	Плотности вероятностей суммарного распределения частиц по радиусам (% <i>REL FREQ</i>)	Интегральная функция распределения частиц по радиусам (<i>S</i> , %)
1	1.00	64	1.3	1.3
2	1.25	98	2.0	3.2
3	1.50	183	3.7	6.9
4	1.75	251	5.0	11.9
5	2.00	273	7.5	19.4
6	2.25	490	9.8	29.2
7	2.50	616	12.3	41.5
8	2.75	666	13.3	54.8
9	3.00	604	12.1	66.9
10	3.25	501	10.0	76.9
11	3.50	402	8.0	85.0
12	3.75	284	5.7	90.6
13	4.00	208	4.2	94.8
14	4.25	115	2.3	97.1
15	4.50	79	1.6	98.7
16	4.75	29	0.6	99.3
17	5.00	18	0.4	99.6
18	5.25	11	0.2	99.8
19	5.50	6	0.1	100.0
20	5.75	2	0.0	100.0

На рис. 2 приведена гистограмма распределения частиц по радиусам.

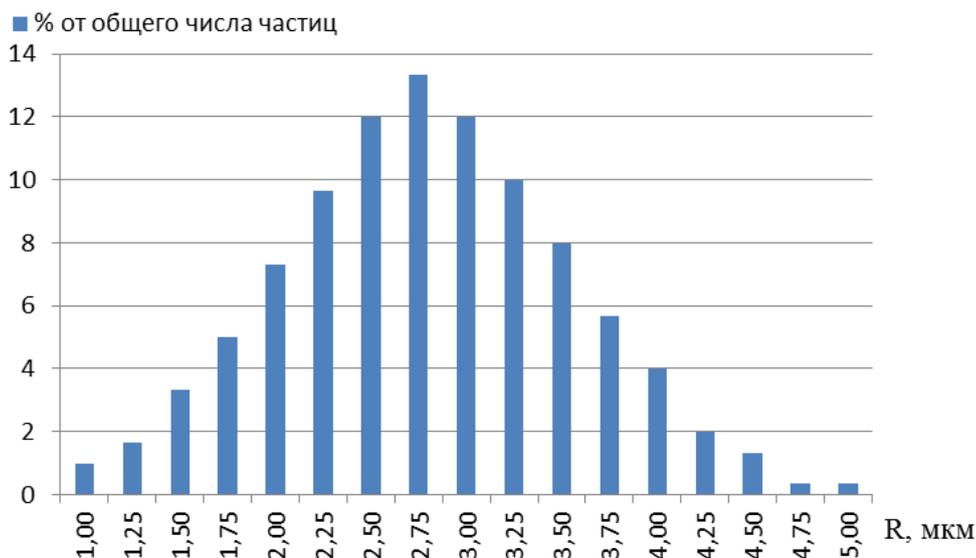


Рис. 2. Гистограмма распределения частиц по радиусам

Кроме того, составлена программа для построения гистограммы и кривой нормального распределения по формуле (9), приведенная на рис. 3 (средний радиус частицы $\sim 2,933$ мкм, стандартное отклонение $0,791$ мкм).

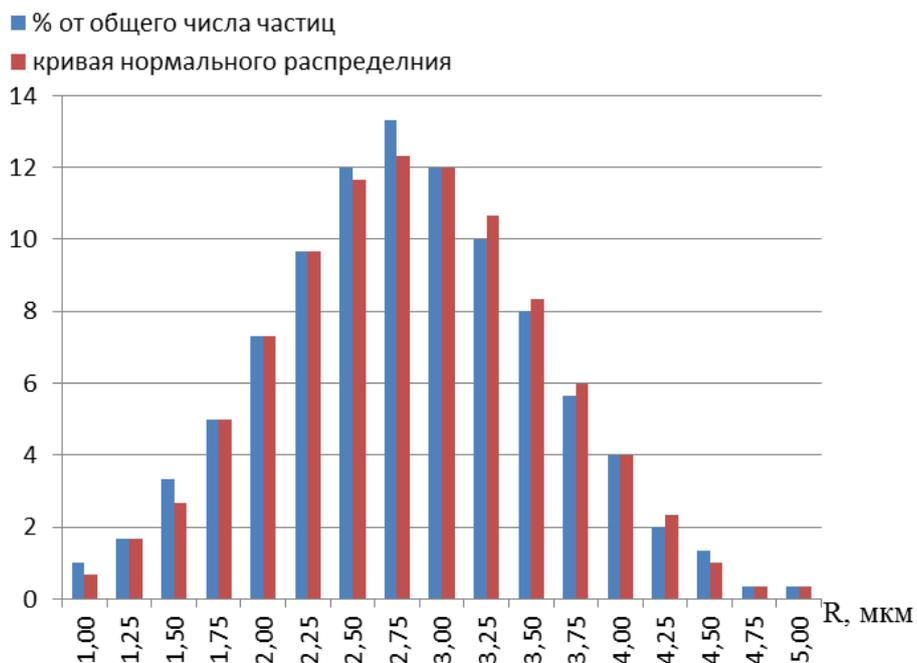


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц

Также были проведены измерения размеров частиц под микроскопом. При этом, определение эквивалентного диаметра частицы проводилось следующим образом. Измерялся размер частицы по четырем направлениям через центр тяжести изображения частицы и составляющим угол 45° друг с другом. Затем вычислялся среднегеометрический диаметр частицы. Средний радиус (по трёмстам частицам) составил 3,2 мкм (проба была взята из 1-го упаковочного места).

Средний радиус частиц (по тысяче частиц), измеренный на системе «Квантимет 720», составил 3,04 мкм. Расхождение между результатами измерений двумя названными методами составило около 5 %.

Оценка точности измерений. При измерении площади частиц на системе «Квантимет 720» основными источниками погрешностей являются [1, 5]:

- а) погрешность установки порога детектирования;
- б) шумы, связанные с «размазыванием» протектированного уровня вокруг заданного порога;
- в) нелинейность сканера;
- г) погрешности калибровки;
- д) возможные искажения при передачи информации на ЭВМ пользователя;
- е) точность работы всей системы.

При этом игнорируются ошибки, связанные с взятием пробы и подготовкой образца для исследования, а также оптические aberrации.

Рассмотрим источники погрешностей более подробно.

а) Неверная установка порога детектирования является наиболее частым источником систематической погрешности в системе «Квантимет 720» [1]. При использовании «метода мерцания» можно получить погрешность не более 1 ТИ на периметр детали (при измерении площади).

По данным, приведенным в работе [5], погрешность измерения площади объекта, имеющей диаметр $1/20$ диагонали экрана, не превышает 2 %, а для деталей с диаметром более $1/10$ диагонали – $\pm 0,5$ %. Для данной оптической системы средний размер частицы на экране составлял 1,5 см (общее увеличение $2500\times$), при размере диагонали экрана 37,5 см, то есть $1/25$. Отсюда погрешность измерения площади не должна превышать 3–5 %.

б) Шум будет проявляться как случайное «размазывание» протектированного уровня вокруг заданного порога. Другими словами, при последующих одно за другим сканированиях, деталь может быть протектирована вдоль различных периметров и будет, очевидно, иметь различные размеры. Влияние шума зависит от контраста и освещенности и легко оценивается наблюдением за изменением показаний системы «Квантимет 720» при последующих сканированиях. Эта погрешность составляет менее 1 %.

в) Нелинейность сканера дает несмещенную случайную погрешность, так что усредненной погрешностью обычно можно пренебречь.

г) Погрешность калибровки является систематической погрешностью, так как система «Квантимет 720» – это полностью цифровое устройство (то есть

предусмотрена только одна калибровка, а именно, размер точки изображения). В данном случае эта погрешность составляет менее 0,5 %.

д) После процесса детектирования данные передаются по защищенному каналу передачи, построенному с учетом рекомендаций, что исключает ошибки.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что суммарная погрешность измерения площади частицы составляет менее 12 %. Если же учитывать данные, приведённые в работе [5], то суммарная погрешность составляет менее 5–7 %.

Выводы.

1. Разработана методика измерений размеров частиц на системе «Квантимет 720».

2. Составлена программа для вычисления числовых характеристик распределения частиц и плотностей вероятностей распределения частиц по радиусам.

3. Проведены измерения параметров распределения частиц тонкого микрораспыла марки М7 окиси алюминия. Получено распределение по 5000 частицам; средний эффективный радиус составил $\sim 2,93$ мкм, дисперсия $\sim 0,626$ мкм²; содержание основной фракции (диаметром 5–7 мкм) – 47,7 %.

4. Проведенная оценка точности измерений показала, что погрешность не превышает 7–12 %.

5. При небольшом изменении программы обработки возможно получение параметров распределения частиц по площадям или периметрам частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Quantimet 720 Image Analysing Computer // Image Analysis Company, Ltd. (Imanco). – 1970. – 18 p.

2. ГОСТ Р 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава: нац. стандарт РФ. – Введ. 01.07.2006. – М.: Стандартинформ, 2006. – 15с.

3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 831 с.

4. ГОСТ 7513-75. Объект-микрометр. Технические условия. – Введ. 01.01.1976. – Взамен ГОСТ 7513-55. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 10 с.

5. Fisher C. The New Quantimet 720 / C. Fisher // Microscope. – V. 19. – January, 1971.

© Г. В. Шувалов, О. В. Минин, И. В. Минин, А. Д. Зонова, 2016

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ИСКАЖЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗИСТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Софья Евгеньевна Протасова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии и технологии оптического производства

Разработан тестовый модуль, позволяющий провести отработку методов (двухзондовый и четырехзондовый) контроля технологических процессов в микроэлектронике с целью обеспечения качества на производстве.

Ключевые слова: тестовый модуль, двухзондовый метод, четырехзондовый метод, интегральные микросхемы.

EVALUATION FACTORS INTEGRATED PRECISION DISTORTION VALUE RESISTORS IN THE PROCESS OF MANUFACTURING ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

Sofia E. Protasova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Post-graduate student

Designed a test module that enables to conduct testing of methods (two - and four - probe) for control of technological processes in microelectronics in order to ensure the quality of the workplace.

Key words: test module, the two-probe method, four-probe method, integrated circuits.

В настоящее время с ростом требований к увеличению производительности интегральных схем (ИС) появилась потребность разработки методов контроля технологических процессов в микроэлектронике с целью обеспечения решения указанных задач, выбор новых архитектурных решений, а так же разработка тестовых структур для анализа и контроля различных конструктивных и технологических параметров интегральных элементов.

Однако, вместе с этим, вопросы надежности выпускаемых схем становятся еще более актуальными, так как несовершенство производства, нововведения могут приводить к появлению новых физических механизмов отказа.

Поэтому на полупроводниковых фабриках для поддержания качества производительности ИС, проводится разработка методов по анализу вновь возникающих типов отказов и увеличению надежности выпускаемой продукции и разработка тестовых структур позволяющих использовать уже известные методы.

Основные факторы, определяющие годность ИС:

– Технологические факторы

- Факторы проектирования
- Случайные точечные дефекты на схеме

На основе изучения и анализа существующих методов контроля различных тестовых структур были разработаны тестовые структуры (разработан тестовый модуль T297 с набором тестовых структур, представленный на рисунке) для анализа и контроля различных конструктивных и технологических параметров сопротивления различных конструктивно-технологических вариантов интегральных резисторов из высокоомных слоёв.

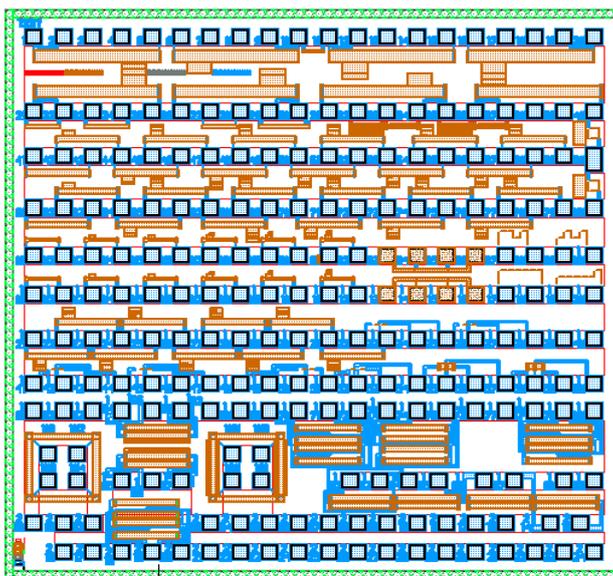


Рис. Топология тестового кристалла T297

Данный тестовый модуль (T297) также позволяет определить степень влияния конструкции резисторов на их параметры и оптимальное сопротивление.

Контактные площадки выполнены в слое металлизации. Разработанные тестовые структуры служат для измерения сопротивления различных конструктивно-технологических вариантов интегральных резисторов двухзондовым и четырехзондовым методами для высокоомного поликремниевого резистора.

Таким образом, разработка и последующее исследование тестового кристалла позволяет:

- проверить работоспособности схемы источника опорного напряжения;
- определить стабильность получаемых параметров резисторов;
- измерить параметры транзисторов, полученных в результате изготовления кристалла по данной технологии.

Отрабатывая методы контроля и анализа тестовых структур (двухзондовый и четырехзондовый методы) с использованием изготовленного на производстве тестового модуля T297 из высокоомного поликремния, можно сделать выводы об эффективности метода, а так же качестве выпускаемой ИС, принять различ-

ные конструктивно-технологические решения и улучшить производительность выпускаемой ИС.

Были разработаны правила проектирования, на основании которых созданы тестовые модули Т297 с набором тестовых структур для измерения различных конструктивно-технологических вариантов интегральных резисторов, отработки конструктивных решений, отладки и контроля качества технологического процесса.

На основе анализа информации, полученной из отечественных и зарубежных источников, а так же в процессе проведения отработки метода и разработки, а так же исследования тестового модуля, были сформулированы основные принципы конструирования и технологии изготовления, обеспечивающие разработку и создание интегральных резисторов, создание прецизионных аналоговых интегральных схем.

Результаты измерений позволили определить величины ухода геометрических размеров по X и Y как при изготовлении фотошаблона, так и при формировании интегральных резисторов на кристалле интегральной микросхемы, а так же величину искажения сопротивления резисторов от номиналов в зависимости от их конфигурации.

Результаты измерений тестовых структур модуля Т297 показали, что двухзондовый и четырехзондовый методы позволяют определять сопротивление с высокой точностью в различных режимах, а также другие параметры, которые задаются в перечне электрофизических параметров (ЭФП). Перечень ЭФП задается техническим заданием, для каждой микросхемы техническое задание индивидуально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Могэб К., Фрейзер Д., и др. Технология СБИС: В 2х кН. Кн.1//Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986.
2. Могэб К., Фрейзер Д., и др. Технология СБИС: В 2х кН. Кн.2//Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986.
3. Сивченко А.С., Кузнецов Е.В. Методики анализа основных характеристик надежности в КМОП ИС с помощью тестовых структур в составе пластин // Нано – и микросхемная техника, №6 . - 2014. Т. 2. - С. 7-15.
4. Андреев А.С., Скорняков С.П., Предельно допустимая импульсная мощность и импульсный ресурс работы ограничителей напряжения. //Тезисы докладов конференций. Новые технологические процессы обеспечивающие прогресс производства полупроводниковых приборов. Ч.2.- М.:ЦНИИ “Электроника”

© С. Е. Протасова, 2016

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НЕКОТОРЫХ 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 метрологии и технологии оптического производства, 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, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Мария Геннадьевна Клековкина

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», 644043, Россия, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 2, доцент кафедры физики, тел. (381)231-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Екатерина Андреевна Костенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант

В статье проведен анализ нормативно-методической базы определения параметров нефтепродуктов.

Ключевые слова: нефтепродукты, анализ, стандарты.

METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS OF SOME PARAMETERS OF OIL PRODUCTS

Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. Tech. Sci. of sciences, director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Maria G. Klekovkina

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., engineer, tel. (383)210-12-65

Olga A. Yasyrova

Omsk institute FGBOU VPO «NGAVT's» water transport, 644043, Russia, Omsk, 2 Ivan Alekseev St., associate professor of physics, tel. (381)231-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Ekaterina A. Kostenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student

The article analyzes the regulatory and procedural framework determining the parameters of petroleum products.

Key words: petroleum products, analysis, standards.

При разработке и производстве нефтепродуктов для обеспечения их качества широко используется контроль физико-химических показателей нефтепродуктов. По закону производитель обязан гарантировать заданное качество нефтепродуктов, поэтому при их применении контроль практически не производится. Росстандарт осуществляет плановые проверки качества нефтепродуктов, однако, межрегиональные территориальные управления (МТУ) Росстандарта, в функции которых входит проверка качества реализуемых нефтепродуктов, не обладая необходимой инструментальной базой для проведения комплексных проверок реализуемых нефтепродуктов, не в состоянии осуществлять постоянный мониторинг качества топлива, реализуемого на рынке.

Вместе с тем, повсеместная практика применения нефтепродуктов свидетельствует, что их качество, в большинстве регионов России, отличается от стандартного, в основном, из-за нарушения условий транспортировки и хранения.

В этой связи возникает необходимость постоянного контроля качества нефтепродуктов в местах их хранения и продажи. Однако не все методы, используемые при анализе параметров нефтепродуктов, могут удовлетворять требованиям возможности проведения анализа на месте использования нефтепродукта (полевые условия).

В этой связи рассмотрим нормативно-методическую базу проведения испытаний нефтепродуктов, существующую на настоящий момент в России.

Обязательные требования к качеству товарных нефтепродуктов устанавливает технический регламент "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту», а методы испытаний определяет «Перечень национальных стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента» [1].

Поскольку Перечень включает множество методов испытаний в виде национальных стандартов, проанализируем эти методы только для дизельного и судового топлива, а также мазута.

Нормативно-методическая база определения параметров указанных топлива приведена в табл. 1-3.

Таблица 1

Нормативно-методическая база определения параметров дизельного топлива

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля серы	ГОСТ Р 51947-2002 Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии	Спектрометр Спектроскан SL Анализатор СИМ-6
Температура вспышки в закрытом тигле	ГОСТ 6356-75 Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле	Анализатор СИМ-5
Фракционный состав	ГОСТ 2177-99 Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава (метод А)	Анализатор СИМ-10
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов	ГОСТ Р EN 12916-2008 Определение типов ароматических углеводородов в средних дистиллятах. Метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с обнаружением по показателю преломления	Нет
Цетановое число	Экспресс-метод	Анализатор СИМ-3
Смазывающая способность	ИСО 12156-1-Оценка смазывающей способности на испытательном стенде с помощью устройства возвратно-поступательного движения высокой частоты (HFRR)	Нет
Предельная температура фильтруемости	ГОСТ 22254-92 (ЕН 116) Топливо дизельное. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре	Нет

Таблица 2

Нормативно-методическая база определения параметров мазута

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля серы	ГОСТ Р 51947-2002 Нефть и нефтепродукты. Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии	Спектрометр Спектроскан SL Анализатор СИМ-6
Температура вспышки в открытом тигле	ГОСТ 4333-87 Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле	Анализатор СИМ-5
Содержание сероводорода	ГОСТ Р 53716-2009 Топлива жидкие. Определение сероводорода	Нет

Таблица 3

Нормативно-методическая база определения параметров судового топлива

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля серы	ГОСТ 1437-75 Нефтепродукты темные. Ускоренный метод определения серы	Анализатор СИМ-6
Температура вспышки в закрытом тигле	ГОСТ 6356-75 "Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле"	Анализатор СИМ-5

Из анализа данных табл. 1-3 видно, что для использования существующей нормативно-методической базы определения параметров нефтепродуктов в полевых условиях имеется ряд приборов различного уровня исполнения по техническим показателям.

Вместе с тем, имеется ряд показателей и соответствующих национальных стандартов, необеспеченных средствами измерений для проведения анализов в полевых условиях, в частности: определение сероводорода, определение предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре, оценка смазывающей способности.

Таким образом, в статье проведен сравнительный анализ нормативно-методической базы определения параметров нефтепродуктов и выявлен ряд показателей и соответствующих национальных стандартов, необеспеченных сред-

ствами измерений для проведения анализов в полевых условиях. В этой связи актуальным является разработка анализаторов экспресс-анализа следующих показателей нефтепродуктов: определение сероводорода, определение предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре, оценка смазывающей способности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Шувалов Г.В. Сравнительный анализ средств измерений показателей нефтепродуктов, применяемых для подтверждения Технического регламента / Г.В.Шувалов, В.Н. Половинкин, И.В. Клековкин, М.Г. Клековкина, О.А. Ясырова //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. -2014. - №3. – С. 119-123.

*© Г. В. Шувалов, И. В. Минин, О. В. Минин, М. Г. Клековкина,
О. А. Ясырова, Е. А. Костенко, 2016*

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ СТРАТЕГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ДО 2025 ГОДА

Геннадий Владимирович Шувалов

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

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Анна Дмитриевна Зонova

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Светлана Владимировна Ромасько

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В данной статье разработана стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года, направленная на обеспечение устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития и национальной безопасности Российской Федерации.

Ключевые слова: стратегия, обеспечение единства измерений, развитие, техническое средство, Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), Государственная служба стандартных образцов и свойств веществ и материалов (ГССО), Государственная служба стандартных справочных данных (ГСССД), федеральный государственный метрологический надзор.

KEY ASPECTS OF STRATEGIES FOR UNITY OF MEASUREMENTS IN THE RUSSIAN FEDERATION UNTIL 2025

Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. of Tech. Sci., director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Anna D. Zonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Cand. of Tech. Sci., associate professor of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Svetlana V. Romasko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., assistant department of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

This article has developed a strategy for ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation until 2025, aimed at ensuring sustainable and balanced socio-economic development and national security of the Russian Federation.

Key words: strategy, ensuring the uniformity of measurements, development, technical means, the State Service Time, Frequencies and determination of the Earth rotation parameters (SSTF), the State Service of Standard Samples and Properties of Substances and Materials (SSSS), the State Service for Standard Reference Data (SSSRD), the federal state metrological supervision.

Приоритеты, критерии и система целевых индикаторов Стратегии ОЕИ в Российской Федерации до 2025 года

В соответствии с [1], приоритеты развития системы обеспечения единства измерений (ОЕИ) Российской Федерации как инфраструктурной системы прежде всего связаны с решением задач социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности РФ. В области социально-экономического развития Российской Федерации основными приоритетами являются повышение конкурентоспособности национальной экономики, а также повышение качества жизни российских граждан путем гарантирования высоких стандартов жизнеобеспечения. Также приоритетами развития системы ОЕИ являются действия и мероприятия, направленные на решение системных проблем ОЕИ Российской Федерации [2].

На сегодня Действующая стратегия (Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 17 июня 2009 г. № 529 «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» [3]) устарела. Критериями правильности выбора путей совершенствования разрабатываемой системы ОЕИ является их соответствие векторам развития национальной экономики, приведенным в документах стратегического планирования РФ. К ним относятся:

- концентрация государственного предпринимательства в отраслях, связанных с обеспечением обороноспособности и национальной безопасности, развитием инфраструктуры;

- сокращение избыточной части государственного и муниципального секторов экономики;

- совершенствования государственно-частного партнерства;
- обеспечение равных условий конкуренции в тех секторах, где наряду с государственными функционируют частные компании;
- применение при планировании риск-ориентированных моделей развития;
- расширение механизмов саморегулирования.

Приведенные выше приоритеты с учетом позиционирования системы ОЕИ как инфраструктурной обеспечивающей системы требует введения ряда показателей и целевых индикаторов, характеризующих степень удовлетворенности граждан и хозяйствующих субъектов состоянием системы ОЕИ Российской Федерации [2].

Создание методологии и механизма изучения потребностей экономики и общества в измерениях

Для нормального развития обороноспособности, промышленности, науки, здравоохранения, энергетики, транспорта и других подсистем общества и элементов национальной экономики требуется опережающее развитие системы ОЕИ. Кроме того, система ОЕИ как высокотехнологичный элемент оказывает стимулирующее воздействие на этих подсистем. В условиях реализации прогноза социально-экономического развития Российской Федерации по инновационному сценарию, количество измерений в стране будет возрастать, а общество будет предъявлять все более высокие требования к достоверности и сопоставимости результатов измерений, и, прежде всего, в областях, связанных с повышением качества жизни, развитием новых технологий, а также обороны и безопасности государства.

Для организации правильного развития системы ОЕИ и метрологической инфраструктуры необходимо прогнозировать потребности государства и общества в измерениях. Мониторинг и анализ трендов развития приоритетных областей экономики, обороны и безопасности государства, должен формировать информацию об объектах и видах измерений, о требуемых точностных характеристиках.

Данная оценка позволила бы сформулировать научно обоснованные объемы средств, которые следовало бы инвестировать в развитие метрологической инфраструктуры. Экономически развитые страны вкладывают существенные средства в развитие метрологической инфраструктуры. По разным данным экономическая значимость измерений составляет от 0,8 % до 6,0 % ВВП. Наблюдается устойчивая корреляция между рейтингом «качества жизни» и инвестициями в инфраструктуру измерений. В нашей стране развитие метрологической инфраструктуры могло бы давать толчок развития других сфер экономики и формировать в них инновационные точки роста.

Результатом выполнения задач в области совершенствования нормативно-правовой базы должно стать создание совокупности законодательных актов (правового поля), обеспечивающей беспрепятственное развитие системы ОЕИ, необходимое для обеспечения инновационного пути развития национальной экономики, повышение качества жизни граждан и степени удовлетворённости

уровнем ОЕИ, легитимностью и эффективностью выполнения всех видов услуг в области ОЕИ.

Целью Стратегии в области развития эталонной базы на будущее десятилетие следует поставить удержание Россией лидирующих позиций (в первой пятерке стран) по количеству зарегистрированных калибровочных и измерительных возможностей во всех основных видах измерений, что необходимо для поддержки интеграционных процессов, обеспечивающих развитие социальной сферы и промышленности Российской Федерации [4].

Развитие системы ОЕИ в сфере обороны и безопасности государства

Для обеспечения возрастающих потребностей в обеспечении единства измерений в интересах войск (сил) и вооружения, военной и специальной техники сферы обороны и безопасности на период до 2025 года необходимо также решение большого числа специальных задач.

Развитие технической базы обеспечения единства измерений в сфере обороны и безопасности государства осуществляется в соответствии Государственным оборонным заказом, утвержденным Правительством РФ. Предлагается обратить внимание на выполнение задач по импортозамещению критически важных образцов измерительной техники [5].

Предложения по развитию ГСВЧ. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) обеспечивает потребности государства в информации о точном значении московского времени и календарной дате, а также в эталонных сигналах времени и частоты с использованием глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, спутниковых систем связи, радиосвязи, радиовещания и телевидения, а также в информации о параметрах вращения Земли с использованием согласованных каналов связи.

В структуре ГНСС ГЛОНАСС технические средства ГСВЧ образуют основу фундаментального сегмента, обеспечивая формирование и поддержание национальной шкалы времени, воспроизведение и хранение размеров единиц времени и частоты, а также определение параметров вращения Земли.

Поэтому основным стратегическим направлением развития ГСВЧ является развитие возможностей и технических параметров, обеспечивающих расширение внедрения отечественных спутниковых навигационных технологий и услуг с использованием системы ГЛОНАСС в интересах специальных и гражданских (в том числе коммерческих и научных) потребителей, международного использования российских спутниковых навигационных технологий за счет поддержания и развития системы ГЛОНАСС.

Предложения по развитию ГСССД. На 2016 и последующие (до 2025) годы должны быть проведены следующих мероприятий в части совершенствования деятельности Государственной службы стандартных справочных данных (ГСССД) как составляющей системы технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений (в соответствии с Подпрограммой 12 «Развитие системы технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений» Государственной программы Российской Федерации

«Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», принятой постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 328 [1, 6]):

а) формирование и актуализация проблемно-ориентированных информационно-программных комплексов (ИПК) ГСССД на основе:

- таблиц ССД;
- методик ГСССД и таблиц РСД;
- баз данных о свойствах веществ и материалов, включающих аттестованные в ГСССД справочные данные (АСД) для применения:
 - в метрологии, в том числе, для разработки и переопределения эталонов на основе фундаментальных физических констант;
 - в научных исследованиях и опытно-конструкторских разработках;
 - в производственных технологиях в нефтегазовом и топливно-энергетическом комплексах;
 - в области использования атомной энергии;
 - в химических технологиях;
 - в технологиях получения новых материалов, включая наноматериалы;

б) формирование механизмов внедрения данных в указанные выше технологии;

в) формирование и актуализация реестров таблиц ССД и методик ГСССД, в том числе, в электронном виде;

г) формирование и актуализация информационных баз данных по таблицам ССД и методикам ГСССД;

д) формирование и актуализация новых аттестованных методик ГСССД;

ж) получение обобщенных результатов выполнения межгосударственных Программ МГС по разработке Таблиц ССД на пространстве СНГ.

Получение соответствующих результатов предполагается с учетом «приоритетных направлений в области обеспечения единства измерений и видов измерений, для которых развитие измерительных технологий, обеспечение прослеживаемости измерений к первичным эталонам, их уровень и модернизация особенно актуальны».

Предложения по развитию ГССО

Стандартные образцы (СО) являются одними из наиболее широко распространенных и мобильных средств метрологического обеспечения измерений, применяемых в тысячах лабораторий организаций и предприятий страны. Мониторинг потребности в стандартных образцах, проведенный с 2010 по 2015 гг., свидетельствует об отсутствии в России более 2500 типов СО, необходимых для метрологического обеспечения измерений [7].

Опережающее развитие метрологического обеспечения измерений для приоритетных направлений развития науки, техники и технологий

В период до 2025 года деятельность в области обеспечения единства измерений должна быть сконцентрирована, в значительной степени, на фундаментальных и прикладных исследованиях по метрологии, разработке и совершенствовании государственных первичных и государственных вторичных (рабо-

чих) эталонов, работах по содержанию, применению и международному сравнению эталонов, разработке нормативных документов в области обеспечения единства измерений, других направлениях деятельности, в значительной степени связанных с решением актуальных измерительных задач приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и соответствующих им критических технологий, направленных на достижение стратегических национальных приоритетов Российской Федерации [8].

Повышение эффективности федерального государственного метрологического надзора

Эффективность федерального государственного метрологического надзора оценивается полнотой охвата надзором субъектов хозяйственной деятельности и уровнем соблюдения ими установленных метрологических правил и норм. В этой связи повышение эффективности федерального государственного метрологического надзора требует выполнения ряда мероприятий [9-14]:

- увеличение численности государственных инспекторов по обеспечению единства измерений до 1000 человек);

- применение при осуществлении надзора новых технологий, автоматизированных средств контроля;

- внедрение на предприятиях внутреннего метрологического надзора, результаты которого документируются, что позволит органам госнадзора сокращать время проверки;

- обучение и повышение квалификации государственных инспекторов по обеспечению единства измерений;

- органичное включение госнадзора в канал обратной связи системы управления обеспечением единства измерений;

- разработку программы повышения эффективности федерального государственного метрологического надзора с применением новых средств и методов ведения надзорных мероприятий;

- разработку программы целевых проверок состояния средств измерений и соблюдения метрологических правил и норм в приоритетных отраслях, в том числе в агропромышленном комплексе.

Ожидаемые результаты проведения мероприятий, предусмотренных Стратегией ОЕИ в Российской Федерации до 2025 года

Реализация мероприятий в области обеспечения единства измерений приведет [1-16]: к увеличению доли продукции, произведенной с помощью наукоемких технологий, до 55 % общего объема промышленной продукции, произведенной в Российской Федерации (4-6 % объема мирового рынка), а также позволит увеличить в 3-5 раз точность и расширить диапазоны измерений физических величин в большинстве областей науки и техники, в том числе при решении задач развития критических технологий Российской Федерации, в базовых отраслях реального сектора экономики, социальном и оборонном комплексах и на этой основе, по экспертным оценкам, обеспечить:

- в среднем на 5-20 % повысить уровень метрологического обеспечения на ряде важнейших направлений науки, техники и технологий (энергетика, элек-

троники, перспективные машины, технологии и производства, в т.ч. нанотехнологии, сверхпроводимость, новые сверхчистые материалы, информатика, экология, медицина и др.);

- ежегодную экономию электроэнергии только для целей освещения в объеме 2,5-3 млн. кВт·ч,;

- экономию в 300 млн. руб. в год при экспорте твердых и жидких топлив и 450 млн. руб. в год при экспорте природного газа при повышении точности измерений энергии сгорания;

- экономию в 4,5 млрд. руб. в год за счет снижения потерь при добыче, транспортировке и коммерческих операциях с нефтью;

- экономический эффект более 9 млрд. руб. в год в строительстве в результате внедрения эталонных мер теплопроводности;

- экономический эффект до 30 млрд. рублей, по оценкам военных специалистов, в результате повышения точности гидроакустических измерений в натуральных условиях на 3 дБ;

- экономию средств до 100 млн. руб. при закупке ультразвукового медицинского оборудования;

- значительное улучшение условий труда, охраны окружающей среды и техники безопасности, в т.ч. на ядерно-физических объектах и установках, а также медицинского обслуживания населения;

- снижение травматизма на 20 % за счет аттестации рабочих мест;

- снижение количества дорожно-транспортных происшествий на 10-15 %;

- повышение качества и конкурентоспособности отечественной продукции с выходом ее на мировой рынок.

Таким образом, изменения в Федеральном Законе № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» потребуют изменений соответствующих нормативных актов, таких как Постановления Правительства РФ от 23.09.2010 г. № 734, от 02.10.2009 г. № 780, от 02.11.2009 г. № 884, от 31.10.2009 г. № 879, от 15.06.2009 г. № 1057; Приказы Минпромторга России от 30.11.2009 г. № 1081, от 15.02.2010 г. № 122, от 02.07.2015 г. № 1815, от 25 июня 2013 г. № 970, от 16.03.2010 г. № 196; Положение о признании результатов калибровки при поверке средств измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений; Перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии» [4, 5, 7-16].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 г. № 328) [Электронный ресурс] // Система ГАРАНТ. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/70643464/#friends#ixzz42BBlsX4X>. – Загл. с экрана.

2. Российская Федерация. Законы. Федеральный Закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015 г.) [Электронный ресурс] // Консульт

тантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

3. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 17.06.2009 г. № 529 «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

4. Постановление Правительства Российской Федерации от 23.09.2010 г. №734 «Об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» [Электронный ресурс] // ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

5. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.10.2009 г. №780 «Об особенностях обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Паспорт подпрограммы 12 «Развитие системы технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений» государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>. – Загл. с экрана.

7. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.11.2009 г. №884 «Об утверждении Положения о Государственной службе стандартных образцов и свойств веществ и материалов» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

8. Постановление Правительства Российской Федерации от 31.10.2009 г. №879 «Об утверждении Положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

9. Приказ Минпромторга России от 30.11.2009 г. № 1081 «Об утверждении Порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа, Порядка утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений, Порядка выдачи свидетельств об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, установления и изменения срока действия указанных свидетельств и интервала между поверками средств измерений, требований к знакам утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений и порядка их нанесения» (зарегистрирован Минюстом России 25.12.2009 г. № 15866; с изм. от 30.09.2011 г. № 1326) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

10. Приказ Минпромторга России от 15.02.2010 г. № 122 «Об утверждении административного регламента исполнения Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии государственной функции по отнесению технических средств к средствам измерений» (зарегистрирован Минюстом России 22.03.2010 г. №16674) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

11. Приказ Минпромторга России от 02.07.2015 г. № 1815 «Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свиде-

тельства о поверке» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

12. Положение о признании результатов калибровки при поверке средств измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

13. Перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

14. Приказ Минпромторга РФ от 25 июня 2013 г. № 970 "Об утверждении Административного регламента по предоставлению Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии государственной услуги по утверждению типа стандартных образцов или типа средств измерений " (с изм. от 16.02.2015 г. № 268; от 14.12.2015 г. № 4040) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

15. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.06.2009 г. № 1057 «О порядке оплаты работ и или услуг по обеспечению единства измерений по регулируемым ценам» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

16. Приказ Минпромторга России от 16.03.2010 г. № 196 «Об утверждении методик расчета стоимости работ и (или) услуг по обеспечению единства измерений по регулируемым ценам» (зарегистрирован Минюстом России 20.04.2010 г. № 16940) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс; ФБУ «Ростест-Москва». – Режим доступа: <http://base.consultant.ru/>; <http://www.rostest.ru/services/metrology/obespechenie-edinstva-izmereniy/>. – Загл. с экрана.

© Г. В. Шувалов, О. В. Минин, И. В. Минин,
А. Д. Зонова, С. В. Ромасько, 2016

ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Геннадий Владимирович Шувалов

ФГУП «Сибирский НИИ метрологии», 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 метрологии и технологии оптического производства, 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, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Мария Геннадьевна Клековкина

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», Россия, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 2, доцент кафедры физики, тел. (381)231-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Екатерина Андреевна Костенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант

В статье проведен анализ средств измерений, применяемых при анализе нефтепродуктов по показателям содержание серы и температура вспышки, а также оценены возможности их импортозамещения.

Ключевые слова: импортозамещение, температура вспышки, содержание серы.

PROSPECTS OF MEASURING IMPORT SUBSTITUTION TO DETERMINE A QUALITY OF PETROLIUM PRODUCTS

Gennady V. Shuvalov

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. Tech. Sci. of sciences, director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Maria G. Klekovkina

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., engineer, tel. (383)210-12-65

Olga A. Yasyrova

Omsk institute FGBOU VPO «NGAVT's» water transport, Russia, Omsk, 2 Ivan Alekseev St., associate professor of physics, tel. (381)231-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Ekaterina A. Kostenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student

The article analyzes the measuring instruments used in the analysis of petroleum products in terms of sulfur content and flash point as well as the possibility of their estimated import.

Key words: import substitution, flash point, sulfur content.

В Российской Федерации действует технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту», который устанавливает обязательные требования к нефтепродуктам.

Большинство методов испытаний нефтепродуктов, которые применяются для подтверждения соответствия параметров нефтепродуктов требованиям указанного технического регламента, основаны на зарубежных стандартах ISO, ASTM и EN. Соответственно, и разнообразные средства измерений для определения показателей нефтепродуктов использовались, как правило, импортные. Это создавало различные трудности в использовании этих средств измерений как технического, так и экономического плана вследствие высокой стоимости оборудования, а также комплектующих и расходных изделий.

В начале 2014 года ряд западных стран объявили о введении жёстких санкций в отношении российской экономики. Это активизировало процесс импортозамещения в России, в том числе и на уровне государственной политики. Кроме того, в конце 2014 года курс рубля значительно снизился, что также создает хорошие предпосылки для импортозамещения в различных областях экономики. Это уже проявилось, во-первых, в снижении доли импорта и, во-вторых, высоких темпах роста выпуска отечественной продукции в ряде отраслей, ориентированных на внутренний рынок.

В этой связи рассмотрим основные возможности для импортозамещения методов и средств измерений, применяемых при анализе дизельного (судового) топлива по обязательным показателям технического регламента: содержание серы и температура вспышки.

Определение содержания серы в дизельном топливе проводится согласно ГОСТ Р 51947-2002 "Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии", в том числе и в случаях возникновения спорных ситуаций.

Для реализации метода ГОСТ Р 51947-2002 используют энергодисперсионные рентгеновские флуоресцентные анализаторы, если их конструкция включает следующие элементы:

- источник рентгеновского излучения с энергией выше 2,5 кэВ ;
- детектор рентгеновского излучения с разрешающей способностью, не превышающей 800 эВ.
- дисплей или принтер, регистрирующий показания содержания серы в процентах.

Кроме рассмотренного метода определения содержания серы может применяться метод, изложенный в ГОСТ Р 51859-2002 "Нефтепродукты. Определение серы ламповым методом".

Этот стандарт устанавливает метод определения массовой доли общей серы от 0,01 % до 0,4 % в жидких нефтепродуктах и присадках.

В настоящее время выпускается значительное количество разнообразных средств измерений для определения содержания серы в нефтепродуктах, которые основаны на указанных методах и производятся как в России, так и за рубежом. Данные об отечественных и импортных средствах измерений для определения массовой доли серы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные о средствах измерений для определения массовой доли серы в нефтепродуктах

Средство измерения	Страна производитель	Внешний вид средств измерений	Массо-габаритные показатели
RX-360SH Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор, ГОСТ Р 51947	Япония Фирма "Tanaka Scientific Ltd."		420x340x140 мм, 11 кг
АСЭ-2 Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор, ГОСТ Р 51947	Россия ООО "НПП "Буревестник", г.С.-Петербург		470x350x215 мм, 14кг
Спектроскан S(SL) Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор, ГОСТ Р 51947	Россия ООО "НПО "Спектрон", г.С.-Петербург		360x380x180 мм, 8,5кг

Средство измерения	Страна производитель	Внешний вид средств измерений	Массо-габаритные показатели
SLFA-20 Рентгенофлуоресцентный анализатор, ГОСТ Р 51947	Франция Фирма "Horiba / Jobin-Yvon" S.a.S.		250×407×138мм, 8 кг
FX-700 Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор, ГОСТ Р 52660	Япония Фирма "Tanaka Scientific Ltd."		660x520x550мм, 66кг
АСВ-1 Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор серы, ГОСТ Р 52660	Россия ООО "НПП "Буревестник", г.С.-Петербург		450x415x400мм, 45 кг
Спектроскан SW-D3 Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор серы, ГОСТ Р 52660	Россия ООО "НПО "Спектрон", г.С.-Петербург		530x480x340мм, 40кг - спектрометрический блок
SINDIE-OTG Волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализатор	США Компания X-Ray Optical Systems, Inc.		61x43x161 см, 82 кг
СИМ-6 Прибор для определения серы ламповым методом, ГОСТ 19121	Россия ФГУП «СНИИМ», г.Новосибирск		300x340x180мм, 10кг

Из таблицы видно, что большая часть приборов для анализа содержания серы реализует рентгенофлуоресцентный метод анализа и только один прибор – ламповый метод. Кроме того, из таблицы видно, что имеется достаточное количество отечественных средств измерений, в связи с чем импортозамещение в этой области может быть осуществлено без существенных препятствий.

Определение температуры вспышки в закрытом тигле для дизельного топлива проводится по ГОСТ Р ЕН ИСО 2719-2008 "Нефтепродукты. Методы

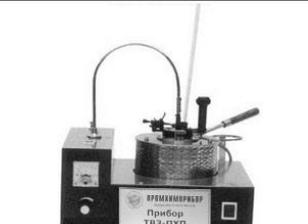
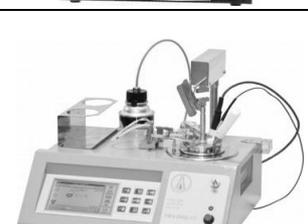
определения температуры вспышки в закрытом тигле Пенски-Мартенса", в том числе и в случаях возникновения спорных ситуаций.

Для реализации метода ГОСТ Р ЕН ИСО 2719 используют аппарат Пенски-Мартенса с закрытым тиглем. Обязательные требования к их конструкции изложены в приложении В к ГОСТ Р ЕН ИСО 2719.

Кроме рассмотренного метода определения температуры вспышки в закрытом тигле Пенски-Мартенса может применяться метод, изложенный в ГОСТ 6356-75 "Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле". Данные об отечественных и импортных средствах измерения для определения температуры вспышки нефтепродуктов представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что большая часть приборов реализует метод ГОСТ 6356 и только два прибора – метод ГОСТ Р ЕН ИСО 2719, вместе с тем это приборы отечественного производства.

Таблица 2

Данные о средствах измерений для определения температуры вспышки нефтепродуктов

Средство измерения	Страна производитель	Внешний вид средств измерений	Массо-габаритные показатели
Прибор ТВЗ (ГОСТ 6356)	Россия, компания "ПРОМХИМ-ПРИБОР"		490x220x275 мм, 10 кг
Аппарат ТВЗ-ПХП (ГОСТ 6356)	Россия, ООО "НПП "Буревестник", г.С.-Петербург		370x260x300 мм, 8 кг
ТВЗ-ЛАБ-11 Автоматический аппарат (ИСО 2719, ГОСТ 6356)	Россия ЗАО "Лабораторное Оборудование и Приборы", г.С.-Петербург		360x390x295 мм, 9 кг
ПЭ-ТВО Полуавтоматический аппарат (ГОСТ 6356)	Россия, компания "Экрос", г.С.-Петербург		307x255x153 мм, 5кг

Средство измерения	Страна производитель	Внешний вид средств измерений	Массо-габаритные показатели
Регистратор Вспышка-А (ГОСТ 4333 и ГОСТ 6356)	Беларусь, БМЦ		300x260x180 мм, 11 кг
АТВ-21 (ГОСТ 6356, ИСО 2719)	Россия, ОАО «Нефтехимавтоматика»		310x420x435 мм, 15кг
ISL FP 170 5G2 Автоматический (ИСО 13736)	США, Petroleum Analyzer Company (РАС)		250x50x520 мм, 20 кг.
СИМ-5 (ГОСТ 6356 или ГОСТ 4333-87)	Россия ФГУП «СНИИМ», г.Новосибирск		280x160x240 мм, 6 кг

Кроме того, из таблицы видно, что имеется достаточное количество отечественных средств измерений.

Таким образом, в статье проведен сравнительный анализ отечественных и импортных средств измерений, применяемых при анализе дизельного (судового) топлива по обязательным показателям технического регламента: содержание серы и температура вспышки.

В результате анализа выявлено, что имеется достаточное количество отечественных средств измерений, в связи с чем импортозамещение в этой области может быть осуществлено без существенных препятствий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шувалов Г.В. Перспективы создания метрологического комплекса для определения параметров судовых горюче-смазочных материалов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012, №1. – С.306-309.

2. Сравнительный анализ средств измерений показателей нефтепродуктов, применяемых для подтверждения технического регламента/ Г.В.Шувалов, В.Н. Половинкин, И.В. Клековкин, М.Г. Клековкина, О.А. Ясырова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014, №3. – С.119-123.

© Г. В. Шувалов, И. В. Минин, О. В. Минин, М. Г. Клековкина,
О. А. Ясырова, Е. А. Костенко, 2016

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Александр Владимирович Трифанов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант, e-mail: trifanov.alexh@mail.ru

Владимир Яковлевич Костюченко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики

Дмитрий Юрьевич Протасов

Институт физики полупроводников им. Академика А. В. Ржанова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

В статье описывается разработка системы фильтрации результатов холловских измерений с обратной связью. Предложен алгоритм автоматического поиска экстремумов и точек перегиба в спектре подвижности. Для работы системы определены критерии, позволяющие при анализе спектров подвижности выявить среди них результаты, имеющие наименьшую погрешность определения одного или нескольких исследуемых параметров.

Ключевые слова: цифровая фильтрация, снижение погрешности, полупроводники, концентрация и подвижность носителей заряда, кадмий-ртуть-теллур.

FEEDBACK FILTRATION SYSTEM DEVELOPMENT FOR DETERMINATION DENSITY AND MOBILITY OF CHARGE CARRIERS IN SEMICONDUCTORS

Aleksandr V. Trifanov

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student, e-mail: trifanov.alexh@mail.ru

Vladimir Y. Kostuchenko

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Ave Karl Marx, Ph. D., Prof. of the Department of General Physics

Dmitry Y. Protasov

Semiconductor Physics Institute. Academician AV Rzhanova SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 13 Ave Academy of Sciences, Ph. D., Senior Researcher

The development of feedback filtration system is described in this paper. The algorithm of automatic extreme and flex points search is offered. The criteria for choosing mobility spectrum with the lowest determination error are determined.

Key words: digital filtration, error reducing, semiconductor, density and mobility of charge carriers, cadmium-mercury-tellurium.

Классический метод определения концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках – измерения напряжения Холла и магнитосопротивления [1]. Но при обработке результатов холловских измерений чаще всего авторами предполагается, что шумы, присутствующие в результатах измерений, распределены по нормальному закону. Если это предположение верно, то в этом случае усреднение должно эффективно подавлять шумовые составляющие. Однако, как показывают измерения – шум не является нормальным [2]. В образцах присутствуют различные нелинейные эффекты, которые компенсируются усреднением только частично [3]. Задача определения концентрации и подвижности носителей является некорректной и неустойчивой к ошибкам в исходных данных – возникает погрешность измерений около 5% для основных носителей и 30-40% для неосновных носителей [4].

Использование фильтрации позволяет эффективно подавлять шумовую составляющую, даже если шум не является нормальным [5, 9, 10]. В работе рассматривается система автоматической обработки результатов измерений с обратной связью. В аналогичных системах обработки авторами улучшаются методы определения параметров носителей заряда [6]. Что является борьбой с последствиями – большими ошибками при решении некорректной задачи, а не с причиной – погрешностями в измеренных данных.

Процесс обработки результатов и определения параметров носителей заряда состоит из нескольких этапов [7]:

1. Фильтрация холловского напряжения и магнитосопротивления
2. Усреднение по току и по магнитному полю
3. Расчет эффективных значений
4. Расчет компонентов тензора проводимости
5. Использование метода «Спектр подвижности» для получения приближенного решения системы
6. Использование метода многозонной подгонки для уточнения решения, полученного методом «Спектр подвижности».

Первые пять этапов не являются ресурсоёмкими и выполняются достаточно быстро. Однако последний этап – является задачей многомерного поиска (в случае трёх типов носителей – шестимерного) и занимает времени на два порядка больше.

Наиболее наглядным критерием качества обработки сигнала является вид спектра подвижности. Поэтому было решено создать систему автоматической настройки фильтра, которая меняет характеристики фильтра исходя из результатов спектра подвижности. И для нескольких «лучших» спектров производит расчет методом многозонной подгонки. Для того чтобы решить поставленную задачу было проведено моделирование сигналов [8] для нескольких образцов с добавлением шумовой составляющей и обработка с варьированием параметров фильтрации. При этом обработка проводится в полностью автоматическом режиме. Для этого реализован алгоритм поиска экстремумов и точек перегиба в спектре подвижности, на основе анализа производных первого и второго порядка.

Помимо этого алгоритм:

1. Находит самые ярко выраженные экстремумы
2. При отсутствии ярко выраженных экстремумов проводит поиск точек перегиба.
3. При полном отсутствии экстремумов и точек перегиба – сигнализирует системе о необходимости изменения параметров фильтрации
4. Если полное отсутствие экстремумов и точек перегиба сохраняется – алгоритм выбирает среднее возможное значение и дальнейшая обработка производится методом многозонной подгонки.

При анализе возможных критериев использовались такие параметры как ширина, высота, крутизна экстремума, его симметричность, а также значения на границе вычисляемого спектра подвижности – $100 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Эффективность критерия для того или иного параметра оценивалась как величина корреляции между критерием и погрешностью определения параметра. На основе анализа полученных данных в методах «Спектр подвижности» и «Многозонная подгонка» было установлено:

1. Экстремумы в спектре подвижности бывают двух видов: сильно выраженные с вогнутыми краями, то есть с отрицательной второй производной; сильно выраженные с выпуклыми краями (с положительной второй производной).

2. Слабо выраженные точки перегиба представляют собой замедление в изменении сигнала, точку, в которой вторая производная меняет знак с минуса на плюс, то есть экстремум первой производной.

3. Для разных видов экстремумов и точек перегиба необходимо использовать разные критерии качества.

4. Отношение точек электронной и дырочной проводимости на границе вычисляемого спектра подвижности позволяет отсеять спектры подвижности, содержащие экстремумы и точки перегиба, которые не имеют физического смысла.

Универсальным критериями являются:

1. Отсутствие экстремумов и точек перегиба в зонах низкой (менее $0.01 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) и высокой (более $10 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) подвижности, то есть в зонах с нехарактерной для образца подвижностью.

2. Отсутствие «зеркальных» экстремумов [6] (экстремумов с одинаковой подвижностью для разных типов носителей заряда).

Критерии для экстремумов с вогнутыми краями приведены в табл. 1. Критерии для экстремумов с выпуклыми краями приведены в табл. 2. Для разных параметров носителей заряда были получены разные критерии. Вероятность корректной работы критерия подразумевает вероятность, с которой минимум критерия указывает на значение с минимальной погрешностью для заданного критерия.

Таблица 1

Критерии для экстремумов с вогнутыми краями

Параметр, погрешность которого определяет критерий	Формула критерия	Вероятность корректной работы критерия
Подвижность электронов	$c_{\mu_e} = \frac{h_e \sigma_{eL}}{\sigma_{hL}}$	83%
Подвижность легких дырок	$c_{\mu_l} = \frac{w_h w_l}{w_e^2}$	69%
Концентрация легких дырок	$c_{n_l} = \frac{\sigma_{eL}}{\sigma_{hL}}$	76%
Подвижность и концентрация тяжелых дырок	$c_{\mu_h} = c_{n_h} = \frac{w_l}{w_e}$	80% 84%

Таблица 2

Критерии для экстремумов с выпуклыми краями

Параметр, погрешность которого определяет критерий	Формула критерия	Вероятность корректной работы критерия
Концентрация электронов	$c_{n_e} = \frac{h_e \sigma_{eL}}{w_e \sigma_{hL}}$	94%
Подвижность электронов	$c_{\mu_e} = w_e - V_e$	83%
Подвижность тяжелых дырок	$c_{\mu_h} = \sigma_{eL}$	55%

где c_{μ_e} и c_{n_e} – критерии для подвижности и концентрации электронов, соответственно; c_{μ_l} и c_{n_l} – критерии для подвижности и концентрации легких дырок, соответственно; c_{μ_h} и c_{n_h} – критерии для подвижности и концентрации тяжелых дырок, соответственно; h_e – высота экстремума электронов, σ_{eL} и σ_{hL} – величины проводимости электронов и дырок, соответственно, на границе вычисляемого спектра подвижности $100 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, V_e – величина первой производной для середины боковой стороны экстремума, соответствующего электронам, w_e , w_l , w_h – ширина экстремума электронов, легких и тяжелых дырок, соответственно.

Удалось установить критерии только для некоторых параметров носителей заряда. Тем не менее, полученные критерии позволяют выбирать наиболее подходящие спектры подвижности и производить определение параметров носителей заряда по выбранным спектрам. Планируется экспериментальная проверка данной системы на образцах CdHgTe [11], подвижность электронов будет оцениваться методом фотопроводимости [12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M. Asif Khan Hall measurements and contact resistance in doped GaN/AlGaIn heterostructures / M. Asif Khan, M. S. Shur, Q. Chen // Appl. Phys. Lett. Vol. 68 Issue 21, pp. 3022.
2. Trifanov A. V. The noise reduction in variable hall data by digital filtration / A. V. Trifanov, D. D. Protasov, V. Y. Kostuchenko // The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014): proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk : IEEЕ, 2014. – pp. 30-32.
3. Trifanov A. V. Quantization Noise Influence on Mobility Spectrum Method / A. V. Trifanov, D. D. Protasov, V. Y. Kostuchenko // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2015. – pp. 75-78.
4. Трифанов А. В., Костюченко В. Я., Протасов Д. Ю. Цифровая фильтрация как метод уменьшения погрешности определения электрофизических параметров носителей заряда в плёнках КРТ р-типа // 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. 58–61.
5. Трифанов А.В. Подавление шума в результатах автоматизированных холловских измерений при помощи цифрового фильтра нижних частот / А.В. Трифанов, Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко // Известия высших учебных заведений. Физика. Том 56 №9/2, 2013. – С. 134-136.
6. Gang Du Characterizing Multi-Carrier Devices with Quantitative Mobility Spectrum Analysis and Variable Field Hall Measurements / Gang Du, J. R. Lindemuth, B. C. Dodrill, R. Sandhu, M. Wojtowicz, Mark S. Goosky, I. Vurgaftman, J. R. Meyer // Japanese Journal of Applied Physics Vol. 41, 2002. – pp. 1055.
7. A.V. Trifanov The set of photoelectromagnetic methods for determination of recombination and diffusion parameters of p-MCT thin films / D.Y. Protasov, A.V. Trifanov and V.Y. Kostuchenko // The European Physical Journal Applied Physics Vol. 62, Issue 3, 2013. – pp.30104-1 – 30104-8.
8. Трифанов А.В. Оптимизация параметров цифрового фильтра для снижения погрешности определения электрофизических параметров носителей заряда в полупроводниках / А.В. Трифанов, Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко // ФОМН-2015. V Всероссийская конференция Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий: сб. докладов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: Новосиб. гос. Архитектур.-строит. ун-т. (Сибстрин). – С. 129-132.
9. Трифанов А. В. Костюченко В. Я., Протасов Д. Ю. Уменьшение погрешности определения параметров носителей заряда цифровой фильтрацией // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 94–97.
10. A. V. Trifanov The digital filtration preprocessing of variable magnetic field Hall data before mobility spectrum analysis for p-MCT films / Trifanov A. V., Protasov D. Yu., Kostyuchenko V. Ya., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A. // 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials, France, Paris, 2015 - P. 337.
11. Трифанов А.В. Определение подвижности неосновных электронов в p-CdHgTe при температуре жидкого азота / А.В. Трифанов, Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко // Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых) Фотоника-2015. Сб. тезисов докладов, Новосибирск, 2015. - С. 73.
12. Костюченко В. Я., Протасов Д. Ю. Диагностика параметров неравновесных носителей в Р-КРТ методом магнитофотопроводимости // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 6. – С. 119.

© А. В. Трифанов, В. Я. Костюченко, Д. Ю. Протасов, 2016

О МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ОСНОВЫ ГЛОНАСС

Александр Сергеевич Толстиков

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

Артем Андреевич Карауш

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, научный сотрудник ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», тел. (383)210-11-85, e-mail: karaush.a@mail.ru

Екатерина Андреевна Ханыкова

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, научный сотрудник ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», тел. (383)210-11-85, e-mail: hanikovak@mail.ru

В статье обсуждаются проблемы и направления развития частотно-временного обеспечения отечественной навигационной системы ГЛОНАСС. Проанализированы характерные особенности работ по обеспечению единства частотно-временных измерений. Авторы выделяют перспективные направления повышения точности координатно-временных определений на основе спутниковых навигационных технологий.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, координатно-временные определения, частотно-временные поправки, параметры нестабильности часов.

ABOUT METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF TIME AND FREQUENCY MEASUREMENT ON GLONASS

Aleksandr S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Optical Production Technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Artem A. Karaush

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Pr., Scientist, tel. (383)210-11-85, e-mail: karaush.a@mail.ru

Ekaterina A. Hanikova

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Pr., Scientist, tel. (383)210-11-85, e-mail: hanikovak@mail.ru

This article considers the main problems and directions of development of the time-frequency provide domestic GLONASS global navigation system. We analyzed the characteristics of the work to ensure the unity of time-frequency measurements. As a result, the authors identify promising areas designed to improve the accuracy of coordinate-time definitions.

Key words: GLONASS, coordinate and time definition, time-frequency correction, instability parameters clocks.

Частотно-временное обеспечение ГЛОНАСС

Частотно-временные измерения играют важную роль в спутниковых навигационных технологиях. Все измерения дальностей от навигационных космических аппаратов (КА) до потребителя, которые являются исходными данными для решения навигационных задач, сводятся к измерению интервалов времени прохождения навигационного сигнала. При этом требуется измерить длительность этих временных интервалов с высокой точностью и, что не менее важно, необходимо обеспечить согласованность моментов шкал времени часов, участвующих в измерениях.

Рисунок иллюстрирует возникновение погрешностей измерения длительности интервала времени от момента выхода навигационного сигнала (событие А) до прихода этого сигнала на приемную антенну ресивера (событие В) в шкалах времени Центрального синхронизатора ГНСС (ЦС), бортовой шкалы T_S и шкалы ресивера T_R .

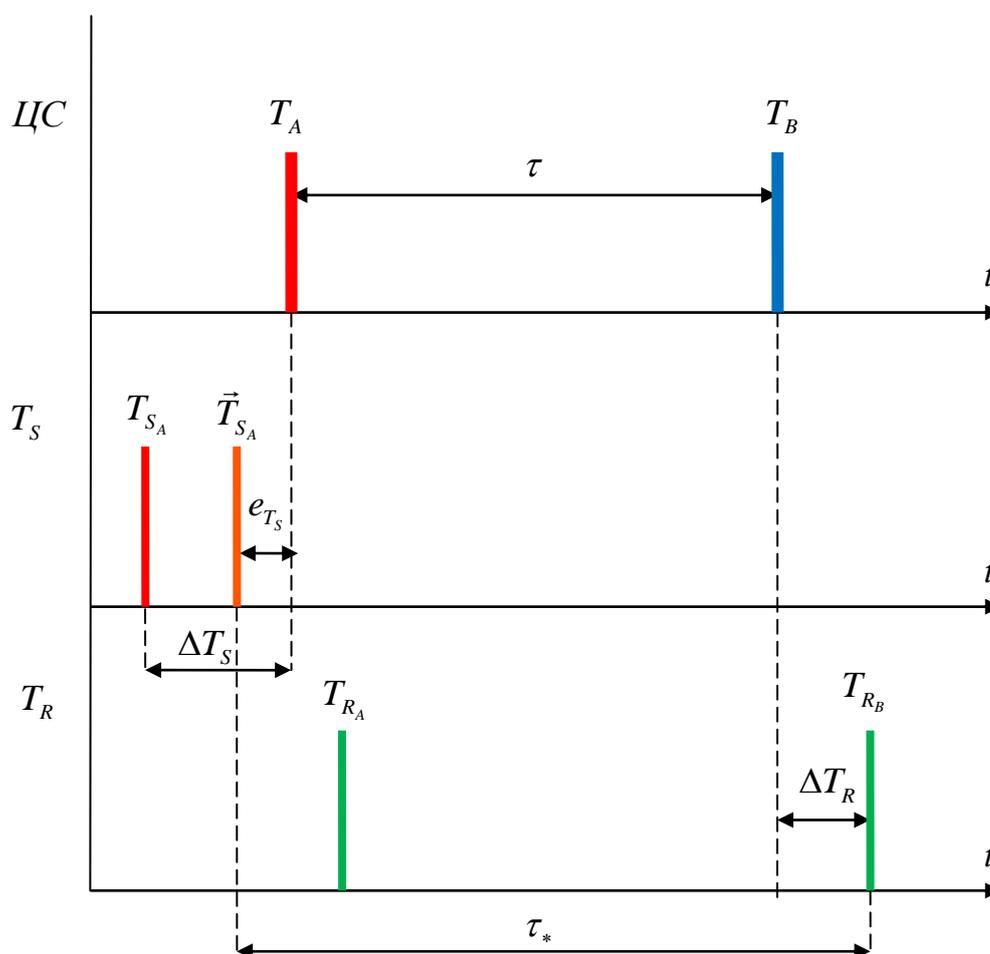


Рис. Шкалы времени бортовых часов навигационного спутника T_S и часов приемника T_R относительно шкалы Центрального синхронизатора

В силу ряда обстоятельств шкалы времени часов спутника и приемника отклоняются от шкалы времени Центрального синхронизатора [1-4]. Показаны уходы шкал ΔT_S и ΔT_R соответственно.

Уходы часов возникают по причине собственной нестабильности частоты, свойственной квантовым стандартам частоты, и влияющих факторов, таких как температура, релятивистские и гравитационные эффекты и др [3, 5].

Компенсация уходов часов ΔT_S и ΔT_R осуществляется путем применения поправок, рассчитанных с помощью математических моделей нестабильности часов.

Бортовые часы

Для компенсации уходов бортовых часов ΔT_S применяются аналитические шкалы времени \vec{T}_{SA} , построенные на рассчитанных частотно-временных поправках (ЧВП). Расчет ЧВП включает в себя идентификацию математической модели нестабильности часов, прогнозирование с помощью этой модели уходов часов и последующее включение в состав навигационного сообщения.

Для спутников ГЛОНАСС, использующих на борту цезиевый стандарт частоты, расчет ЧВП осуществляется на основе модели полиномиального вида

$$\Delta \dot{T}_S(t) = a_0 + a_1(t - t_0).$$

Закладка временной информации на борт спутника осуществляется 2-3 раза в сутки.

Для часов спутников GPS (рубидиевые стандарты частоты) применяется более сложная модель нестабильности - полином второй степени, с возможностью закладки информации до 6 раз за сутки. Это позволяет обеспечивать меньшую погрешность прогнозирования e_{T_S} , возникающую из-за уходов бортовых часов спутников.

Для отечественной системы ГЛОНАСС решение проблемы с увеличением частоты закладки бортовой информации затруднено в связи с тем, что число расчетных центров ограничено и расположено только на территории России. В то время как станции GPS распределены по экватору и этих станций больше, чем для ГЛОНАСС.

Вследствие таких ограничений и упрощения математической модели уходов часов спутников ГЛОНАСС, в результатах измерений присутствует погрешность, порождаемая неучтенными параметрами нестабильности частоты генератора.

Частота бортовых часов, помимо характерных для квантовых стандартов факторов, зависит от факторов релятивистского и гравитационного происхождения [6]:

Необходимость оценки этих эффектов в ГНСС при обработке результатов измерений обусловлена сопоставимостью погрешностей релятивистского и гравитационного происхождения с точностными характеристиками ЭВО.

По характеру проявления гравитационного влияния на частоту бортовых часов следует отнести к составляющей долговременной нестабильности. Указанная составляющая представляет собой смещение частоты часов, компенсируется как пропорциональное смещение частоты для всех стандартов частоты спутников ГНСС и оценивается величиной порядка 38 мкс в сутки.

Исследование факторов релятивистского типа является перспективным направлением. Погрешности релятивистской природы станут более значительными для будущих поколений спутников ГНСС, которые могут быть оснащены лучшими стандартами частоты и будут вероятно требовать большей точности полиномиального представления часов.

Наземные часы

Наземные часы в составе приемника навигационных сигналов, реализуются на основе кварцевых стандартов частоты. Также для приема навигационных сигналов развернута сеть беззапросных измерительных станций, оснащенные высокостабильными стандартами частоты. Метрологические характеристики таких часов обладают меньшей стабильностью, чем эталоны времени и частоты, и обеспечивается созданием специальных условий в месте их установки (стабилизация температурно-влажностных режимов, исключение вибраций и влияния магнитных полей), а также возможностью синхронизации с часами Центрального синхронизатора системы.

Для получения высокоточных координатно-временных определений важным условием является синхронизация часов со шкалой ЦС, а для некоторых задач – синтонизация часов. В тех случаях, когда потребитель с приемной аппаратурой устанавливается на высокодинамичном объекте или испытывает изменения уровня гравитационного потенциала [6], частота применяемого стандарта изменится.

В настоящее время возможности аппаратного совершенствования спутниковых технологий исчерпаны. Дальнейшее совершенствование в области частотно-временных измерений ГНСС видится в создании более эффективного алгоритмического обеспечения.

Одни из путей повышения точности КВО видится в следующих направлениях:

- Применения технологии Precise Point Position (PPP) с привлечением высокоточной эфемеридно-временной информацией. Подобная технология обеспечивает высокую эффективность при решении координатно-временных задач.

- Использование в качестве исходной информации не только кодовых псевдодальномерных измерений, но и фазовых измерений, обладающих меньшим уровнем случайных погрешностей измерений. Привлечение данных фазовых измерений осложнено наличием фазовой неоднозначности в результатах измерений. Разрешение неоднозначности представляется сложной алгоритмической задачей.

- Использование ионосферно-свободной комбинации, позволяющей минимизировать погрешность влияния ионосферы. Однако для расчета указанной комбинации требуются результаты навигационных измерений на двух частотах $L1$ и $L2$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толстиков А.С. Методы и алгоритмы координатно-временных определений на основе применения спутниковых навигационных технологий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Толстиков Александр Сергеевич. - Новосибирск, НГТУ, 2011. – 318 с.

2. О влиянии нестабильности часов на точность координатно-временных определений спутниковых навигационных технологиях / Е. А. Ханькова, А. С. Толстиков, А. С. Томилов, А. Р. Безродных, Э. О. Непомнящая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 36–40.

3. Толстиков А. С., Ханькова Е. А., Закорячкина Н. В. Оценивание уходов бортовых часов по данным траекторных измерений // 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. 229–232.

4. Толстиков А. С., Ханькова Е. А., Карауш А. А. Оценивание эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 8–13.

5. Ханькова Е. А., Тиссен В. М. Исследование нестабильностей атомных часов методами имитационного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 110–114.

6. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System / N. Ashby // American Institute of Physics. – 5. – 2002. – pp. 41-47.

7. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Rev. Relativity. – V. 6. – 2003. – pp. 1–45 <http://www.livingreviews.org/Articles/Volume6/2003-1ashby/>.

© А. С. Толстиков, А. А. Карауш, Е. А. Ханькова, 2016

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Александр Сергеевич Толстиков

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

Анна Вадимовна Блукке

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, студентка факультета автоматизации и вычислительной техники (АВТФ), кафедра ССОД

Антон Георгиевич Васильев

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, студент факультета автоматизации и вычислительной техники (АВТФ), кафедра ССОД

Ирина Сергеевна Дехант

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, студентка факультета автоматизации и вычислительной техники (АВТФ), кафедра ССОД

Алена Викторовна Шабанова

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, студентка факультета автоматизации и вычислительной техники (АВТФ), кафедра ССОД

В статье обсуждаются современные подходы к повышению точности координатно-временных определений, выполняемых на основе спутниковых навигационных технологий. Рассматривается задача контроля деформации ответственных строительных сооружений.

Ключевые слова: спутниковые навигационные технологии, гравитационные эффекты, ионосферная задержка, многопутность, деформация сооружений.

WAYS OF IMPROVING THE COORDINATE-TIME ACCURACY ON THE BASIS OF SATELLITE NAVIGATION TECHNOLOGIES

Alexander S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Anna V. Blukke

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Avenue, Department, Faculty of Automation and Computer Engineering

Anton G. Vasilev

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Avenue, Department, Faculty of Automation and Computer Engineering

Irina S. Dehant

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Avenue, Department, Faculty of Automation and Computer Engineering

Alena V. Shabanova

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Avenue, Department, Faculty of Automation and Computer Engineering

The article is considering modern approaches to improving the accuracy of coordinate-time determinations implemented on the basis of satellite navigation technologies. The problem of monitoring deformations critical facilities of building was considered.

Key words: satellite navigation technology, gravitational effects, ionospheric delay, multipath, the deformation structures.

В настоящее время расширяется круг важных научных и производственных задач координатно-временных определений, решаемых на основе спутниковых навигационных технологий [1]. Одновременно растут требования к точности и надежности результатов этих определений. Идет поиск путей повышения точности позиционирования за счет совершенствования методологии измерений, привлечения априорной информации о состоянии навигационных полей ГНСС, использования эффективных алгоритмов обработки данных траекторных измерений [2].

Исходными данными для решаемых задач позиционирования являются результаты кодовых и фазовых траекторных измерений по навигационным спутникам ГНСС, выполняемым в диапазонах $L1$ и $L2$

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \sum_{i=1}^N q_{id}(t)$$

$$\varphi(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \sum_{i=1}^N q_{i\varphi}(t) + K \cdot \lambda$$

где $D(t)$ и $\varphi(t)$ – измеренные значения кодовых и фазовых псевдодальностей, выраженные в единицах длины; $\rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) = \sqrt{(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2 + (z_S - z_R)^2}$ – геометрическая дальность от передающей антенны спутника до приемной антенны ресивера;

$\mathbf{u}_S^T = (x_S, y_S, z_S)$ и $\mathbf{u}_R^T = (x_R, y_R, z_R)$ – векторы текущих координат спутника и координат антенного модуля измерительного пункта.

λ – длина волны литерной частоты, на которой передается навигационный сигнал;

K – целое число периодов литерной частоты, связанное с неоднозначностью фазовых измерений,

c – скорость распространения навигационного сигнала в вакууме.

$q_{id}(t), q_{i\varphi}(t)$ – факторы, влияющие на точность псевдодальномерных измерений, к которым относятся:

$q_{1d}(t) = q_{1\varphi}(t) = \Delta T_S(t) \cdot c$ – расхождение бортовой шкалы времени относительно системного времени;

$q_{2d}(t) = q_{2\varphi}(t) = \Delta T_R(t) \cdot c$ – расхождение шкалы времени ресивера относительно системного времени;

$q_{3d}(t) = -q_{3\varphi}(t) = \tau_{ион} \cdot c$ – задержки навигационного сигнала в ионосферном слое,

$q_{4d}(t) = q_{4\varphi}(t) = \tau_{трон} \cdot c$ – задержки навигационного сигнала в тропосферном слое,

$q_{5d}(t), q_{5\varphi}(t)$ – аномальные значения, связанные с многолучевостью распространения навигационного сигнала,

$q_{6d}(t), q_{6\varphi}(t)$ – факторы релятивистского происхождения,

$q_{7d}(t), q_{7\varphi}(t)$ – погрешности измерений и другие факторы.

Точность координатно-временных определений зависит от того, насколько удастся снизить уровень влияющих факторов $q_{id}(t), q_{i\varphi}(t)$ в уравнениях псевдодальномерных измерений. Существенным вкладом в повышение точности этих измерений будет привлечение в расчеты вместо бортовых эфемерид апостериорных эфемерид $\hat{\mathbf{u}}_S^T = (x_S, y_S, z_S)$, вычисленных в центрах наземного комплекса управления ГНСС.

Важным резервом повышения точности траекторных измерений является использование компенсирующих поправок к бортовым $\Delta \hat{T}_S(t)$ и наземным $\Delta \hat{T}_R(t)$ шкалам времени, вычисленных с помощью адекватных математических моделей нестабильности часов. В ряде практических случаев эти модели должны учитывать эффекты релятивистского и гравитационного влияния на частоту генераторов часов.

Для компенсации влияния ионосферных задержек на точность траекторных измерений в [3] предлагается использовать ионосферо-свободные линейные комбинации кодовых $D(t)$ и фазовых $\varphi(t)$ измерений выполненных в диапазонах $L1$ и $L2$.

Важным преимуществом фазовых измерений $\varphi(t)$ является низкий уровень погрешностей измерений, на два порядка ниже чем в аналогичных кодовых измерениях $D(t)$. Неудобство использования фазовых измерений связано с необходимостью разрешения фазовой неоднозначности $K \cdot \lambda$.

Проведенные в [2] исследования показали, что влиянию многопутности распространения навигационного сигнала в меньшей степени подвержены фазовые измерения. Этим обстоятельством полезно воспользоваться для обнаружения аномальных значений в результатах измерений, возникающих вследствие проявлений многопутности.

Перечисленные действия, направленные на повышение точности координатно-временных определений, были применены авторами в задаче оценивания перемещений установленных на крыше многоэтажного корпуса ФГУП «СНИИМ» антенных модулей приемников навигационных сигналов ГНСС, установленных на крыше многоэтажного корпуса ФГУП «СНИИМ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т 2. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006.
2. Проблемы обеспечения точности координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС-технологий / А. С. Толстиков, В. А. Ащеулов, К. М. Антонович, Ю. В. Сурнин // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 3–11.
3. NAPPOS, Mathematical Models and Algorithms. Springer 2009.

© А. С. Толстиков, А. Г. Блукке, А. Г. Васильев,
И. С. Дехант, А. В. Шабанова, 2016

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ КОНТРОЛЕ ОПТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Галина Вячеславна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации; тел. (913)724-67-47, 361-07-45, e-mail: simgal@list.ru

Елена Павловна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)901-94-58, e-mail: hlelenka@yandex.ru

В работе показана динамика температурных искажений при оперативном контроле формы оптических заготовок. Предложена методика оценки предельных характеристик температурных режимов в зависимости от типа материала.

Ключевые слова: форма поверхности, температурные искажения, коэффициент линейного расширения, интерференционное распределение.

EVALUATION OF THE THERMAL DISTORTIONS AT THE OPERATIONAL CONTROL OF OPTICAL BILLET

Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. tech., assistant professor of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (913)724-67-47, 361-07-45, e-mail: simgal@list.ru

Elena P. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., associate professor of chair of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (913)901-94-58, e-mail: hlelenka@yandex.ru

The paper proposed the evolution of thermal distortions at the operational control the shape of optical blanks. The method evaluating performance limits of temperature modes depending on the type of material was offered.

Key words: form of surface, the distortion at temperature, linear expansion coefficient, an interference distribution.

Степень соответствия формы заготовки оптической детали техническому заданию существенно влияет на возможность дальнейшего использования данного объекта. Современные методы контроля формы оптической детали очень разнообразны, но, как правило, требуют получения информации в процессе её изготовления [1, 2].

Очень часто для оценки формы используется визуальное наблюдение интерференционного распределения, полученного на воздушном зазоре между

объектом и пробным стеклом. Этот вид контроля носит оценочный характер и требует не только специальной квалификации оператора, но и использование методики, позволяющей свести к минимуму влияние дополнительных факторов, влияющих на результат интерференции, в частности температурной деформации контролируемой детали.

Оценка термического расширения необходима также при соединении и компоновке разных видов стекол в составных объективах или при сборке оптических деталей в металлические оправы. С термическим расширением стекла необходимо считаться и при изготовлении вспомогательных приспособлений.

Контролируемая оператором в процессе изготовления деталь всегда имеет температуру большую, чем температура помещения, в котором ведется обработка. В результате теплового воздействия происходит деформация оптической детали, что приводит к несоответствию формы заготовки заданным параметрам. Величины деформации определяются геометрией деталей, коэффициентом линейного термического расширения (КТЛР) материала и температурным интервалом. КТЛР оптических стекол основных групп колеблется в интервале $(10^{-6} - 10^{-5})$ град⁻¹ и обозначается α . Наиболее чувствительными к температуре среди часто используемых типов стекол являются флинтовые стекла (Ф, ТФ: $\alpha \approx 10^{-5}$), менее чувствительны – кроновые стёкла (К, ЛК: $\alpha \approx 10^{-6}$) [3].

При контроле соответствия формы детали установленным требованиям наиболее часто используется интерференционный метод, когда результат интерференции формируется на воздушном зазоре между поверхностью детали и оптическим стеклом [4].

Различие в температурах измеряемой детали и пробного стекла, а также изменение формы заготовки в результате температурных искажений может вносить существенную погрешность в результат измерения. Методика интерференционного контроля учитывает это обстоятельство и требует выдерживания измеряемых деталей в помещении контроля в течение нескольких часов. Это требование строго соблюдается на операции окончательного контроля изделия, но не может быть выполнено для оперативного контроля на производственном участке. На рисунке приведена схема температурных искажений оптической заготовки.

Погрешность формы поверхности, вызванную несоответствием контролируемой линзы и пробного стекла, принято оценивать по числу наблюдаемых интерференционных полос, количество которых может быть оценено на основании соотношения (1).

$$2dn - \lambda/2 = m \lambda, \quad (1)$$

где λ – длина волны;

m – число наблюдаемых порядков интерференции (полос);

d – оптическая разность хода интерферирующих световых потоков.

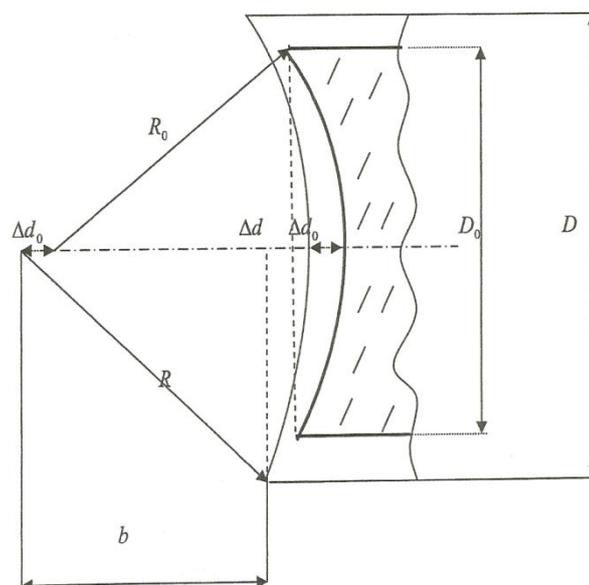


Рис. 1. Модель температурной деформации линзы:

R_0, D_0 – радиус и диаметр исходной линзы; R, D – радиус и диаметр деформированной линзы; Δd_0 – изменение толщины линзы по оси

Полагая, что d в данном случае пропорционально температурному приращению разности толщины линзы по краю и по центру, получим: $2(d_{кр} - d_{ц}) \cdot n \cdot \alpha \cdot \Delta T - \lambda/2 = m \lambda$, тогда, для $n = 1$:

$$m = [2(d_{кр} - d_{ц}) \alpha \Delta T] / \lambda - 1/2, \quad (2)$$

где ΔT – температурный интервал.

Например, для заготовки из стекла ТФ-10 с $\alpha = 83 \times 10^{-7}$ град $^{-1}$ и геометрии линзы при нормальных условиях (диаметр линзы $D_0 = 100$ мм, толщина линзы по краю $d_{кр} = 11$ мм, толщина линзы по центру $d_{ц} = 2$ мм) при изменении температуры ΔT на 10 °С получим:

$$\Delta(d_{кр} - d_{ц}) \cdot n \cdot \alpha \cdot \Delta T = 10 \cdot 8,3 \cdot 10^{-6} \cdot (11 - 2) = 7,47 \cdot 10^{-4} \text{ мм.}$$

Полученное значение оптической разности хода между пробным стеклом и заготовкой соответствует примерно 2,5 интерференционной полосы для $\lambda = 500$ нм. Такое отклонение формы, обусловленное изменением температуры образца, достаточно большое, поскольку, как правило, суммарный допуск отклонения формы, обусловленный всеми причинами, не должен превышать 3 интерференционные полосы.

Выполненный расчет позволяет сформулировать ограничения для температурного режима условий измерения ошибок формы поверхности на рабочем месте изготовления оптической детали.

Если известен тип материала и допустимые отклонения формы, выраженные через число интерференционных полос, то предельная допустимая разница температур при контроле может быть определена следующим образом:

$$\Delta T = [m \lambda + \lambda/2] / [2(d_{кр} - d_{ц})n\alpha]. \quad (3)$$

Например, при $\lambda = 500$ нм и $m = 3$, для $\alpha \leq 10^{-7}$ (кварцевые стёкла, ситаллы, отдельные марки оптической керамики) получим $\Delta T = 100$ °С; для $\alpha \approx 10^{-6}$ (кроновые и боратные стёкла) допустимая разница температур составит $\Delta T = 10$ °С, а для материалов с высоким КТЛР, характеризующихся $\alpha \approx 10^{-5}$ (флинты Ф, тяжёлые и сверхтяжёлые флинты ТФ, СТФ и особые кроны ОК) изменение температуры $\Delta T = 1$ °С.

Таким образом, для практических задач оценка допустимой разницы температур может быть выполнена на основании соотношения (3) с учётом допустимой погрешности результата измерений, а также геометрии и материала заготовки.

Полученные результаты показывают, что количественные значения средней величины отклонения формы существенно различны для образцов, изготовленных из разных материалов, и позволяют сделать следующий вывод: контроль пробным стеклом ошибки формы поверхности оптической детали на рабочем месте может осуществляться для термоустойчивых оптических материалов и недопустим для материалов с большими значениями КТЛР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Симонова Г. В., Хлебникова Е. П., Симонов Д. П. Автоматизация контроля качества поверхностей на основе анализа статистических характеристик их цифровых изображений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 54–58.
2. Симонова Г. В., Симонов Д. П. Разработка оптического метода контроля качества поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 62–66.
3. Кругер М. Я., Панов В. А., Кулагин В. В. Справочник конструктора оптико-механических приборов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
4. ГОСТ 2786-82. Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. – Введ. 01.01.1984. – Взамен ГОСТ 2786-76. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.

© Г. В. Симонова, Е. П. Хлебникова, 2016

МЕТОД АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ АКТИВНЫХ СВЧ-ЦЕПЕЙ

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Владимир Анатольевич Литовченко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, тел. (923)100-89-86, e-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru

Светлана Владимировна Ромасько

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент, тел. (383)361-07-45

Наталья Викторовна Заржецкая

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, старший преподаватель, тел. (383)361-07-31

Предложен метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей, основанный на измерении трех значений комплексных коэффициентов отражения ее нагрузок по входу и выходу в регенеративном режиме работы этой цепи, соответствующего ее промежуточному режиму работы между ее режимами усиления и автогенерации.

Ключевые слова: анализатор СВЧ-цепей и их устойчивость, коэффициент Ленвила, комплексный коэффициент отражения.

STABILITY ANALYSIS METHOD OF ACTIVE MICROWAVE CIRCUITS

Sergei V. Savelkaev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Vladimir A. Litovchenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Graduate Student, tel. (923)100-89-86, e-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru

Svetlana V. Romasko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Graduate Student, Assistant, tel. (383)361-07-45

Natalia V. Zarzhetsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Graduate Student, Senior Lecturer, tel. (383)361-07-31

A method is proposed for stability analysis of active microwave circuits, based on the measurement of three values of the complex reflection coefficients of loads on input and output in the regenerative mode of operation corresponding to its intermediate mode between the modes of amplification and generation.

Key words: analyzer microwave circuits and their stability, Lenvil coefficient, integrated reflection coefficient.

Суть проблемы. В настоящее время анализ устойчивости активных СВЧ-цепей, например, транзистора, необходимый для его выбора при проектировании усилителя или автогенератора, осуществляется по коэффициенту Ленвила [1] с использованием трудно измеряемых S -параметров [2, 3].

В докладе предложен метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей, основанный на измерении трех значений комплексных коэффициентов отражения ее нагрузок по входу и выходу в регенеративном режиме работы этой цепи, соответствующего ее промежуточному режиму работы между ее режимами усиления и автогенерации.

Метод анализа устойчивости. Структурная схема измерительного преобразователя (ИП) [3] анализатора СВЧ-цепей (АЦ) показана на рис. 1. Он содержит коаксиальное контактное устройство (ККУ) [4] к каждому из двух ($i = 1, 2$) коаксиальных переходов которого подключен измерительный $2n$ - полюсник, нагруженный на перестраиваемый согласующий трансформатор (ПСТ) с $N_{ш} = 3$ емкостными шлейфами. Исследуемая активная СВЧ-цепь, например, транзистор, подключена в плоскостях $i - i$ измерительных входов коаксиальных переходов (КП).

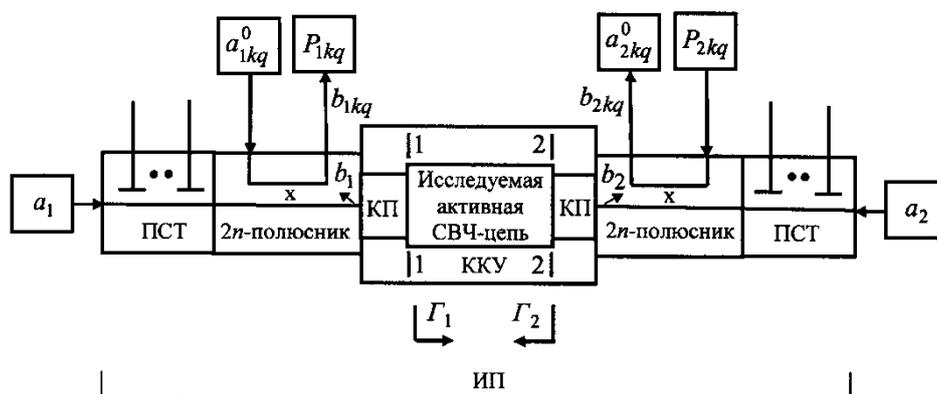


Рис. 1. Структурная схема ИП АЦ

Сущность анализа устойчивости [1] сводится к измерению трех $m = 1, 2, 3$ значений нагрузочных ККО $\Gamma_j^{(m)}$ активной СВЧ-цепи в режиме регенерации, который является промежуточным режимом между его режимами усиления и автогенерации. Измеренные нагрузочные ККО $\Gamma_j^{(m)}$ позволяют определить границы O_j , разделяющие комплексные плоскости входного ($j = 1$) и выходного ($j = 2$) нагрузочных ККО Γ_j исследуемой цепи на устойчивые и неустойчивые области, как показано на рис. 2, где знаком плюс (+) отмечены устойчивые,

а знаком минус (-) - неустойчивые области; r_j, φ_j и R_j - координаты центра и радиусы границ O_j этих областей (параметры устойчивости).

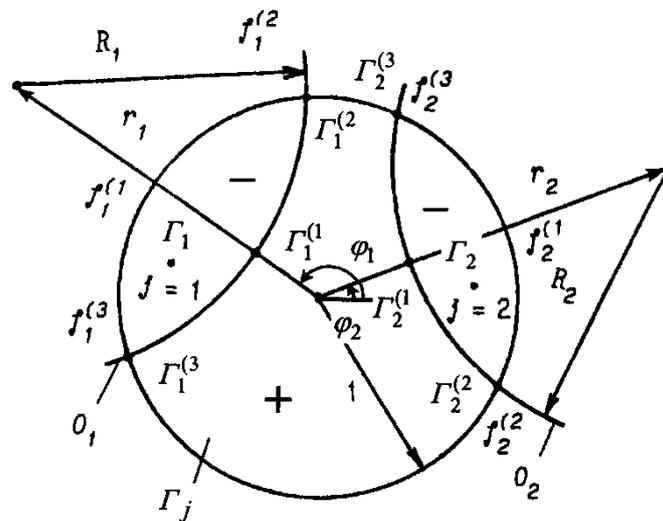


Рис. 2. Области неустойчивых (-) и устойчивых (+) нагрузочных ККО Γ_j

Метод анализа устойчивости можно реализовать следующим образом. Исследуемую цепь посредством входного и выходного ПСТ вводят в режим устойчивой автогенерации, выбирая его нагрузочные ККО Γ_j , так чтобы они находились в неустойчивых областях их комплексной плоскости, отмеченные знаком минус (-) на рис. 2, где точками $j = 1, 2$ отмечены их выбранные значения. При в каждом из ПСТ используют один ($N_{шт} = 1$) шлейф.

Далее при фиксированном значении выходного нагрузочного ККО $\Gamma_2 = const$ в точке $j = 2$ осуществляют прогонку входного нагрузочного ККО Γ_1 посредством итерационного уменьшения, а затем итерационного увеличения его модуля $|\Gamma_1|$ с вариацией его фазы φ_1 в пределах $\varphi_1 = 0 - 2\pi$ для каждого из выбираемых значений его модуля $0 \leq |\Gamma_1| \leq 1$. При этом изменение модуля $|\Gamma_1|$ входного нагрузочного ККО Γ_1 осуществляется посредством изменения глубины погружения емкостного шлейфа входного ПСТ, а его фазы φ_1 - посредством перемещения этого емкостного шлейфа по длине ПСТ. Посредством прогонки входного нагрузочного ККО Γ_1 находят минимальное $\Gamma_1^{(1)}$ и два максимальных граничных значений его модуля $\Gamma_1^{(2)}, \Gamma_1^{(3)}$, показанных на рис. 2, при которых наблюдается срыв генерации. После чего Исследуемую активную цепь отключают и измеряют эти три значения нагрузочных ККО Γ_1 при непосредственном соединении КП встык. Далее возвращают входной нагрузочный ККО

Γ_1 в исходную точку $j = 1$ и осуществляют аналогичное измерение трех значений $\Gamma_2^{(1)}$, $\Gamma_2^{(2)}$ и $\Gamma_2^{(3)}$ выходного нагрузочного ККО Γ_2 .

Координаты центров r_j, φ_j и R_j радиусы границ O_j неустойчивых областей (–) нагрузочных ККО Γ_j можно определить решением системы уравнений:

$$|\Gamma_j^{(m)}| = x_j + a_m y_j + b_m z_j; m = 1, 2, 3, \quad (19)$$

где $a_m = 2|\Gamma_j^{(m)}| \cos \varphi_{\Gamma_j}^{(m)}$ и $b_m = 2|\Gamma_j^{(m)}| \sin \varphi_{\Gamma_j}^{(m)}$ - константы, значения которых определены модулем $|\Gamma_j^{(m)}|$ и фазой $\varphi_{\Gamma_j}^{(m)}$ измеренных нагрузочных ККО $\Gamma_j^{(m)}$; x_j, y_j и z_j - переменные:

$$x_j = R_j^2 - r_j^2; y_j = r_j \cos \varphi_j; z_j = r_j \sin \varphi_j, \quad (20)$$

с учетом которых r_j, φ_j и R_j можно определить из выражений:

$$r_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2}; \varphi_j = \arccos(y_j / r_j); R_j = \sqrt{x_j^2 + r_j^2}. \quad (21)$$

Произвольные значения модуля $|\Gamma_j|$ нагрузочного ККО Γ_j , принадлежащие границам O_j в зависимости от его фазы φ_{Γ_j} , можно рассчитать по формуле

$$|\Gamma_j| = R_j \cos(\varphi_j - \varphi_{\Gamma_j}) - \sqrt{R_j^2 \cos^2(\varphi_j - \varphi_{\Gamma_j}) + r_j^2}. \quad (22)$$

При необходимости может быть определен максимально достижимый диапазон

$$\Delta f_j = |f_j^{(2)} - f_j^{(3)}| \quad (23)$$

перестройки частоты f_j автогенерации исследуемой активной цепи по его входу и выходу, где $f_j^{(2)}$ и $f_j^{(3)}$ - граничные частоты срыва автогенерации, показанные на рис. 2.

Рассмотренный метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей облегчает выбор нагрузочных ККО Γ_j при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов СВЧ, а также выбор этих цепей, таких как транзисторы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полупроводниковые входные устройства СВЧ / Под редакцией В. С. Эткина. – М.: Сов. Радио. – 1975, Т. 1. – 344 с.
2. Савелькаев С. В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S -параметров // Метрология. – 2005. – № 4. – С. 19–28.
3. Савелькаев С. В. Двухсигнальный метод измерения S -параметров активных СВЧ-цепей в режиме большого сигнала // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 5 (439). – С. 30–32.
4. Савелькаев С. В. Коаксиальное контактное устройство // Измерительная техника. – 2005. – № 5. – С. 65–68.
5. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S -параметров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 164–171.
6. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S -параметров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 164–171.
7. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А., Колпаков А. В. Использование интерполирующих и экстраполирующих функций для определения межповерочного интервала коаксиальных мер // 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. 127–129.
8. Владимирова С. В., Пальчун Ю. А. Алгоритмические методы определения функции поправки по модулю при измерении параметров отражения // 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. 261–263.
9. Ромасько С.В. Методика определения коэффициентов интерполяции и экстраполяции СВЧ мер ослабления по модулю коэффициента отражения // ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2015 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 5, ч. 2. – С. 127–129.
10. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Трехсекционная дейфово-диффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером Шоттки // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10, Вып. 1. – С. 57–62.
11. Петров В. П., Савелькаев С. В. Расчет параметров рассеяния линейных пассивных и активных устройств СВЧ // Радиотехнические системы и устройства СВЧ. – Л.: Тр. учеб. инс-тов связи. – 1987. – С. 98–102.
12. Полупроводниковые входные устройства СВЧ / Под редакцией В. С. Эткина. – М.: Сов. Радио. – 1975, Т. 1. – 344 с.

© С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, С. В. Ромасько, Н. В. Заржецкая, 2016

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Татьяна Вячеславовна Ларина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Елена Юрьевна Кутенкова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В статье рассмотрено влияние анизотропии свойств на изменение физических и механических свойств поверхности металла.

Ключевые слова: анизотропия свойств, монокристаллы, поликристаллы, свойства металлов.

THE INFLUENCE OF ANISOTROPY OF PROPERTIES ON THE CHANGES IN THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE METAL SURFACE

Tatiana V. Larina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher, Department of Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Elena Yu. Kutenkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher, Department of Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

The article considers the influence of the anisotropy of the properties to modify the physical and mechanical properties of the metal surface.

Key words: anisotropy of properties, single crystals, polycrystalline metals properties.

Анизотропия – это зависимость свойств кристалла от направления, возникающая в результате упорядоченного расположения атомов (ионов, молекул) в пространстве[1]. Свойства кристаллов определяются взаимодействием атомов. В кристалле расстояния между атомами в различных кристаллических направлениях различны, а поэтому различны и свойства.

Анизотропия свойств проявляется у монокристаллов, полученных, например, при очень медленном контролируемом отводе тепла при кристаллизации. Монокристаллы представляют собой один кристалл, атомы которого расположены в геометрически правильном порядке в узлах кристаллической решетки.

Поликристаллы – технические металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов (обычно $10^{-2} \dots 10^{-3}$ см). Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решетки, отличную от ориентировки соседних зерен, вследствие чего свойства реальных металлов усредняются, и явления анизотропии не наблюдается. Но если ориентировка зерен будет одинакова, то свойства такого поликристаллического материала будут анизотропными.

Разница в физико-химических и механических свойствах в разных направлениях у монокристаллов может быть весьма существенной. При измерении в двух взаимно перпендикулярных направлениях кристалла цинка значения температурного коэффициента линейного расширения различаются в 3–4 раза, а прочности кристалла железа — более чем в два раза. А прочность и пластичность монокристаллов меди изменяются в зависимости от направления ($\sigma_b = 350 \dots 180$ МПа; $\delta = 10 \dots 50$ %). Для поликристаллической меди $\sigma_b = 25$ МПа; $\delta = 40$ %.

Модуль упругости, прочность и деформация напряжения у монокристаллов меди различны по осям кристалла [100], [110] и [111] соответственно равны 6800, 12000 и 18000 кПа / мм² [2].

Созданы новые материалы на основе монокристаллов, у которых отсутствуют границы зерен и они обладают более высокой степенью однородности[3-5]. Единичные элементы монокристаллов имеют одинаковую ориентацию по отношению к центральной оси полости. Единичные элементы могут быть ориентированы [001], [110], [111] или с любой другой желаемой кристаллографической ориентации, параллельной центральной оси полости. Следует отметить, что из-за анизотропного (направленного) характера монокристаллов, кристаллографическую ориентацию можно регулировать для оптимизации характеристик деформации при нагружении изделия.

Монокристалл имеет ряд уникальных характеристик, которые позволяют улучшить производительность по сравнению с традиционными поликристаллическими материалами.

Металлические отражатели для лазеров также рекомендуется изготавливать из монокристаллического материала вместо поликристаллического материала [6].

Монокристаллические отражатели с готовой отражающей полированной поверхностью оптического качества получают в тигле, не прибегая к механической обработке. Дальнейшее разделение монокристалла путем разрезания его на несколько более мелких отражателей не оказывает вредного влияния на отражающие поверхности.

Монокристаллические отражатели выдерживают намного более экстремальные тепловые нагрузки, вызванные лазерными лучами. И такие свойства отражающих монокристаллов, как коэффициент отражения и оптимальная проводимость, достигаются также за счет отсутствия границ зерен в кристаллической решетке.

Полированные поверхности монокристаллических отражателей гарантируют наибольшее сопротивление тепловому воздействию падающего лазерного излучения, так как в анизотропном материале, возможно, выбрать ориентацию кристалла с максимальной или минимальной теплопроводностью.

Полированные отражатели для высокоэнергетического излучения изготавливаются из меди, серебра или золота и применяются для лазерной техники. Новое зеркало состоит из монокристаллов с полированной поверхностью. В качестве альтернативы эта поверхность может быть получена из монокристаллов меди травлением с металлографическим направлением [100] - или [111]. Зеркала с протравленной поверхностью выдерживают более высокую энергию, чем лазерные зеркала с полированной поверхностью. В качестве защиты от лазерных лучей несколько монокристаллических зеркал могут быть объединены в массивы, а отражающая поверхность может быть плоской или изогнутой.

Отражатели, выполненные из электролитической меди, не имеют регулярную структуру. Таким образом, на полированной поверхности есть границы зерен, ограничивающие примеси, вызывающие поглощение света и рассеяние. Кроме того, известно, что плавление металла начинается по границам зерен.

Данные монокристаллические отражатели, применяемые в лазерной технике, обладают более высокой эффективностью и они пригодны для высоких нагрузок энергии. Монокристаллы изготавливают из меди, серебра и золота 99,999% чистоты.

Результаты экспериментов с участием монокристаллических отражателей различных диаметров и форм показали, что:

1 В настоящее время лазеры достигают энергию порядка нескольких ГВт /см². Лазерные лучи покрывают очень маленькие площади поперечного сечения, например, 0,6 × 0,4 мм. Такая высокая энергия приводит к разрушению всех традиционных отражателей. А монокристаллические отражатели представляют собой единую структуру кристалла с однородной полированной поверхностью и высокой отражательной способностью. Остаточная энергия, не отражается, и поглощенная радиация рассеивается быстрее в силу лучшего от-

вода тепла и распространяется на окружающие области, так как нет границ зерен в одном кристалле.

2 Сравнительные испытания электролитических медных отражателей с монокристаллическими медными отражателями дали отражения лучше около 1 %.

Монокристаллические отражатели из серебра или золота, производимого отражения лучше около 1,9 %.

3 Дополнительным преимуществом является более длительный срок службы монокристаллических отражателей вследствие меньшей склонности к окислению.

4 При одинаковом проведении полировки, получают улучшение отражательной способности поверхности и приведение к минимуму поглощения излучаемой энергии у кристаллических структур монокристаллов.

5 Самый высокий коэффициент отражения лазерных лучей был получен в зеркалах, у которых отражающая поверхность представляет собой [100] - или [111] - ориентацию плоскостей протравленных монокристаллов меди.

Кроме того, анизотропные свойства металла проявляются и в зависимости величины проводимости металла в зависимости от ориентации кристалла, а значит и величины отражения оптического излучения от поверхности металла [7-8].

К настоящему времени разработан ряд оптоэлектронных приборов для определения изменений физических и механических свойств поверхности металла оптическими методами. Также предлагается математическая модель анализа состояния поверхностей конструкционных материалов построенная с использованием свойств отражения от поверхности [9-10].

Влияние анизотропии на физико-механические свойства металлов также проявляется и для диэлектриков. Например, известно, что алмаз используется в качестве материала для линз высокоэнергетического излучения и имеет различную теплопроводность в зависимости от ориентации кристалла. Что открывает возможность для создания новых изделий в оптическом приборостроении.

Таким образом, рассмотрено влияние анизотропии свойств на изменение физических и механических свойств поверхности металла на примере монокристаллов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физический энциклопедический словарь / глав. редак. А.М.Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 382 с.

2. US4875414; Explosivecharge with a projectile-formingmetallicinsert; (Пат. US 4875414 США 07/151713; Заряд взрывчатого вещества с снаряда формирования металлической вставкой) [Текст] / США 07/151713; заявл. 03.02.1988; опубл. 24.10.1989. – 6 с.

3. US4598643; Explosive charge liner made of a single crystal; (Пат. US4598643 США102/307; 102/476; Взрывная лайнер заряд изготовлен из монокристалла) [Текст] / США 07/151713; заявл. 18.12.1984; опубл. 08.07.1986. – 7 с.

4. US4192695; Metal crystals and process; (Пат. US4192695 США 05/898799; Металлические кристаллы и процесс) [Текст] 05/898799 / США; заявл. 24.04.1978; опубл. 11.03.1980. – 6 с.

5. US4896332; Monocrystal reflectors for laser applications (Пат. US4896332 США 07/172306; Монокристалл отражатели для лазерных применений) [Текст] 05/898799 / США; заявл. 10.03.1988; опубл. 23.01.1990. – 5 с.
6. US5243620 High power reflectors for laser technology (Пат. US5243620 США 07/281945; Высокие отражатели питания для лазерной техники) [Текст] / США 07/281945; заявл. 06.12.1988; опубл. 07.09.1993. – 4 с.
7. Адамеску, Р.А. Анизотропия физических свойств металлов / Р.А. Адамеску, П.В. Гельд, Е.А. Митюшов. — М.: Металлургия, 1985. – 136 с.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М: Наука Главная редакция физико-математической литературы изд-во «Наука» 1973, Справочное пособие, 720 с.
9. Возможность определения изменений физических и механических свойств поверхности металла оптическими методами / Ларина Т. В., Кутенкова Е. Ю., Минин О. В., Минин И. В. // 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. 219–226.
10. Математическая модель анализа состояния поверхности конструкционных материалов / Ларина Т. В., Кутенкова Е. Ю., Тымкул В. М., Минин О. В., Минин И. В. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 98–103.

© Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, О. В. Минин, И. В. Минин, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Надежда Анатольевна Вихарева

Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)210-20-03, e-mail: milana-maria@mail.ru

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

Экспериментально исследован метод измерений коэффициента черноты, основанный на закономерностях теплообмена в зазоре между двумя плоскопараллельными поверхностями. Рассмотрены особенности теплотметрической установки и приведены основные результаты исследований.

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

RESEARCH OF THE ACTION OF HEAT METHOD OF MEASUREMENTS OF COEFFICIENT OF BLACKNESS OF SURFACES

Nadegda A. Vikhareva

Siberian State Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Pr., candidate of technical sciences, senior scientist, tel. (383)210-20-03, e-mail: milana-maria@mail.ru

Victor Ya. Cherepanov

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., doctor of technical sciences, professor of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

The method of measurements of coefficient of blackness based on regularities of heat exchange in a gap between two plane-parallel surfaces is experimentally investigated. Features of heat method installation are considered and the main results of researches are given.

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

Измерения интегрального полусферического коэффициента черноты (в дальнейшем – коэффициента черноты) поверхности различных материалов обычно основаны на законах теплообмена двух тел, имеющих разные температуры. Интенсивность теплообмена (плотность теплового потока) в этом случае зависит от коэффициентов ε_1 и ε_2 черноты их поверхности и разности четвертой степени значений T_1 и T_2 абсолютной температуры этих тел [1]. При этом при-

ведённый (эффективный) коэффициент ε_{12} черноты системы тел, который в результате и определяет интенсивность теплообмена между телами, обычно является сложной комбинацией коэффициентов ε_1 и ε_2 черноты, зависящей от формы и взаимного расположения тел.

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.

Для решения такой задачи в [4] предложен метод измерений, основанный на зависимости плотности теплового потока в зазоре между параллельно расположенными плоскими поверхностями с отличающимися значениями температурами, от их эффективного коэффициента ε_{12} черноты. В этом случае [1] связь коэффициента ε_{12} со значениями ε_1 и ε_2 имеет вид

$$\varepsilon_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}. \quad (1)$$

При наличии воздушного зазора между поверхностями суммарная плотность q_{12} теплового потока в стационарном температурном режиме (T_1 и $T_2 = \text{const}$) определяется соотношением

$$q_{12} = q_\lambda + q_\varepsilon = \frac{\lambda(T_2 - T_1)}{h} + \varepsilon_{12} \sigma(T_2^4 - T_1^4). \quad (2)$$

Здесь q_λ – плотность кондуктивного теплового потока, обусловленная теплопроводностью λ воздушного слоя толщиной h в зазоре, q_ε – плотность радиационного теплового потока в зазоре, σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Отсюда с учетом (1) следует, что плотность q_{12} теплового потока, когда одна из теплообменных поверхностей имеет постоянное покрытие с значением ε_2 , близким к единице ($\varepsilon_2 \rightarrow 1$), эта зависимость практически прямо пропорциональна искомому значению ε_1 и имеет вид

$$q_{12} = q_\lambda + \varepsilon_1 \sigma(T_2^4 - T_1^4). \quad (3)$$

При равных коэффициентах черноты ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) обеих поверхностей теплообменника плотность q_{12} теплового потока однозначно зависит от их значения и имеет вид

$$q_{12} = q_\lambda + \frac{\varepsilon_1}{2 - \varepsilon_1} \sigma(T_2^4 - T_1^4). \quad (4)$$

В области малых значений ε_1 ($2 \gg \varepsilon_1$) эта зависимость (q_{12} от ε_1) близка к линейной. Однако при больших значениях ε_1 она становится нелинейной и, соответственно, чувствительность q_{12} к изменению ε_1 заметно возрастает.

Отсюда следует, что если измерять плотность q_{12} суммарного теплового потока в воздушном зазоре контактными датчиками (тепломерами), расположенными на внутренней стороне теплообменных поверхностей, то можно определить искомое значение ε_1 коэффициента черноты. Этот факт является основой предложенного в [4] теплотрического метода. Если задавать и поддерживать неизменными значения температуры T_1 , T_2 и толщины h воздушного зазора, то плотность q_{λ} кондуктивного теплового потока можно считать постоянной. Кроме этого её можно определить экспериментально путём измерений покрытий с близким к нулю коэффициентом черноты, то есть при отсутствии в зазоре радиационного теплового потока.

Наиболее просто рассматриваемый теплотрический метод осуществляется на основе заранее установленной градуировочной зависимости плотности q_{12} теплового потока от коэффициента ε_1 черноты, которую можно определить с помощью стандартных образцов (СО) покрытий с известными коэффициентами черноты. Для определения градуировочной зависимости, соответствующей виду (3), достаточно использовать только два СО, а для зависимости вида (4) – три СО. Важно отметить, что во втором случае разрешающая способность метода в области значений коэффициента черноты более 0,7 практически в два раза выше. Поэтому этот вариант метода целесообразно использовать для покрытий с большим коэффициентом черноты.

Исследования рассмотренного метода проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

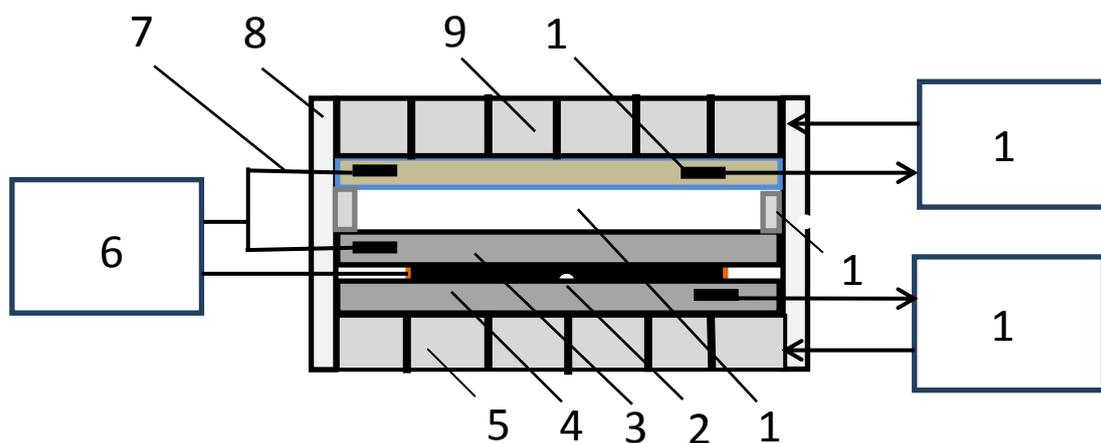


Рис. 1. Схема установки:

1 – воздушный зазор, 2 – датчик теплового потока, 3 – нижняя пластина теплообменника, 4 – изотермическая пластина с датчиком температуры, 5 – нижняя батарея Пельтье, 6 – измеритель сигналов, 7 – дифференциальная термопара, 8 – теплоизоляция, 9 – верхняя батарея Пельтье, 10 – верхняя пластина теплообменника с датчиком температуры, 11 – фиксатор зазора, 12 – регулятор температуры верхней пластины, 13 – регулятор температуры нижней пластины

Её тепловой блок содержит теплообменник с двумя половинами – нижней и верхней. Каждая из этих половин может выполнять функцию источника тепла или теплостока. На батарее Пельтье 5 нижней половины теплообменника закреплены изотермическая пластина 4 с датчиком температуры, а также датчик теплового потока 2, на котором установлена нижняя пластина теплообменника 3 с исследуемым покрытием, обращённым в сторону зазора 1. На пластине последовательно размещены: фиксаторы воздушного зазора 11, верхняя пластина 10 с обращённым в сторону зазора исследуемым покрытием и верхней батарее Пельтье 9. Теплообменные пластины снабжены термопарами, которые соединены встречно, образуя дифференциальную термопару 7.

Датчик теплового потока и дифференциальная термопара подключены к измерителю сигналов 6, а датчики температуры пластин – к входам регуляторов температуры 11 и 12. Выходы регуляторов подключены к батареям Пельтье. Использование батарей Пельтье, которые могут работать как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения, позволяет измерять температурную зависимость коэффициента черноты, в том числе, при температуре ниже комнатной. Автоматическое регулирование и поддержание заданных значений температуры пластин теплообменника обеспечивают постоянство и воспроизводимость температурного режима всего теплового блока установки.

Принцип действия установки заключается в следующем. С помощью регуляторов температуры задают и поддерживают постоянными значения температуры нижней и верхней пластин теплообменника. Эти значения должны находиться в диапазоне температуры, для которого требуется найти значения коэффициента черноты исследуемого покрытия. При этом разность температур выбирают достаточной для создания в зазоре теплообменника необходимого для уверенных измерений значения теплового потока.

При исследовании метода с помощью такой установки использовались относительные измерения [5], основанные на предварительно установленной градуировочной зависимости значений плотности теплового потока в воздушном зазоре от коэффициента ε черноты, которую определяют с помощью стандартных образцов (СО) с известным коэффициентом черноты поверхности. Для определения такой зависимости в качестве СО были использованы покрытия из алюминиевой фольги ($\varepsilon = 0,02$) и копировальной бумаги ($\varepsilon = 0,92$), а также покрытия, составленные из 75% фольги и 25% копирки ($\varepsilon = 0,24$), СО из 50% фольги и 50% копирки ($\varepsilon = 0,47$), СО из 25% фольги и 75% копирки ($\varepsilon = 0,70$).

Измерения проводились при температуре $T_1 = 20$ С и $T_2 = 30$ С, для которой были известны коэффициенты черноты используемых СО. Полученные градуировочные зависимости (рис. 2) соответствуют их характеру, который описывается формулами (3) и (4).

Анализ источников погрешности измерений, выполненных в [4], с учетом экспериментально полученных результатов, показывает, что при неопределённости значений коэффициента черноты образцов, использованных для построения градуировочной зависимости в 2%, значения погрешности измерений исследованным методом составляют от 4 до 6%. Для большинства практических

приложений это является вполне приемлемой точностью измерений коэффициента черноты покрытий.

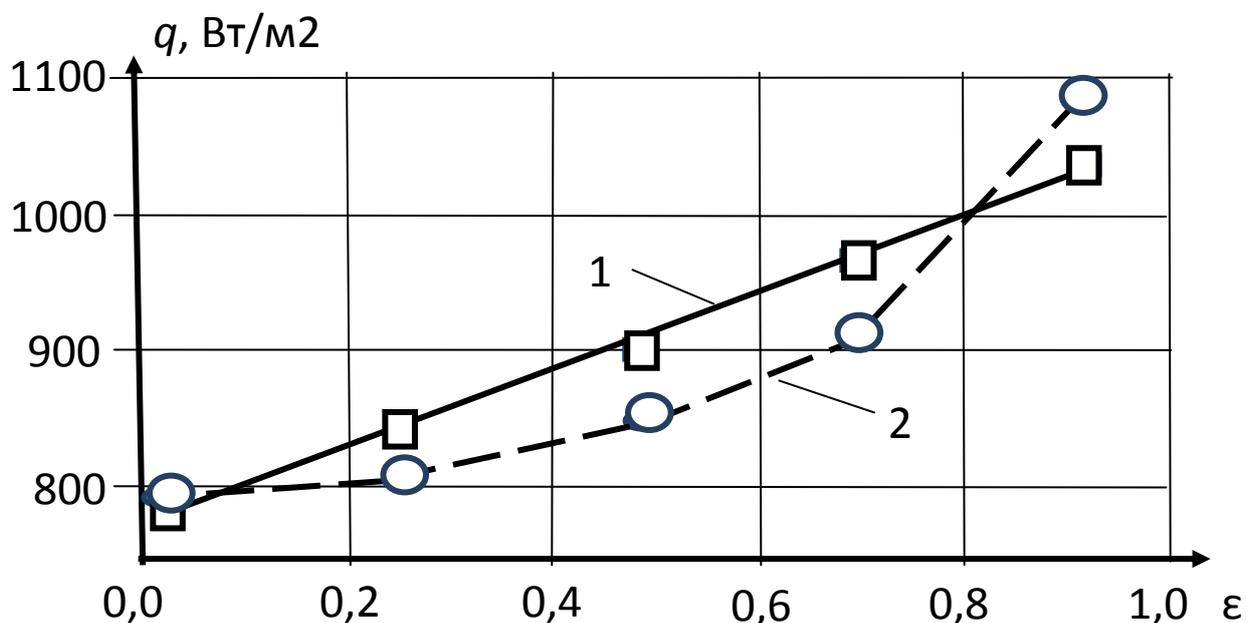


Рис. 2. Экспериментальные градуировочные зависимости $q = f(\varepsilon)$:
1 – одна пластина теплообменника с постоянным $\varepsilon = 0,92$, другая – с изменяющимся ε ; 2 – обе пластины с изменяющимся, но одинаковым ε

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное 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. Черепанов В. Я. Относительные измерения интегральной излучательной способности материалов модуляционным методом // Измерительная техника. – 1981. – № 5. – С. 36 – 38.

© Н. А. Вихарева, В. Я. Черепанов, 2016

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ЮСТИРОВКИ ПРИЕМНОГО КАНАЛА ДВУХВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Иван Михайлович Бушмакин

Акционерное Общество «Производственное Объединение «Уральский оптико-механический завод», 620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33б, начальник отдела оптических систем, тел. (343)229-80-18, e-mail: ivanbushmakin@rambler.ru

Александр Викторович Кошелев

Акционерное Общество «Производственное Объединение «Уральский оптико-механический завод» им. Э. С. Яламова, 620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33б, заместитель генерального директора по НИОКР, тел. (343)229-86-97, e-mail: kancelyariya@uomz.com

Проведён анализ погрешности юстировки приёмного канала двухволнового лазерного дальномера в зависимости от размера сканирующего изображения.

Ключевые слова: погрешность, амплитуда сигнала, свёртка, аберрации, сканирование, изображение диафрагмы.

ANALYSIS OF THE ERROR ADJUSTMENT OF THE RECEIVING CHANNEL TWO-WAVELENGTH LASER RANGEFINDER

Ivan M. Bushmakin

Join-Stock Company «Production Association «Ural Optical and Mechanical Plant» named after Mr. E.S. Yalamov, 620100, Russia, Ekaterinburg, 33b Vostochnaya street, Head of Optical Systems department, tel. (343)229-80-18, e-mail: ivanbushmakin@rambler.ru

Aleksandr V. Koshelev

Join-Stock Company «Production Association «Ural Optical and Mechanical Plant» named after Mr. E.S. Yalamov, 620100, Russia, Ekaterinburg, 33b Vostochnaya street, Deputy General Director, R&D, tel. (343)229-86-97, e-mail: kancelyariya@uomz.com

The analysis of adjustment error of the receiving channel two-wavelength laser rangefinder according to the size of the image scanning.

Key words: error, signal amplitude, convolution, aberration, scanning, diaphragm images.

Лазерные импульсные дальномеры нашли широкое применение в оптико-электронных системах спецтехники. Принцип действия лазерных импульсных дальномеров основан на измерении интервала времени между моментом излучения зондирующего лазерного моноимпульса (старт- импульс) и моментом приема излучения, отраженного от объекта (стоп-импульс). Источником излучения в таких приборах является импульсный лазер, излучение которого коллимируется с помощью оптической формирующей системы. Отраженное от объекта излучение попадает в приемный канал, состоящий из приемного объектива и приемника излучения (далее ФПУ) [1]. Отличительной особенностью двухволнового лазерного дальномера (или дальномера-подсветчика) является

наличие двух излучающих каналов, вместо одного в традиционных лазерных дальномерах. Излучающие каналы работают на разных длинах волн, как правило, 1,06 и 1,57 мкм. Объектив приёмного канала двухволнового лазерного дальномера должен обеспечивать максимальную светосилу и пропускание при заданных габаритах. При этом качество оптической системы ограничено aberrациями (в том числе за счёт широкого диапазона ахроматизации) влияние которых на точность юстировки предстоит определить.

Методика юстировки приёмного канала двухволнового лазерного дальномера (далее приёмного канала) основана на определении центра поля приёма путём сканирования ФПУ изображением точечного источника. Точечный источник задаётся коллиматором с установленной в фокальной плоскости диафрагмой. Сканирование осуществляется с помощью двух пар клиньев, расположенных перед выходным зрачком коллиматора и обеспечивающих сканирование в двух взаимноперпендикулярных направлениях (см. рис. 1). Центр поля приёма находится в положении при котором амплитуда сигнала с ФПУ симметрична относительно центра диапазона сканирования клиньев.

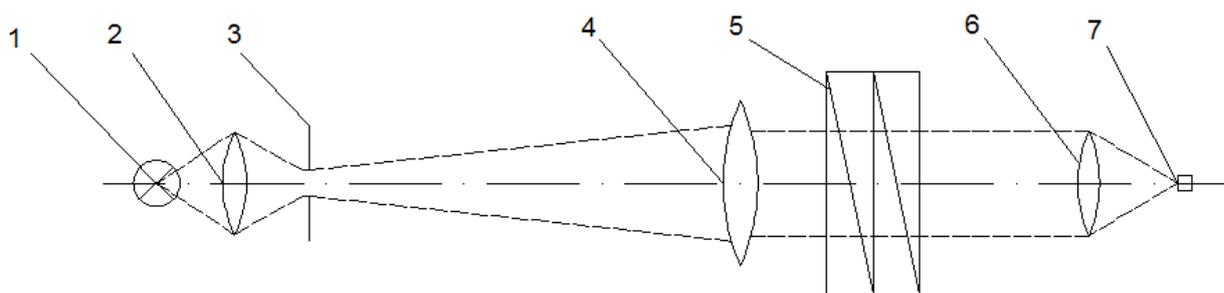


Рис. 1. Схема юстировки приёмного канала лазерного дальномера:

- 1 – Осветитель; 2 – Конденсор; 3 – Диафрагма; 4 – Объектив коллиматора;
5 – Две пары клиньев; 6 – Объектив приёмного канала лазерного дальномера;
7 – ФПУ лазерного дальномера-подсветчика

Одним из параметров, влияющих на точность юстировки, является соотношение между минимальным смещением изображения диафрагмы в плоскости ФПУ и соответствующее этому приращением сигнала с ФПУ, при сканировании изображением диафрагмы. То есть, необходимо определить минимальное смещение изображения диафрагмы в плоскости ФПУ, которое соответствует пороговому значению изменения амплитуды сигнала с ФПУ. Изменение амплитуды сигнала с ФПУ зависит не только от величины смещения изображения диафрагмы, но и от распределения интенсивности излучения в этом изображении. Рассмотрим распределение амплитуды сигнала с ФПУ при сканировании изображением диафрагмы для следующего размерного ряда диафрагм 0,5', 1', 2', 3', и найдём погрешности определения центра поля приёма приёмного канала.

Изменение амплитуды сигнала при прохождении изображения диафрагмы через ФПУ можно представить как свёртку изображения диафрагмы в плоскости ФПУ $G(x,y)$ в параксиальном приближении, функции рассеяния точки объекта приёмного канала $h(x,y)$ и функции распределения чувствительности приёмника $S(x,y)$ [2]:

$$U(x, y) = h(x, y) \otimes G(x, y) \otimes S(x, y) \quad (1)$$

Применив теорему Парсеваля получим[3]:

$$U(x, y) = F^{-1}[F[h(x, y)] \cdot F[G(x, y)] \cdot F[S(x, y)]] \quad (2)$$

При этом

$$h(x, y) = \left| F^{-1}[f(\rho_x, \rho_y)] \right|^2 \quad (3)$$

где $f(\rho_x, \rho_y)$ – зрачковая функция.

Так как качество объектива приёмного канала в основном ограничено сферической абберрацией, а значит, зрачковая функция обладает осевой симметрией и ФПУ имеет круглую форму, то целесообразно перейти в полярные координаты. Тогда

$$S(r) = \begin{cases} 1, r \leq R \\ 0, r > R \end{cases} \quad (4)$$

$$G(r) = \begin{cases} 1, r \leq A \\ 0, r > A \end{cases} \quad (5)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, R – радиус чувствительной площадки приёмника, A – радиус изображения диафрагмы в плоскости ФПУ в параксиальном приближении.

Тогда выражение (2) преобразуется к виду:

$$U(x, y) = F^{-1}[F[h(r)] \cdot F[G(r)] \cdot F[S(r)]] \quad (6)$$

Зрачковая функция будет определяться выражением:

$$f(\rho) = \begin{cases} \tau^{1/2}(\rho) \cdot e^{-2\pi W(\rho)}, \rho \leq 1 \\ 0, \rho > 1 \end{cases} \quad (7)$$

где τ – коэффициент пропускания оптической системы, $W(\rho)$ – волновая абберрация.

Тогда выражение (3) с допущением $\tau=1$ преобразуется к виду

$$h(r) = \left| F^{-1}[\text{circ}(\rho) \cdot e^{-2\pi W(\rho)}] \right|^2 \quad (8)$$

Прямое и обратное преобразование Фурье для осесимметричных функций целесообразно вычислять, используя преобразование Ганкеля:

$$F(v_r) = 2\pi \int_0^{\infty} f(r) \cdot r \cdot J_0(2\pi v_r r) dr \quad (9)$$

$$F^{-1}(r) = 2\pi \int_0^{\infty} f(v_r) \cdot v_r \cdot J_0(2\pi v_r r) dv_r \quad (10)$$

Проведём аппроксимацию волнового фронта объектива с помощью полиномов Цернике в программе Zemax. Подставив выражения 4,5,8 в выражение 6 и выполнив прямое и обратное преобразование Фурье, используя выражения 9,10 получим распределение амплитуды сигнала при сканировании ФПУ изображением диафрагмы для заданного размерного ряда диафрагм (см. рис. 2).

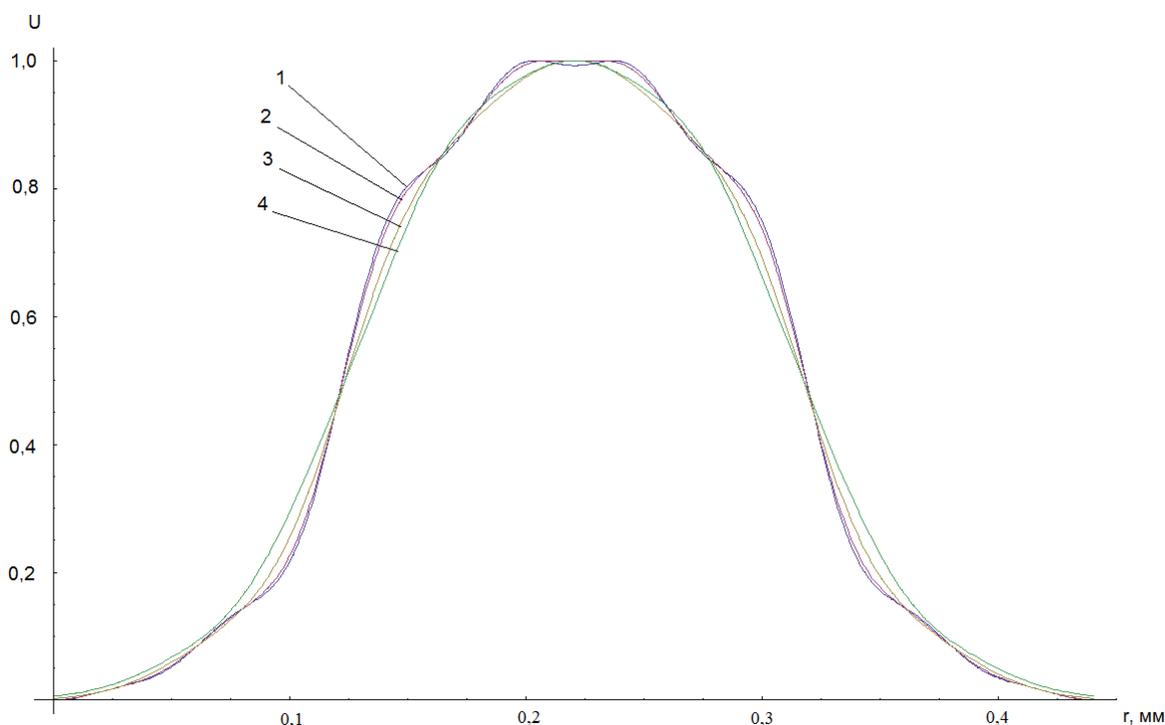


Рис. 2. Распределение амплитуды сигнала при сканировании ФПУ изображением диафрагмы:

1,2,3,4 – Распределение амплитуды сигнала при сканировании ФПУ изображением диафрагмы соответствующее угловому размеру диафрагмы 0,5',1',2',3'

Для вычисления погрешности важно знать не само распределение амплитуды сигнала, а скорость его изменения. Для этого найдём производную от распределения амплитуды сигнала. На рис. 3 показана первая половина графика производной от распределения амплитуды сигнала (вторая половина симметрична первой).

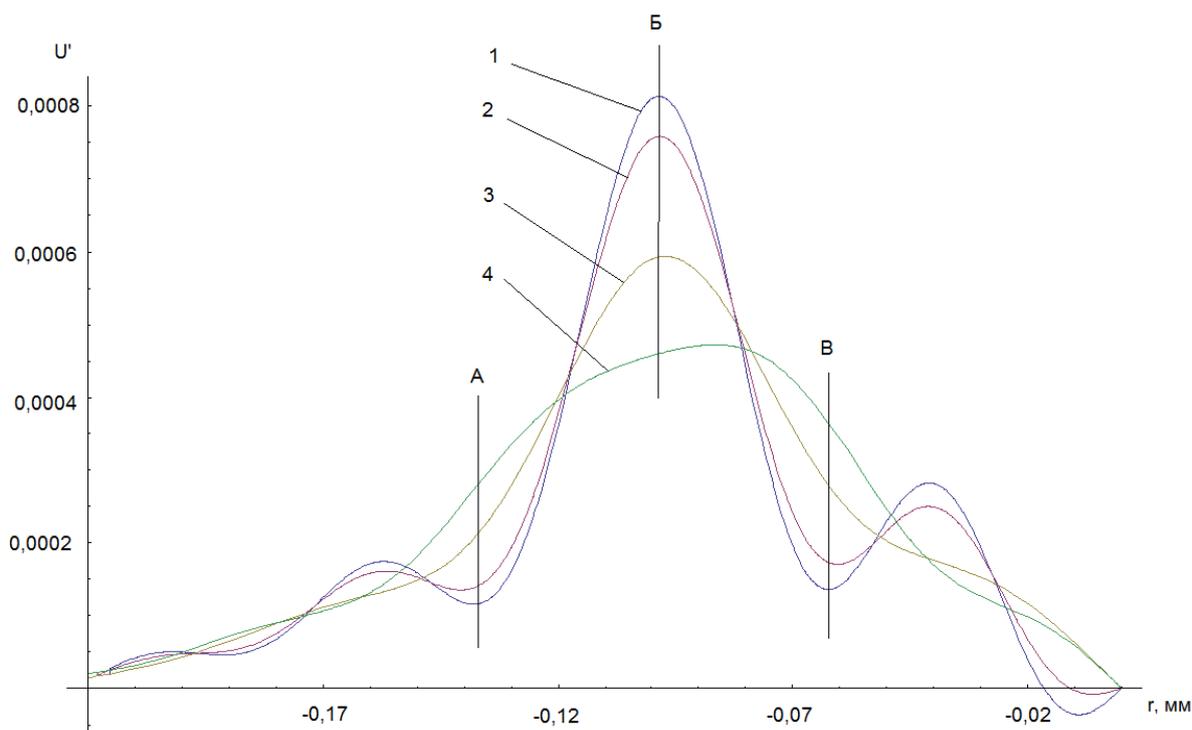


Рис. 3. График производной от распределения амплитуды сигнала при сканировании ФПУ изображением диафрагмы:

1,2,3,4 - График производной от распределения амплитуды сигнала при сканировании ФПУ изображением диафрагмы соответствующее угловому размеру диафрагмы 0,5', 1', 2', 3'

Значение минимального шага изменения амплитуды сигнала с ФПУ, которое уверенно регистрируется, определено эмпирически и составляет 5мВ при амплитуде сигнала 3,5В. Приведя это значение к единице получим $U'_{II}=0,00143$.

Рассмотрим сечения A , B , которые соответствуют значениям 0,15 и 0,83 функции $U(r)$ соответственно и сечение B , которое соответствует значению 0,49 функции $U(r)$. Определим в окрестностях минимумов A, B и максимума B

величину r аргумента функции $U'(r)$, при условии, что $U'(r)=0,00143$. Для этого проинтегрируем функцию $U'(r)$ в окрестностях точек A, B и B и вычислим значение аргумента r для каждого из четырёх распределений. Полученные значения аргумента r в угловой мере приведены в таблице.

Таблица

Погрешность определения поля приёма приёмного канала дальномера-подсветчика для различных размеров диафрагм

	0,5'	1'	2'	3'
Сечение А	1,2"	1"	0,7"	0,5"
Сечение Б	0,17"	0,18"	0,23"	0,29"
Сечение В	1"	0,8"	0,5"	0,4"

Таким образом, максимальная ошибка определения поля приёма приёмного канала возникает при определении центра поля приёма по амплитуде сигнала 0,15 и 0,83 от максимального, а минимальная ошибка – по амплитуде 0,49. При увеличении размера диафрагмы наблюдается уменьшение ошибки по амплитуде сигнала 0,15 и 0,83 и увеличение ошибки – по амплитуде 0,49.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб.пособие / В.Б. Бокшанский [и др.] ; под ред. В. Е. Карасика. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 92 с.
2. Моделирование формирования оптического изображения: учеб.пособие / В.М. Домненко, В.Б. Бурсов, Т.В. Иванова. – СПб. : Изд-во НИУ ИТМО, 2001. – 141 с.
3. Структура оптического изображения /А. Марешаль, М. Франсон. – М. : Изд-во «Мир», 1964. – 295 с.

© *И. М. Бушмакин, А. В. Кошелев 2016*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК

Александр Фёдорович Бродников

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)329-45-82, e-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

Приведены основные итоги исследований реперных точек температурной шкалы, реализуемых в миниатюрных ампулах. Рассмотрены варианты их применения для воспроизведения и передачи единицы температуры.

Ключевые слова: реперная точка, температурная шкала, фазовый переход, плавление и затвердевание металлов, миниатюрная ампула, калибратор температуры.

RESULTS OF RESEARCHES AND PROSPECTS OF APPLICATION TINY REFERENCE POINTS

Alexander F. Brodnikov

Siberian Branch of Russian Academy of Science, Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, 11 Akademika Lavrentieva prospect, cand. tech. sci, senior scientist, tel. (383)329-45-82, e-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

Victor Ya. Cherepanov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph-doctor, professor of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

The main results of researches of the defined points of a temperature scale realized in tiny ampoules are given. Options of their application for reproduction and transfer of unit of temperature are considered.

Key words: reference point, temperature scale, phase transition, melting and hardening of metals, tiny ampoule, temperature calibrator.

Современная температурная шкала основана на воспроизведении реперных точек плавления и затвердевания чистых металлов. Традиционно такие реперные точки воспроизводятся в полногабаритных ампулах, содержащих обычно несколько килограммов высоко чистого металла. Такие носители температурной шкалы используют, как правило, в составе эталонов только на верхних уровнях поверочной схемы для средств измерений температуры. Это обусловлено их высокой стоимостью, определяемой высокой чистотой металлов и необходимостью использования специальных печей для реализации температур

плавления-затвердевания. Поэтому в последние годы наметилась тенденция применения реперных точек в малогабаритных ампулах, содержащих около 0,5 кг чистого вещества. Более того, на протяжении последних десяти лет проводятся исследования возможности реализации реперных точек с массой навески металла менее 5 г, которая размещается в ампуле диаметром менее 10 мм и высотой 20 мм.

На первом этапе исследований по созданию таких миниатюрных реперных точек (МРТ) был рассмотрен вопрос о влиянии теплообмена между ампулой с металлом и окружающей средой на длительность фазовых переходов [1]. Установлено, что при плавлении-затвердевании металла происходит дополнительное поглощение или выделение теплоты, которое приводит к стабилизации его температуры на некоторый период $\Delta\tau$ времени, равный

$$\Delta\tau = \Delta H / Q = m \Delta h / Q ,$$

где ΔH – теплота плавления (затвердевания) навески металла, Q – тепловой поток на поверхности ампулы, $m, \Delta h$ – масса и удельная теплота плавления металла.

Из этого следует важный вывод: длительность фазового перехода зависит не столько от массы металла, сколько от соотношения его теплоты плавления или затвердевания и теплового потока на поверхности ампулы. Следовательно, при исключении этого теплового потока, например, за счет адиабатической оболочки, окружающей ампулу, появляется возможность получения длительных и стабильных реперных точек с практически любой массой металла [2]. Это открывает возможность создания нового поколения МРТ на основе, например, химически активных щелочных металлов с достаточной для практики продолжительностью и стабильностью температуры фазового перехода.

Однако необходимость близости температуры внешней среды к температуре МРТ может привести к ложной стабилизации температуры, обусловленной не фазовым переходом, а стабильной работой, например, термостата, в котором находится МРТ. Для подтверждения истинности наступления фазового перехода предложен модуляционный метод его обнаружения [3]. Он заключается в том, что поверхность ампулы снабжается нагревателем, с помощью которого задаются небольшие периодические колебания теплового потока. При отсутствии фазового перехода это приводит к появлению колебаний температуры металла в ампуле, в которые регистрируются датчиком, установленным внутри навески. При наступлении фазового перехода теплоемкость навески стремится к бесконечности и эти колебания прекращаются.

В качестве примера создания МРТ на основе щелочных металлов впервые предложено использовать температуру плавления натрия ($97,75^\circ\text{C}$), с помощью которой проведено определение действительной температуры кипения воды [4].

Для этого ампулу с натрием помещали в термометрический канал калибратора и устанавливали в нём температуру на $0,3^\circ\text{C}$ выше, чем у плавления

натрия. При этом стабилизация температуры в пределах $\pm 0,01$ °С составила более трёх часов. Для измерений разности температур между навеской натрия и кипящей водой использовалась дифференциальная термопара, у которой один спай помещен в ампулу с натрием, а второй спай прикреплен к контрольному эталонному термометру ПТСВ 2-го разряда, помещенному в сосуд Дьюара с кипящей водой.

Исследования показали, что расхождения значений действительной температуры кипения воды, определенных с использованием реперной точки натрия и контрольным эталонным термометром, не превышают 0,03 °С. Такой результат показывает, что МРТ натрия в комплекте с дифференциальной термопарой могут вполне заменить эталонные платиновые и ртутные термометры 3-го разряда, традиционно используемые для определения действительной температуры кипения воды при поверке различных термометров и термопреобразователей в паровых термостатах.

Аналогичная методика, основанная на использовании МРТ в комплекте с многоспайной дифференциальной термопарой, была разработана для определения погрешности калибраторов температуры [5]. Методика была опробована путём воспроизведения в калибраторе точки затвердевания индия (156,5985 °С) в миниатюрной ампуле (20x9,5 мм). Для этого МРТ вместе с опорными спаями термопары погружают в один из каналов калибратора, а рабочие спаи термопары в стеклянной пробирке с окисью алюминия помещают в исследуемый канал.

Чтобы получить площадку затвердевания калибратор с расплавленным индием охлаждают до температуры 155,5 °С, обеспечивающей переохлаждение и начало кристаллизации расплава. Процесс охлаждения наблюдают по сигналу дифференциальной термопары. После выхода температуры МРТ на площадку затвердевания в калибраторе устанавливают температуру примерно на 0,01 °С ниже температуры затвердевания. Близость температур ампулы и калибратора не только увеличивает продолжительность фазового перехода, но и способствует устранению погрешности, вызванной отводом тепла по проводам термопары.

Было установлено [6], что длительность площадки затвердевания с нестабильностью температуры в пределах ± 1 мК составляет чуть более одного часа, с нестабильностью ± 3 мК – около 3-х часов, а с нестабильностью ± 5 мК – более 4-х часов. По этим характеристикам реперная точка на основе миниатюрной ампулы не уступает реперным точкам, воспроизводимым в ампулах классических размеров.

Таким образом с помощью МРТ можно проводить определение метрологических характеристик калибраторов температуры путем измерений отклонения их показаний от температуры затвердевания индия [7]. Эти отклонения находят по сигналу термопары, опорные спаи которой последовательно размещают в исследуемых каналах калибратора. Таким же способом определяют предусмотренную методикой поверки калибраторов неоднородность и нестабильность температуры в его измерительных каналах.

Рассмотренная методика передачи единицы температуры реализует дифференциальный метод непосредственного сличения двух эталонных мер температуры (МРТ и калибратора), предусмотренный существующей поверочной схемой для средств измерений температуры.

В качестве примера перспективы дальнейшего практического использования МРТ планируется развивать нулевой метод передачи температурной шкалы эталонам и прецизионным средствам измерений температуры.

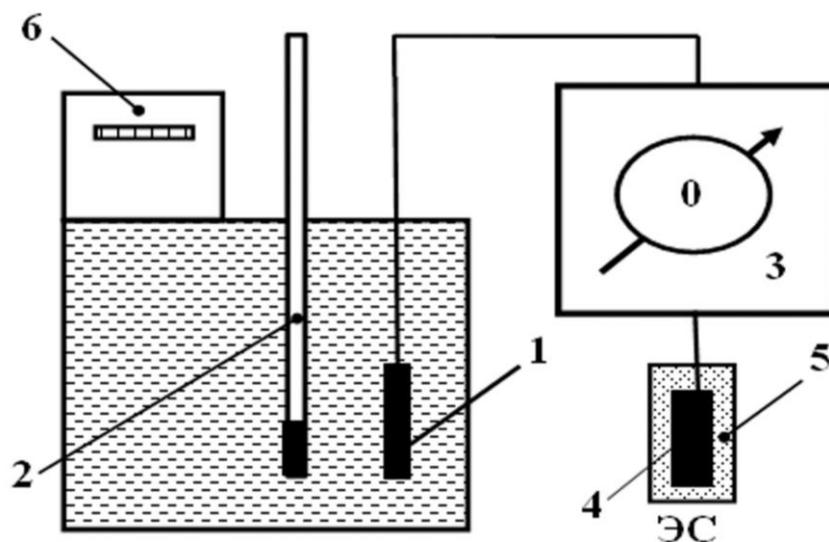


Рис. Нулевой метод передачи значений температуры реперных точек:

- 1 – рабочие спаи дифференциальной термопары; 2 – поверяемый термометр;
- 3 – нуль-индикатор; 4 – МРТ с опорными спаями дифференциальной термопары;
- 5 – тепловой блок МРТ; 6 – регулятор температуры термостата

Нулевой метод непосредственного сличения с использованием МРТ (рисунок), позволяет задавать/поддерживать равенство значений температуры МРТ и температуры, например, жидкостного термостата при проверке находящихся в нем термометров различной конструкции. Для этого температура термостата с помощью регулятора устанавливается равной температуре МРТ по нулевому сигналу дифференциальной термопары. Для этого достаточно иметь высокочувствительный нуль-индикатор.

Для более широкого применения мер температуры на основе МРТ желательно обеспечить их автономность и компактность за счёт создания специальных тепловых ячеек с системой задания температурного режима. При этом целесообразно иметь комплект таких мер на основе ряда чистых металлов, который обеспечит передачу единицы в достаточно широком диапазоне температур. Это позволит осуществлять воспроизведение и передачу единицы температуры методом сличения с помощью МРТ без привлечения громоздких калибраторов и термостатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Создание новых средств воспроизведения и передачи температурной шкалы на основе миниатюрных реперных точек // 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. 135–138.
2. Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Результаты исследований и перспективы использования миниатюрных ампул реперных точек для воспроизведения и передачи температурной шкалы // Измерительная техника. – 2009. – № 10. – С. 49 – 52.
3. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Модуляционный метод обнаружения фазовых переходов плавления-затвердевания в миниатюрных ампулах реперных точек // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 75–78.
4. Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Определение действительной температуры кипения воды с помощью реперной точки натрия // 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. 178–181.
5. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Оптимизация теплового режима при воспроизведении реперных точек температурной шкалы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X 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. 65–70.
6. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Использование калибраторов температуры для воспроизведения реперных точек в миниатюрных ампулах // Приборы. – 2014. – № 9. – С. 28–33.
7. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Методика воспроизведения и передачи единицы температуры реперными точками в миниатюрных ампулах // Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 41–43.

© А. Ф. Бродников, В. Я. Черепанов, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>А. Н. Павленко, А. Д. Назаров, В. Е. Жуков, Н. Б. Миськив, Н. И. Печеркин, Гао Синь, Хонг Суй, Бен Цзян.</i> Система сбора локальных характеристик потока в экспериментальной ректификационной колонне	3
2. <i>А. Д. Назаров, В. Г. Приходько, И. В. Ярыгин, В. Н. Ярыгин.</i> Измерение локальных параметров пристенных пленок жидкостей в теплофизических экспериментах	9
3. <i>А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, О. А. Володин, Луонг Чжан, Хонг Ли.</i> Применение сетчатых покрытий для интенсификации теплообмена в стекающих пленках	15
4. <i>Г. В. Барткус, И. А. Козулин, В. В. Кузнецов.</i> Экспериментальное исследование восходящего газожидкостного течения в прямоугольном микро- и миниканале	22
5. <i>Г. В. Барткус, В. В. Кузнецов.</i> Применение метода лазерно-индуцированной флюоресценции для исследования восходящего газожидкостного течения в прямоугольном микроканале	27
6. <i>И. А. Козулин, Г. В. Барткус, В. В. Кузнецов.</i> Исследование взрывного вскипания метастабильной жидкости оптическими методами	32
7. <i>А. С. Шамирзаев, В. В. Кузнецов.</i> Теплофизические исследования фазовых переходов при вынужденной конвекции в микротеплообменнике	38
8. <i>А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, П. Н. Карпов, В. И. Терехов, В. Н. Мамонов.</i> Экспериментальное исследование пленки жидкости, осажденной из импульсного импактного газочапельного потока вертикальной поверхности теплообменника	44
9. <i>И. Г. Намятов, А. А. Коржавин, А. В. Вьюн.</i> Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на подложке с низкой температуропроводностью	51
10. <i>А. Н. Павленко, В. Е. Жуков, Н. И. Печеркин, А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, Н. Б. Миськив, Ксинганг Ли, Бен Цзян, Хонг Суй, Хонг Ли, Гао Синь.</i> Новый метод повышения эффективности разделения смеси в дистилляционных установках со структурированными насадками с использованием динамически управляемого распределителя жидкости	56
11. <i>М. П. Анисимов, В. Н. Пармон, О. О. Петрова-Богданова.</i> Влияние фазовых переходов в критических зародышах на топологии поверхностей скорости зародышеобразования	63
12. <i>К. Д. Смирнов, В. В. Заматицков, Е. А. Чиннов.</i> Некоторые особенности горения жидкости в узком канале	68

13. <i>В. И. Жуков, А. Н. Павленко.</i> Изучение структур, образующихся при кипении и испарении тонкого горизонтального слоя жидкости	74
14. <i>Е. В. Манжос, Н. А. Какуткина, А. А. Коржавин, А. В. Вьюн.</i> Экспериментальное исследование зажигания волн фильтрационного горения газа открытым пламенем при различных условиях внешнего теплообмена	79
15. <i>В. В. Кузнецов.</i> Двухфазные микрожидкостные системы: теплофизические основы и инженерные концепции	84
16. <i>А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Л. А. Боряняк.</i> Оптические системы локальной и полевой диагностики газожидкостных потоков.....	93
17. <i>Е. А. Панков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова.</i> Повышение технологичности конструкции транспортного самолета.....	100
18. <i>Н. А. Сейфи, А. А. Голицын.</i> Лабораторный стенд для исследования возможностей ПЗС-фотоприемника по использованию в составе активно-импульсного прибора наблюдения.....	105
19. <i>А. А. Голицын.</i> Использование в составе цифрового прицела фотоприемника с избыточным разрешением	108
20. <i>Г. А. Сырецкий.</i> Искусственный интеллект и производственная безопасность: настоящее и будущее.....	112
21. <i>Г. А. Сырецкий.</i> Системно-модельный подход как базис поддержки жизненного цикла изделий и автоматизации его процессов	118
22. <i>Д. Г. Сырецкий, Г. А. Сырецкий, П. С. Завьялов, Л. В. Финогенов, Е. В. Власов, А. В. Белобородов, Я. В. Килин.</i> Автоматизированный комплекс оптико-электронной разбраковки таблеток керамического ядерного топлива	124
23. <i>С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов, В. С. Соболев.</i> Быстродействующий приемник ИК-излучения на основе пироэлектрических пленок	130
24. <i>Ю. А. Трясов, И. Б. Южик.</i> Проблемы импортозамещения при проектировании и производстве современных оптоэлектронных комплексов	135
25. <i>О. К. Ушаков, П. В. Петров, В. А. Павленко.</i> Оптико-кинематическая схема тренажера для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям.....	143
26. <i>А. В. Макеев.</i> Об оптических методах контроля шероховатости поверхности.....	147
27. <i>М. М. Бузинов, М. П. Егоренко, И. Н. Карманов.</i> Разработка 3D-принтера на основе SLA технологии	152
28. <i>В. М. Тиссен, А. А. Вараксин.</i> Анализ возможностей повышения точности прогнозов ПВЗ за счет комбинирования разных методов	157
29. <i>М. С. Малыгин, В. И. Шлычков.</i> Исследование эффективности калибровки лазерных триангуляционных устройств	162
30. <i>Л. Б. Воробьева, С. А. Степанова.</i> Влияние сырьевых особенностей талька на качество форстеритовой керамики	167

31. Г. В. Шувалов, О. В. Минин, И. В. Минин, А. Д. Зонова. Методика измерений размеров частиц аэрозолей на системе «Квантимет 720».....	173
32. С. Е. Протасова. Оценка факторов искажения значений прецизионных интегральных резисторов в процессе изготовления аналоговых интегральных схем.....	183
33. Г. В. Шувалов, И. В. Минин, О. В. Минин, М. Г. Клековкина, О. А. Ясырова, Е. А. Костенко. Метрологическое обеспечение измерений некоторых параметров нефтепродуктов.....	186
34. Г. В. Шувалов, О. В. Минин, И. В. Минин, А. Д. Зонова, С. В. Ромасько. Ключевые аспекты стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года	191
35. Г. В. Шувалов, И. В. Минин, О. В. Минин, М. Г. Клековкина, О. А. Ясырова, Е. А. Костенко. Перспективы импортозамещения средств измерений для определения показателей качества нефтепродуктов	200
36. А. В. Трифанов, В. Я. Костюченко, Д. Ю. Протасов. Разработка системы фильтрации с обратной связью для определения концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках	206
37. А. С. Толстиков, А. А. Карауш, Е. А. Ханькова. О метрологических характеристиках частотно-временной основы ГЛОНАСС	211
38. А. С. Толстиков, А. В. Блукке, А. Г. Васильев, И. С. Дехант, А. В. Шабанова. Пути повышения точности координатно-временных определений на основе спутниковых навигационных технологий.....	216
39. Г. В. Симонова, Е. П. Хлебникова. Оценка температурных искажений при оперативном контроле оптических заготовок.....	220
40. С. В. Савелькаев, В. А. Литовченко, С. В. Ромасько, Н. В. Заржецкая. Метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей	224
41. Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, О. В. Минин, И. В. Минин. Влияние анизотропии свойств на изменение физических и механических свойств поверхности металла.....	229
42. Н. А. Вихарева, В. Я. Черепанов. Исследование теплотрического метода измерений коэффициента черноты поверхностей.....	234
43. И. М. Бушмакин, А. В. Кошелев. Анализ погрешности юстировки приемного канала двухволнового лазерного дальномера.....	239
44. А. Ф. Бродников, В. Я. Черепанов. Результаты исследований и перспективы применения миниатюрных реперных точек.....	245

CONTENTS

1. <i>A. N. Pavlenko, A. D. Nazarov, V. E. Zhukov, N. B. Miskiv, N. I. Pecherkin, Gao Xin, Hong Sui, Bin Jiang.</i> Collection system of local flow characteristics in experimental distillation column	3
2. <i>A. D. Nazarov, V. G. Prikhodko, I. V. Yarygin, V. N. Yarygin.</i> Measurements of near-wall liquid film local parameters in thermo-physical experiments	9
3. <i>A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, O. A. Volodin, Luhong Zhang, Hong Li.</i> Application of mesh coating for heat transfer intensification in falling films	15
4. <i>G. V. Bartkus, I. A. Kozulin, V. V. Kuznetsov.</i> Experimental research of upward gas-liquid flow in rectangular micro- and minichannel.....	22
5. <i>G. V. Bartkus, V. V. Kuznetsov.</i> Application of laser-induced fluorescence for study of upward gas-liquid flow in rectangular microchannel.....	27
6. <i>I. A. Kozulin, G. V. Bartkus, V. V. Kuznetsov.</i> Investigation of explosive boiling metastable liquid by optical methods.....	32
7. <i>A. S. Shamirzaev, V. V. Kuznetsov.</i> Thermophysical study of phase change during forced convection in micro heat exchanger.....	38
8. <i>A. D. Nazarov, A. F. Serov, P. N. Karpov, V. I. Terekhov, V. N. Mamonov.</i> Experimental study of a liquid film deposited from a pulsed impact gas droplet flow on the vertical surface of the heat exchanger.....	44
9. <i>I. G. Namyatov, A. A. Korzhavin, A. V. V'yun.</i> Flame spreading over liquid fuel film deposited on the substrate with low temperature diffusivity	51
10. <i>A. N. Pavlenko, V. E. Zhukov, N. I. Pecherkin, A. D. Nazarov, A. F. Serov, N. B. Miskiv, Xingang Li, Bin Jiang, Hong Sui, Hong Li, Gao Xin.</i> Dynamically controlled liquid distributor for distillation column with a structured packing	56
11. <i>M. P. Anisimov, V. N. Parmon, O. O. Petrova-Bogdanova.</i> The impact of the phase transitions in the condensed meter embryos on the nucleation rates surface topologies	63
12. <i>K. D. Smirnov, V. V. Zamashchikov, E. A. Chinnov.</i> Some features of the liquid burning in a narrow channel	68
13. <i>V. I. Zhukov, A. N. Pavlenko.</i> The study of structures induced by boiling and evaporating of horizontal thin liquid films	74
14. <i>E. V. Manzhos, N. A. Kakutkina, A. A. Korzhavin, A. V. V'yun.</i> Open flame at different conditions of external heat exchange.....	79
15. <i>V. V. Kuznetsov.</i> Two-phase microfluidics: thermophysical fundamentals and engineering concepts	84
16. <i>A. P. Belousov, P. Ya. Belousov, L. A. Borynyak.</i> Optical systems of local and spatial gas-liquid flows diagnostics.....	93

17. <i>E. A. Pankov, T. V. Larina, E. Yu. Kutenkova.</i> Improving technological construction of transport aircraft	100
18. <i>N. A. Seifi, A. A. Golitsyn.</i> Laboratory stand for research of features of the CCD-sensor for use in the composition of the active pulse of the surveillance device	105
19. <i>A. A. Golitsyn.</i> The use of the image sensor with excess resolution as a component of the digital sight.....	108
20. <i>G. A. Syretsky.</i> Artificial intelligence and information security: the present and the future	112
21. <i>G. A. Syretsky.</i> System-model approach as the basis of support life cycle of products and automation its processes	118
22. <i>D. G. Syretskiy, G. A. Syretskiy, P. S. Zavyalov, L. V. Finogenov, E. V. Vlasov, A. V. Beloborodov, Ya. V. Kilin.</i> Automated complex optical-electronic sorting of tablets ceramic nuclear fuel.....	124
23. <i>S. D. Ivanov, E. G. Kostsov, V. S. Sobolev.</i> Fast response IR-radiation detector based on pyroelectric films	130
24. <i>Yu. A. Trjasov, I. B. Juzhik.</i> The problem of import substitution in the design and production of modern opto-electronic complexes	135
25. <i>O. K. Ushakov, P. V. Petrov, V. A. Pavlenko.</i> Optic-kinematic trainer for firing direct aiming on moving-targets	143
26. <i>A. V. Makeev.</i> Optical methods for control of surface microgeometry	147
27. <i>M. M. Buzikov, M. P. Egorenko, I. N. Karmanov.</i> Development of 3D-printers based on SLA technology	152
28. <i>V. M. Tissen, A. A. Varaksin.</i> The analysis of possibilities of increase of accuracy of forecasts ERP due to the combination of different methods	157
29. <i>M. S. Malygin, V. I. Shlychkov.</i> Research of the calibration efficiency of laser triangle devices	162
30. <i>L. B. Vorobyeva, S. A. Stepanova.</i> Influence of raw talc features on the quality of ceramics forsterite	167
31. <i>G. V. Shuvalov, O. V. Minin, I. V. Minin, A. D. Zonova.</i> Measurement procedure of aerosol particle size on the «Quantimet 720» system.....	173
32. <i>S. E. Protasova.</i> Evaluation factors integrated precision distortion value resistors in the process of manufacturing analog integrated circuits	183
33. <i>G. V. Shuvalov, I. V. Minin, O. V. Minin, M. G. Klekovkina, O. A. Yasyrova, E. A. Kostenko.</i> Metrological support of measurements of some parameters of oil products.....	186
34. <i>G. V. Shuvalov, O. V. Minin, I. V. Minin, A. D. Zonova, S. V. Romasko.</i> Key aspects of strategies for unity of measurements in the Russian Federation until 2025.....	191
35. <i>G. V. Shuvalov, I. V. Minin, O. V. Minin, M. G. Klekovkina, O. A. Yasyrova, E. A. Kostenko.</i> Prospects of measuring import substitution to determine a quality of petroleum products	200

36. <i>A. V. Trifanov, V. Y. Kostuchenko, D. Y. Protasov.</i> Feedback filtration system development for determination density and mobility of charge carriers in semiconductors.....	206
37. <i>A. S. Tolstikov, A. A. Karaush, E. A. Hanikova.</i> About metrological characteristics of time and frequency measurement on GLONASS	211
38. <i>A. S. Tolstikov, A. V. Blukke, A. G. Vasilev, I. S. Dehant, A. V. Shabanova.</i> Ways of improving the coordinate-time accuracy on the basis of satellite navigation technologies	216
39. <i>G. V. Simonova, E. P. Khlebnikova.</i> Evaluation of the thermal distortions at the operational control of optical billet	220
40. <i>S. V. Savelkaev, V. A. Litovchenko, S. V. Romasko, N. V. Zarzhetsky.</i> Stability analysis method of active microwave circuits.....	224
41. <i>T. V. Larina, E. Yu. Kutenkova, O. V. Minin, I. V. Minin.</i> The influence of anisotropy of properties on the changes in the physical and mechanical properties of the metal surface	229
42. <i>N. A. Vikhareva, V. Ya. Cherepanov.</i> Research of the action of heat method of measurements of coefficient of blackness of surfaces	234
43. <i>I. M. Bushmakin, A. V. Koshelev.</i> Analysis of the error adjustment of the receiving channel two-wavelength laser rangefinder	239
44. <i>A. F. Brodnikov, V. Ya. Cherepanov.</i> Results of researches and prospects of application tiny reference points.....	245

Научное издание

XII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

СибОптика-2016

Т. 1

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *К. В. Ионко, Л. Н. Шилова, Н. Ю. Леонова*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 10.05.2016. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,88. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.