



# ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 1, № 1 • 2022

INNOVATIVE INSTRUMENTATION



ГУАП





**ГУАП**

Санкт-Петербургский  
государственный  
университет  
аэрокосмического  
приборостроения

# ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 1, № 1 • 2022

# INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 1, no. 1 • 2022



**SUAI**

Saint Petersburg  
State University  
of Aerospace  
Instrumentation

### Innovative Instrumentation

Founded in 2022

#### Founder

Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation

#### Publisher

Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation

#### Chief Editor

E. A. Frolova,  
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,  
Director of the Institute of Fundamental  
Training and Technological Innovation,  
Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation

#### Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,  
PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor

#### Executive Secretary

V. A. Tushavin,  
D. Sc. in Technical Sciences

#### Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.  
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.  
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.  
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.  
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.  
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.  
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.  
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.  
V. A. Tushavin, D. Sc.  
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.  
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.  
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

### Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for  
Supervision of Communications, Information Technology  
and Mass Media (Roskomnadzor),  
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

#### Publication frequency: 4 issues per year

The journal's pages are open for discussion  
materials; its content does not necessarily reflect  
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal  
"Innovative Instrumentation" to foreign editions  
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"  
is mandatory.

#### Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,  
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,  
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation  
Tel.: (812) 494-70-69  
E-mail: ip@guap.ru  
Website: <https://guap.ru/inps>

#### Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.  
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.  
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member  
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.  
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.  
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician  
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician  
V. I. Shevchenko, D. Sc.  
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Editor *V. A. Chernikova*  
Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 26.10.2022. Signed for printing: 31.10.2022. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,  
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

### Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

#### Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

#### Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

#### Главный редактор

Е. А. Фролова,  
доктор технических наук, доцент,  
директор института фундаментальной  
подготовки и технологических инноваций,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

#### Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,  
кандидат технических наук, доцент

#### Ответственный секретарь

В. А. Тушавин,  
доктор технических наук

#### Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.  
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.  
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.  
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.  
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.  
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.  
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.  
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.  
В. А. Тушавин, д-р техн. наук  
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.  
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.  
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

### Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.  
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496  
от 24.06.2022 – печатное издание)

**Периодичность издания:** 4 номера в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных  
материалов; его содержание не обязательно  
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное  
приборостроение» в зарубежные издания допускается  
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»  
обязательна.

#### Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр ГУАП,  
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А  
Редакционно-издательский центр  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»  
Тел.: (812) 494-70-69  
E-mail: ip@guap.ru  
Сайт: <https://guap.ru/inps>

#### Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.  
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.  
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН  
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.  
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.  
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН  
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН  
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук  
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Редактор *В. А. Черникова*

Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 26.10.2022. Дата выхода в свет: 31.10.2022. Формат 60 × 84 1/8.  
Уч.-изд. л. 12,9. Усл. печ. л. 11,3. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.) Заказ № 542.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП  
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

## О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СМИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.

## ДОРОГИЕ КОЛЛЕГИ!

Перед вами первый выпуск научного рецензируемого журнала «Инновационное приборостроение». Геополитические события нескольких последних лет требуют от нас активной работы в сфере импортозамещения, в том числе в сфере приборостроения. Несмотря на передовой опыт в отдельных отраслях в этой области, имеется проблема, связанная с недостатком площадок информационного обмена для всех заинтересованных сторон, в частности научных СМИ в данной предметной области. Именно это определило решение о создании и регистрации в качестве СМИ нашего нового научного журнала.

«Инновационное приборостроение» – первое междисциплинарное научное издание, выпускаемое с целью отражения результатов научно-исследовательской, научно-практической и экспериментальной деятельности активно работающих ученых – докторов и кандидатов наук, молодых исследователей – докторантов, аспирантов, магистрантов, активно занимающихся научной и инновационной деятельностью как в приборостроении, так и в смежных областях.

Основной миссией журнала является фокусирование на его страницах основных достижений отечественной и мировой университетской и отраслевой науки в сфере разработки новых технологий в приборостроении для обеспечения профессионального диалога между его авторами и читателями и выявления потенциала для прорывных инноваций, а также отражения связанной проблематики, носящей мультидисциплинарный характер.



Журнал «Инновационное приборостроение», я не сомневаюсь, будет жить большой, нужной читателям широкой научной жизнью и даст много прекрасных выпусков, способствующих развитию и процветанию отечественного приборостроения.

**Юлия Анатольевна Антохина**  
доктор экономических наук, профессор,  
ректор ГУАП

## Приветствую всех читателей и авторов научного журнала «Инновационное приборостроение»!

Первый номер журнала посвящен достижениям и проблемам развития цифровой метрологии, которая становится важнейшим звеном обеспечения инноваций в приборостроении. Внедрение передовых цифровых измерительных технологий при создании современной техники, особенно в области аэрокосмического приборостроения, создает гарантии высокого качества уникальной продукции, ее безотказной работы.

Исследование роли цифровой метрологии в совершенствовании деятельности высокотехнологичных предприятий находится сегодня в центре внимания ученых и преподавателей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Коллективом нашей кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности совместно с коллегами других подразделений ГУАП в 2021 г. было выпущено учебное пособие «Цифровая метрология», а в 2022 г. подготовлен учебник «Основы цифровой метрологии». В этих изданиях обобщены и представлены последние данные о методах обработки и оценивания точности измерений, о влиянии цифровизации на метрологическую деятельность. Таким образом, учебный процесс в университете обеспечен самыми актуальными содержательными и методическими материалами, позволяющими выпускникам ГУАП уверенно ориентироваться в задачах цифровой метрологии, добиваться высокой точности измерений при создании новой техники и оборудования.

В ГУАП накоплен большой опыт издания научных журналов, имеющих квалифицированную и широкую читательскую аудиторию. Старт нового журнала открывает еще одно направление научного и творческого сотрудничества с нашими коллегами из других вузов и учреждений Российской академии наук, с работниками приборостроительных предприятий, крайне заинтересованных в создании и внедрении самых передовых технологий.



Уверен, что этот и последующие выпуски журнала «Инновационное приборостроение» будут способствовать увеличению вклада научных учреждений и высшей школы не только в технический прогресс аэрокосмической отрасли, но и в успешное инновационное развитие всей российской экономики.

**Владимир Валентинович Окрепилов**  
доктор технических наук, профессор, академик РАН,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
президент Метрологической академии,  
заведующий кафедрой метрологического  
обеспечения инновационных технологий  
и промышленной безопасности ГУАП

Научная статья  
УДК 389:14:006:354

## Развитие цифровой метрологии – путь в новое качество экономики

Владимир Валентинович Окрепилов<sup>1</sup>

✉ okrepilov@test-spb.ru, orcid.org/0000-0003-0830-2081

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассматривается зарубежный и отечественный опыт становления цифровой метрологии как важнейшего направления в процессе цифровизации экономики. Представлены подходы к развитию цифровой метрологии в организационной, законодательной, методической и технической сферах. Особый акцент сделан на обеспечении качества, общедоступности и безопасности цифровых метрологических услуг для бизнеса и населения.

**Ключевые слова:** цифровизация экономики, цифровая метрология, цифровая платформа, облачные технологии, Метрологическая академия

**Для цитирования:** Окрепилов В. В. Развитие цифровой метрологии – путь в новое качество экономики // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 7–16.

Original article

## The development of digital metrology is the way to a new quality of the economy

Vladimir V. Okrepilov<sup>1</sup>

✉ okrepilov@test-spb.ru, orcid.org/0000-0003-0830-2081

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article examines the foreign and domestic experience of the formation of digital metrology as the most important direction in the process of digitalization of the economy. Approaches to the development of digital metrology in organizational, legislative, methodological and technical spheres are presented. Special emphasis is placed on ensuring the quality, accessibility and safety of digital metrological services for business and the public.

**Keywords:** digitalization of the economy, digital metrology, digital platform, cloud technologies, Metrological Academy

**For citation:** Okrepilov V. V. The development of digital metrology is the way to a new quality of the economy. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):7–16. (In Russ.).

### Введение

Метрология, являясь одним из важнейших инструментов обеспечения качества в любых сферах деятельности, вступила в период радикальных перемен, связанных со стремительным развитием цифровизации.

Сегодня уже можно весьма определенно говорить о формировании основ цифровой метрологии – нового направления метрологии, которое все активнее обеспечивает вхождение в нашу жизнь цифровой экономики.

Развитие цифровой метрологии происходит в четырех сферах – законодательной, организационной, методической и технической. Особое внимание государственных органов России и общественных метрологических объединений, прежде всего – Метрологической академии, отменившей в 2022 г. 30-летие с начала своей дея-

тельности, направлено на создание качественной правовой базы, техническое переоснащение метрологических организаций и подразделений на предприятиях, а также на совершенствование подготовки кадров, соответствующих новому уровню требований к метрологическому обеспечению цифровой экономики.

Перед специалистами государственных научных метрологических институтов поставлена задача в ближайшие годы разработать программу цифровой трансформации российской метрологии. Для этого намечено пять основных направлений:

1) цифровая трансформация метрологических услуг, в том числе создание инфраструктуры для цифровых сертификатов калибровки, создание метрологического облака;

2) метрология в анализе больших данных – разработка методов их анализа и машинного обучения для Big Data;



3) метрология коммуникационных систем нового поколения, в том числе для сетей 5G;

4) метрология интеллектуальных средств измерений – самонастройка и самокалибровка;

5) метрология для моделирования и виртуальных приборов [1].

В России развитие цифровой метрологии находится в компетенции Минпромторга, непосредственно за выполнение работ отвечает Росстандарт. Для координации этой деятельности в структуре Росстандарта было создано Управление цифрового развития технического регулирования.

В составе Метрологической академии действуют девять координационных научных советов, и практически каждый из них сегодня рассматривает вопросы цифровизации метрологической деятельности по своим направлениям. При этом такие советы по законодательной метрологии, по фундаментальным проблемам метрологии, по аналитическому исследованию потребности в развитии метрологии обсуждают и предлагают решения, касающиеся общих проблем состояния и перспектив цифровой метрологии, а научные советы по метрологии в физико-химии, в медицине, в первую очередь, занимаются проблемами совершенствования приборной базы и повышения точности и эффективности измерений в этих отраслях, что прямо связано с цифровизацией.

Важнейшая роль развития цифровой метрологии в процессе цифровизации экономики была особо подчеркнута в приветственном обращении директора Международного бюро мер и весов (МБМВ) Мартина Милтона и директора Международного бюро законодательной метрологии (МБЗМ) Энтони Доннеллана по случаю Всемирного дня метрологии 20 мая 2022 г. В Обращении отмечалось, что «цифровая трансформация в области метрологии может принести большую пользу. Например, ускорится ввод измерительных продуктов и услуг на рынок, и меньше времени будет занимать процесс утверждения, что, в свою очередь, окажет благоприятное воздействие на инновационное развитие, темпы продвижения продукции и обеспечение устойчивости» [2].

Со своей стороны МБМВ и Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) очень многое делают для создания и применения цифровых измерительных платформ в мировой и национальных экономиках, для распространения передового опыта в сфере цифровизации и внедрения цифровой основы для всех пользователей данных по измерениям.

## Международный опыт внедрения цифровой метрологии

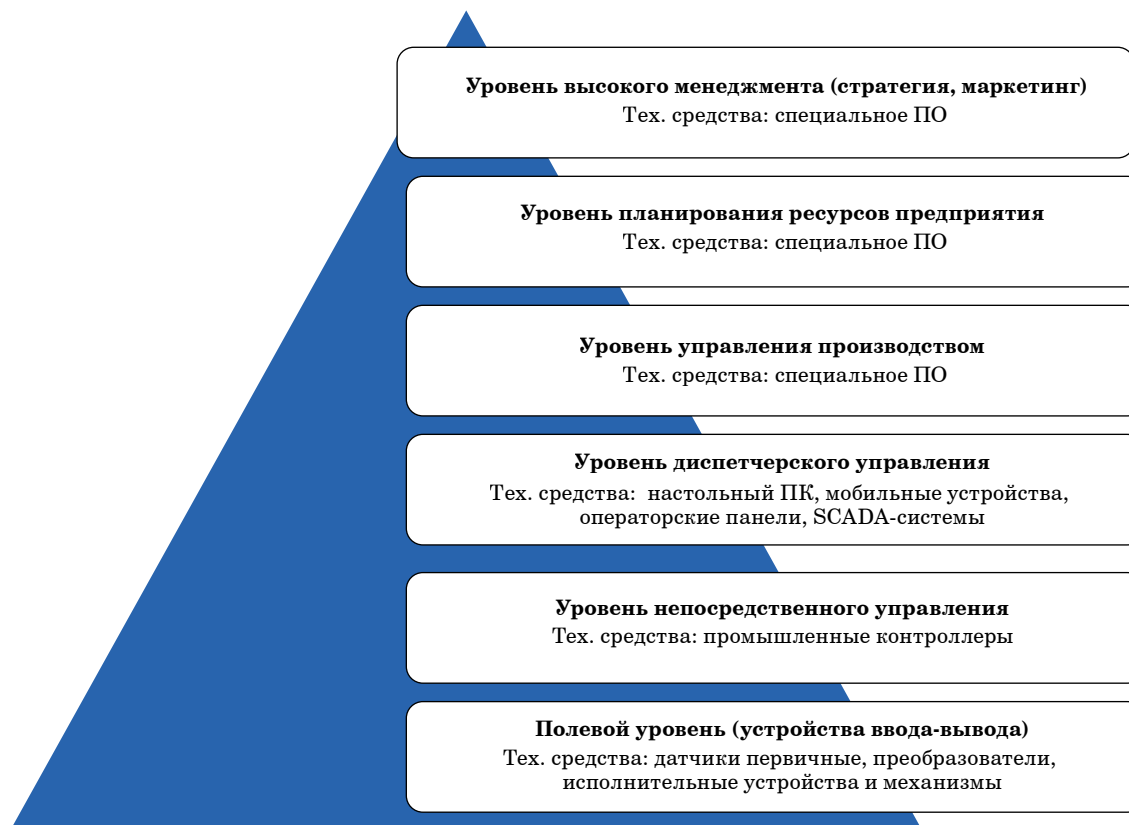
В последние годы цифровая трансформация мировой экономики создает устойчивую картину нового этапа развития промышленности. Объединение всей сферы деятельности современного предприятия в единую информационную среду является основой Индустрии 4.0. Такая интеграция позволяет оптимизировать используемую информацию, интегрировать бизнес-процессы, в том числе процессы управления материалами, разработками и производством, в единую систему, получить доступ ко всем данным, существующим на предприятии, для анализа с целью оптимизации управленческих процессов. Частично это задача уже решена путем внедрения передовых автоматизированных систем управления (АСУ), однако еще остается открытым целый ряд вопросов.

Организационную структуру предприятия можно представить в виде пирамиды автоматизации (рис. 1). На самой вершине пирамиды располагается уровень высокого менеджмента, на самом нижнем уровне находятся технические измерения, результаты которых поступают в существующие АСУ через устройства ввода-вывода, вручную. Автоматизация и роботизирование процесса измерений, создание виртуальных лабораторий позволит как уменьшить погрешности измерения, так и добиться исключения человеческого фактора при работе с отчетной документацией. Несомненно, удобна и система дистанционной калибровки и поверки средств измерения, выдачи электронных сертификатов, которые могли бы автоматически вноситься в базу данных предприятия.

Хранение таких объемов информации, в свою очередь, требует внедрения облачных технологий, организации и систематизации данных. Обработка больших объемов информации невозможна без инструментов Big Data, предсказание и ведение аналитики – без методов машинного обучения. Внедрение таких технологий, несомненно, требует оценки точности и корректности работы с точки зрения метрологии.

Проведение дистанционных измерений, калибровки и поверки возможно реализовать, например, методами машинного зрения. Дальнейшая передача данных об измерении беспроводным путем тоже требует особого внимания. Пока не разработано законченной и целостной теории оценки погрешности при проведении подобных процедур.

В научном метрологическом сообществе появляются проекты создания национальных и



- *Рис. 1. Пирамида автоматизации*
- *Fig. 1. Automation pyramid*

международных метрологических облаков, виртуальных лабораторий, цифровых двойников, дистанционных процедур прохождения поверки и калибровки средств измерений, выдачи электронных сертификатов. Тенденция однозначно направлена в сторону средств измерений с распределенными, частично виртуализированными компонентами и применения облачных сервисов (Cloud-Services).

Координационный научный совет Метрологической академии по международному сотрудничеству постоянно изучает и обобщает передовой мировой опыт в сфере развития цифровой метрологии. Наиболее тесное сотрудничество в последние годы развивалось с коллегами из Германии, являющейся одним из лидеров в этой области.

Физико-техническое федеральное ведомство Германии – Национальный институт метрологии (PTB) – представило проект внедрения облачных технологий «метрологическое облако» (Metrology Cloud). Архитектура и объем системы облачного хранилища представляется гармоничной и всеобъемлющей структурой. Одним из характерных преимуществ является включение в общий процесс производителей и пользователей средств из-

мерений стран Евросоюза, а также владельца измерительной информации. Координируя исследовательскую и прикладную деятельность в области обеспечения единства измерений, можно добиться единого уровня качества производства, решения сложных задач, а также формирования перспективных задач и планов развития для производителей средств измерений. РТВ полностью описывает жизненный цикл сетевого облачного инструмента для национального уровня, а также предлагает расширить проект до европейского масштаба в виде единого Европейского метрологического облака (European Metrology Cloud) [3].

Принцип работы метрологического облака представлен на примере цифровизации измерений. Полностью оцифрованный жизненный цикл процесса измерения с помощью умного средства измерений показан на рис. 2. Под «умным средством измерения» подразумевается цифровой измерительный прибор, способный передавать результаты измерений в облачное хранилище беспроводным способом, например, с помощью Bluetooth.

Синий круг на рис. 2 представляет Интернет вещей. Здесь данные хранятся в безопасном удаленном хранилище, облаке; центральный прямо-



- *Рис. 2. Метрологическое облако*
- *Fig. 2. Metrological Cloud*

угольник представляет собой умное средство измерения и его цифровое представление, хранящееся на облаке. В метрологическом облаке также хранится полная информация об умном средстве измерения в течение всего срока его эксплуатации и цифровой след.

Подходы в области науки о данных, включая большие данные, искусственный интеллект, машинное обучение, позволят создать инновационные системы измерения. Существующие правила и руководства обновляются, чтобы установить четкие процедуры по рационализации инноваций, позволяющие создать дополнительную ценность для «цифровых» метрологических услуг.

Этот первый набор возможностей для исследований и разработок включает в себя:

- 1) наличие таких функций, как целостность, доступность и качество данных измерений от сенсорных сетей;
- 2) оцифровку данных калибровки, отчетов и сертификатов;

3) разработку политик управления данными для улучшения внутренней прослеживаемости и соблюдения принципов FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable) для Открытой науки.

Жизненный цикл начинается с запуска облачной технологии, настройки возможности дистанционного управления умным средством измерения, принятия плана его дистанционного обслуживания, организации возможности непрерывного анализа поступающих данных с умного средства измерения в облако. Умное средство измерения обязательно имеет физическую и электронную маркировку, цифровое представление, в которое входит не только техническая документация на прибор, но и цифровые сертификаты калибровки, поверки, подтверждения соответствия и т. п.

Кроме документации на умное средство измерения, в облаке должна храниться в электронном виде документация о прохождении процедуры поверки (в том числе в дистанционном формате),

обслуживания оборудования, вся отчетная информация об испытаниях в виде электронного или цифрового протокола испытаний с возможностью дальнейшей обработки результатов.

РТВ ведет активную разработку целого пакета цифровых документов, составляющих цифровое представление: цифровой сертификат калибровки, соответствия, поверки.

Цифровой сертификат калибровки (DCC) – это стандарт, разработанный РТВ для цифрового и машиночитаемого представления сертификата калибровки, включая криптографическую подпись для подтверждения его подлинности. В качестве первого шага к поддержке приложений, выходящих за рамки законодательной метрологии, цифровое представление измерительных приборов в облаке было расширено, чтобы также позволить пользователям загружать DCC. Поскольку очень легко проверить структурную целостность DCC и извлечь отдельные фрагменты информации, появляется возможность создавать производные рабочие процессы, например, где диапазоны неопределенности всех измерительных приборов, которые используются для нового измерения или калибровки, автоматически извлекаются из облака для включения в новый сертификат.

Аналогичным образом, цифровой сертификат соответствия (DCoC) является запланированной спецификацией для цифрового представления CoC, опять же с цифровой подписью для проверки подлинности.

Доступ к облачному хранилищу под разными ролями, каждая из которых имеет определенные права на внесение изменений, имеют не только владельцы облака и сотрудники испытательной лаборатории, но и производитель умного средства измерения, органы сертификации, органы, осуществляющие надзор.

Возможность хранения подобной документации в облачном хранилище позволяет органу сертификации (или другим ответственным органам) получать быстрый доступ при прохождении лабораторией процедуры аккредитации, осуществлять надзор за работой испытательной лаборатории и оборудованием, дает возможность заинтересованным сторонам получать актуальную информацию об испытательном оборудовании.

Орган по надзору за рынками может провести удаленный контроль и удаленно обеспечить выдачу сертификата соответствия. Первичная, периодическая, повторная, выборочные поверки также могут выполняться удаленно, если электронный или цифровой знак хранится в цифровом представлении инструмента.

Облачные технологии уже активно начали применять в Германии. На весах, расположенных в магазинах, имеется табличка с кодом или ссылкой на документацию – сертификат соответствия, документы по поверке и другие данные. Это позволяет не только уполномоченным лицам быстро проверять соответствие измерительных приборов, но и покупателям получать информацию о корректности работы весов.

РТВ предлагает использовать облачное хранилище не только для локальных предприятий, но и организовать национальную среду, в которую были бы интегрированы все предприятия Германии и Евросоюза.

Отсюда возникает еще одна проблема законодательной метрологии. В одной только Германии применяется около 170 млн измерительных приборов. Предполагается, что о каждом средстве измерения будет храниться целый набор данных, начиная с технической документации на них, информации о процедурах поверки и калибровки и заканчивая протоколами испытаний. Анализ такого объема данных возможен только с помощью применения Big Data-решений. В настоящее время эти базы данных широко распределены, не связаны между собой и очень разнородны (результаты измерений, административные данные, сервисные данные). Внедрение цифровой инфраструктуры в виде метрологического облака может привести к успешному цифровому развитию законодательной метрологии: присоединение существующих инфраструктур данных; дифференцированный доступ всех партнеров к метрологическому облаку как к базе данных и надежному пункту доступа; новые концепции для координации, концентрации, упрощения, гармонизации и обеспечения качества метрологических услуг. Грамотная организация хранения данных и обращения к ним, обработка и анализ становятся новыми задачами современной законодательной метрологии.

Разработка Metrology Cloud (метрологического облака) направлена на внедрение пользующейся доверием базовой платформы для цифровой инфраструктуры качества путем присоединения существующих информационных инфраструктур и баз данных и дифференцированного доступа всех партнеров для цифрового укрепления законодательной метрологии.

Проблеме защиты информации с удаленным доступом следует уделить особое внимание, так как требуется обеспечение защиты данных и контроля за встроенными данными. Организацию такого рода базы данных сможет осуществлять исключительно государственный орган. В качестве модели базы данных стоит рассмотреть

набравшую популярность технологию блокчейн, которая представляет собой распределенную базу данных или систему распределенных реестров.

Данная технология отличается высокой надежностью и защищенностью информации. Именно эти преимущества являются ключевыми для любой государственной базы данных. Информация представляет собой блоки, которые хранятся на персональных компьютерах пользователей и взаимосвязаны. Взаимосвязь обеспечивается дублированием информации, содержащейся в предыдущих блоках при создании нового блока. Таким образом, чтобы вывести из строя данную сеть, потребуется вывести из строя все компьютеры данной сети. Учитывая, что пользователи находятся в разных частях Земного шара, вероятность разрушения такой системы крайне мала.

### **Цифровизация – ключевое направление метрологической службы России**

В Российской Федерации цифровая трансформация экономики является одной из приоритетных государственных задач, для реализации которой разработаны соответствующие национальные проекты. Их осуществление направлено на создание инфраструктуры, в успешной деятельности которой значительная роль принадлежит развитию цифровой метрологии.

Техническая составляющая такой инфраструктуры в России, как и в Европе, – цифровая платформа, которая объединяет информацию и оперирует данными об эталонах, средствах измерений, справочными материалами и другими объектами законодательной метрологии, предоставляя доступ к связанным сервисам и документам. Например, данные, доступные для измерительного прибора, должны быть автоматически связаны с данными всех инструментов, используемых для его калибровки, и для этого эти данные также должны быть размещены на цифровой платформе.

На первом этапе реализации цифровой платформы необходимо поставить и решить три задачи:

1) спроектировать архитектуру цифровой платформы, определить инфраструктуру (необходимо спроектировать архитектуру цифрового решения, реализовать структуру облачного хранилища);

2) разработать мотивационные мероприятия для участников или пользователей системы законодательной метрологии для ускорения внедрения цифровой платформы в максимально короткий период;

3) обеспечить юридическую значимость данных, хранящихся на цифровой платформе.

Следующим этапом является выбор задач законодательной метрологии для реализации работы в новой цифровой инфраструктуре. В России их определено 19, из которых основные – это:

– проверка законодательно регулируемых средств измерений (СИ);

– создание цепочки прослеживаемости от СИ (или других признанных стандартов, если они соответствуют) до конечного пользователя;

– определение процедур утверждения типа;

– аттестация стандартных образцов.

В Российской Федерации законодательная метрология большое внимание уделяет процедуре поверки средств измерений. Обычно результатом является не только заключение о пригодности или непригодности средства измерений, но также информация о характеристиках средства измерения, например, о погрешности измерения.

По разным оценкам, в Российской Федерации проводится порядка 50–60 млн проверок в год. Задача хранения и обработки такого большого количества данных очень сложная. Через информацию о поверке средств измерений Росстандарт получает данные обо всех средствах измерений, используемых в Российской Федерации. На этом этапе также очень важно оценить необходимую мощность создаваемой технической платформы. Платформа должна быть способна обрабатывать около 500 проверок от 2000 проверяющих органов в минуту. Это означает, что при максимальной производительности платформа должна быть способна обрабатывать несколько тысяч проверок в минуту. Еще одна важная техническая проблема заключается в том, что данные на платформе требуют цифровых подписей. Информация должна быть защищена от несанкционированных изменений, в том числе хакерских атак.

Разработка цифровой инфраструктуры состоит из двух параллельных потоков. Первый поток – это разработка законодательства, обеспечивающего признание цифровой платформы; второй поток – это развитие самой цифровой платформы.

Законодательство включает в себя, во-первых, национальный закон о метрологии, а во-вторых, ряд других законодательных и технических актов. Техническая платформа включает в себя программный продукт и серверные мощности. Координация этих двух потоков – очень сложная задача для руководителя проекта.

Для работы с цифровой платформой необходимо подготовить изменения в законодательстве, связанные с переходом на цифровую платформу.

Чтобы обеспечить более мягкий переход к цифровой инфраструктуре, на первом этапе проще разрешить работу как с использованием цифровой инфраструктуры, так и «по старинке», применяя бумажные варианты сертификатов и других документов. В этом случае через некоторое время необходимо будет повторно принять изменения в закон, обязывающие пользователей работать исключительно на цифровой платформе, сохраняя при этом данные с прежних бумажных носителей в цифровом формате.

В настоящий момент версия такой цифровой платформы частично реализована путем создания Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений – Федеральной государственной информационной системы (ФГИС) «АРШИН» [4].

Техническая платформа содержит как защищенные паролем платформы, так и открытые порталы. Открытый портал используется в свободном доступе для получения информации в области законодательной метрологии в России (включая все применимые международные документы, например, Рекомендации МОЗМ на русском и английском языках). Можно проверить информацию о прохождении процедуры поверки средств измерения по их серийному номеру и типу на ФГИС «АРШИН».

Всего техническая платформа насчитывает 19 модулей. Для крупных организаций, выполняющих множество метрологических задач, реализован механизм пакетной передачи данных. Этого можно добиться как с помощью файлов определенного формата, так и с помощью специального сервиса API технической платформы.

Как известно, в соответствии с Федеральным законом от 27 декабря 2019 г. № 496-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон „Об обеспечении единства измерений“», с 24 сентября 2020 г. при регистрации результатов поверки индивидуальных приборов учета и других средств измерений приоритет принадлежит электронной записи в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, а бумажная форма может быть выдана по желанию потребителя, но она носит только справочный характер.

Важным вопросом является наличие в системе информации о метрологических работах, выполненных до 24 сентября 2020 г. При подготовке законопроекта было решено не требовать от участников цифровой инфраструктуры размещать всю информацию о ранее выполненных услугах. Отчеты и документации по ним принимаются в «старом», бумажном, формате. Действительно, ввод всех этих данных в цифровую платформу стал бы бременем для предприятий и кажется не-

разумным. С другой стороны, Росстандарт потребовал от своих организаций вводить всю информацию, начиная с 2010 г. Это объясняет, почему в год проводится около 50 млн поверок, а в целом платформа уже содержит более 300 млн наборов поверочных данных.

Пользователями средств измерений являются не только компании и органы власти, но и частные лица. Это очень важный момент, потому что ключевой задачей внедрения информационных технологий в России является, в том числе, защита граждан. Теперь с помощью мобильного приложения любой желающий может проверить наличие поверочной документации весов в супермаркете, торгово-развлекательном комплексе, на автозаправочной станции или счетчика воды в своем доме или квартире. Таким образом, этот проект также стал социально-значимым.

Также эти данные очень важны для метрологического надзора. Измерительные приборы, период поверки которых истек и для которых не было зарегистрировано никаких новых поверок, можно легко получить с платформы. Целевые меры реагирования могут применяться к организациям, владеющим этими инструментами. Для аккредитационного надзора также важны данные об организациях, выполняющих большое количество метрологических задач. Они могут сосредоточиться на таких случаях и заниматься прослеживаемостью.

Для проверяющих органов появилась возможность работать с результатами в режиме реального времени. Соответственно, это позволяет им повысить ориентацию на клиента. Проблема поддельных документов в метрологии тоже существует. Многие органы регулярно обязаны доказывать свою невиновность в отношении фальсификации информации о поверке и калибровке, но благодаря данным на платформе эта проблема теперь устранена.

Еще одно важное преимущество заключается в том, что из-за ошибок, связанных с человеческим фактором, иногда приходится аннулировать результаты метрологических решений, что может привести к юридическим последствиям. Для властей это влечет за собой отзыв их сертификатов и дополнительные расходы на исправление ошибок. Теперь система либо не допускает таких ошибок, либо (в худшем случае) позволяет их обнаруживать раньше.

В этой связи чрезвычайно важным является вопрос совершенствования подготовки кадров для метрологической деятельности. Как уже было отмечено выше, это направление находится в центре внимания такого влиятельного общественного профессионального объединения, как

Метрологическая академия, в составе которой тесно взаимодействуют представители метрологической науки, высшей школы и реального сектора экономики, что позволяет в комплексе рассматривать все проблемы метрологического обеспечения единства и качества измерений в стране.

Академия и ее координационный научный совет по образованию в области метрологии активно выступают за сохранение и развитие сложившейся в прежние годы системы подготовки метрологических кадров. Благодаря занятой в 2020–2021 гг. президиумом Академии принципиальной позиции, удалось не допустить сокращения подготовки метрологов, перевода их из укрупненной группы специальностей «Инженерное дело, технологии и технические науки» в укрупненную группу специальностей «Науки об обществе и человеке». Такое решение создало бы серьезные риски снижения объемов изучения слушателями метрологических специальностей необходимых им технических дисциплин, что особенно важно в условиях развития цифровой метрологии.

Позиция президиума опиралась на обеспокоенность значительного числа членов Академии, прежде всего, работающих в реальном секторе экономики. Она нашла поддержку в Министерстве промышленности и торговли Российской Федерации. Затем, в результате совместного диалога с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, предложения Академии были учтены при формировании «Перечня специальностей и направлений подготовки высшего образования по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры и другим программам», начиная с 1 сентября 2024 г., утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 1 февраля 2022 г. В этом «Перечне» метрологические специальности сохранены в укрупненной группе «Инженерное дело, технологии и технические науки» и отнесены к группе «Управление в технических системах» по специальности «Управление качеством, стандартизация и метрология» [5].

На примере работы кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) можно убедиться, насколько принципиальным является такое решение. Углубленное изучение технических дисциплин будущими специалистами-метрологами позволяет им после окончания университета в полной мере ориентироваться в работе на сложнейших предприятиях аэрокосмического комплекса России, обеспечивать точность и качество

измерений при создании новой техники и оборудования.

В последнее время на кафедре особое внимание уделяется изучению вопросов цифровой метрологии, без которой невозможно представить развитие современной авиационной и космической техники. Для лучшего обеспечения учебного процесса специалистами кафедры и других подразделений ГУАП в 2021 г. было издано учебное пособие «Цифровая метрология» [6], а в 2022 г. подготовлен учебник «Основы цифровой метрологии», в котором обобщены и представлены последние данные о методах обработки и оценивания точности измерений, о влиянии цифровизации на метрологическую деятельность.

Важнейшим не только для перспектив развития цифровой метрологии, но и всей деятельности по обеспечению единства измерений в стране стало внесение по инициативе президиума Метрологической академии при голосовании в 2020 г. поправок в Конституцию Российской Федерации – предложения о государственном статусе метрологической службы как основного предмета ведения Российской Федерации. В ходе общенародного голосования это предложение было полностью поддержано. Такое уникальное закрепление особого положения метрологической службы в Основном законе России позволяет рассчитывать на приоритетное решение неотложных проблем метрологии, среди которых на первый план выходят задачи развития цифровизации экономики.

На состоявшейся 2 августа 2022 г. встрече премьер-министра России Михаила Мишустина и руководителя Росстандарта Антона Шалаева было отмечено, что цифровизация стала ключевым направлением работы в системе обеспечения единства измерений. Уже переведены в цифровой формат такие услуги, как утверждение типа средств измерений или типа стандартных образцов и свидетельства о соответствии средств измерений метрологическим характеристикам, согласование отзывных программ в области автомобильных колесных транспортных средств и др. Разрабатываются более 30 стандартов для реализации новых технологий, в том числе применения технологий искусственного интеллекта в клинической медицине, в транспортной области, робототехнике, биометрии и биомониторинге [7].

Настоятельная необходимость приоритетного развития цифровой метрологии была неоднократно отмечена в докладе и во многих выступлениях делегатов на съезде Метрологической академии, прошедшем в июне 2022 г. в Санкт-Петербурге [8].

Задача эффективной цифровой трансформации метрологической деятельности станет в ближайший период важнейшим направлением творческих поисков и предложений Метрологической

академии при разработке проекта новой «Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2035 г.».

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цифровая трансформация метрологии – пять задач Росстандарта. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/presscenter/news> (дата обращения: 05.08.2022).
2. Метрология в эпоху цифровизации: Приветственное обращение директора МБМВ Мартина Милтона и директора МБЗМ Энтони Доннеллана во Всемирный день метрологии 20 мая 2022 года // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 3.
3. Digital Transformation in Legal Metrology OECD. A measurement roadmap for the future, in Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future // OIML Bull. 2021. Vol. LXII, № 3. URL: [www.oecd.org/going-digital/measurement-roadmap.pdf](http://www.oecd.org/going-digital/measurement-roadmap.pdf) (дата обращения: 05.08.2022).
4. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений ФГИС «АРШИН». Официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (дата обращения: 06.08.2022).
5. *Окрепилов Владимир*. Метрологическая академия – 30 лет поисков и обретений // Метрологической академии – 30 лет: сб. материалов. СПб., 2022. С. 15.
6. Цифровая метрология: учеб. пособие / Ю. А. Антохина [и др.]; под ред. д-ра экон. наук, проф., акад. РАН В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2021. 181 с.
7. Встреча Михаила Мишустина с руководителем Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Антоном Шалаевым. 2 августа 2022 г. URL: <http://government.ru/news/46158/> (дата обращения: 03.08.2022).
8. Метрологической академии – 30 лет: сб. материалов. СПб., 2022. 128 с.

## REFERENCES

1. Digital transformation of metrology – five tasks of Rosstandart. Available from: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/presscenter/news> [Accessed 5 August 2022].
2. Metrology in the era of digitalization. Welcome address of the Director of MBMV Martin Milton and the director of MBZM Anthony Donnellan on the World Day of Metrology on May 20, 2022. Measuring equipment. 2022;(5):3. (In Russ.).
3. Digital Transformation in Legal Metrology OECD. A measurement roadmap for the future, in Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future. OIML Bull. 2021;LXII(3). Available from: [www.oecd.org/going-digital/measurement-roadmap.pdf](http://www.oecd.org/going-digital/measurement-roadmap.pdf) [Accessed 5 August 2022].
4. Federal Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements of FGIS «ARSHIN». Official website. Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> [Accessed 6 August 2022].
5. Okrepilov Vladimir. Metrological Academy – 30 years of searching and finding. Metrological Academy – 30 years: collection of materials. SPb., 2022, pp. 15. (In Russ.).
6. Antokhina Yu. A., Okrepilov V. V., Frolova E. A. et al. Digital metrology: studies manual; eds by Doctor of Economics, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences V. V. Okrepilov. SPb.: SUAI; 2021, 181 p. (In Russ.).
7. Meeting of Mikhail Mishustin with the head of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology Anton Shalaev. August 2, 2022. Available from: <http://government.ru/news/46158> [Accessed 3 August 2022].
8. Metrological Academy – 30 years: collection of materials. SPb., 2022, 128 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Окрепилов Владимир Валентинович**, доктор экономических наук, профессор, академик Российской академии наук, заведующий кафедрой метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского

**Okrepilov Vladimir V.**, D. Sc. in Economics, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Metrological Support and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, President of the Metrological



государственного университета аэрокосмического приборостроения, президент Метрологической академии, основатель научного направления «Экономика качества».

Область научных интересов – теория, методология и методы экономических и социальных проблем качества, организационно-экономические условия обеспечения качества и конкурентоспособности.

Поступила в редакцию 23.08.2022

Поступила после рецензирования 01.09.2022

Принята к публикации 15.09.2022

Academy, Founder of the scientific discipline «Economics of Quality».

Research interests – theory, methodology and methods of economic and social problems of quality, organizational and economic conditions for ensuring quality and competitiveness.

Received 23.08.2022

Revised 01.09.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья  
УДК 53.08+004.942

## Революция в метрологии как отражение цифровизации в приборостроении

**Антон Николаевич Пронин<sup>1</sup>**

✉ A.N.Pronin@vniim.ru, orcid.org/0000-0002-8856-8762

**Ксения Всеволодовна Сапожникова<sup>1</sup>**

k.v.s@vniim.ru, orcid.org/0000-0003-1845-8944

**Роальд Евгеньевич Тайманов<sup>1</sup>**

taymanov@vniim.ru, orcid.org/0000-0003-2901-2040

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены новые задачи в области приборостроения, связанные с экспоненциальным нарастанием количества датчиков в окружающей среде, насыщенной различными информационными и управляющими системами, а также с цифровизацией. Особое внимание уделено близкой перспективе широкого использования сильного искусственного интеллекта в технических комплексах разнообразного назначения. Показаны новые методы и средства, которые потребуются для метрологического обслуживания средств и систем измерений, в том числе использующих искусственный интеллект, в течение их срока службы. Отмечена необходимость качественного изменения требований к подготовке специалистов с высшим образованием, которым предстоит участвовать в разработке и метрологическом обеспечении перспективных средств и систем.

**Ключевые слова:** метрология, цифровизация, метрологический самоконтроль, цифровые двойники, виртуальные испытания, экспертные оценки, измерение многопараметрических величин

**Для цитирования:** Пронин А. Н., Сапожникова К. В., Тайманов Р. Е. Революция в метрологии как отражение цифровизации в приборостроении // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 17–26.

Original article

## The metrology revolution as a reflection of digitalisation in instrumentation

**Anton N. Pronin<sup>1</sup>**

✉ A.N.Pronin@vniim.ru, orcid.org/0000-0002-8856-8762

**Kseniia V. Sapozhnikova<sup>1</sup>**

k.v.s@vniim.ru, orcid.org/0000-0003-1845-8944

**Roald E. Taymanov<sup>1</sup>**

taymanov@vniim.ru, orcid.org/0000-0003-2901-2040

<sup>1</sup> D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** New challenges in the field of instrumentation related to the exponential growth of the sensor number in an environment saturated with various information and control systems, as well as to digitalisation, are considered. Particular attention is paid to the near-term prospect concerning the widespread application of strong artificial intelligence in various technical complexes. New methods and means required for metrological maintenance of measuring instruments and systems during their service life, including those using artificial intelligence, are shown. The necessity of qualitative changes in the requirements for training specialists with higher education, who will take part in the development and metrological assurance of prospective instruments and systems, has been noted.

**Keywords:** metrology, digitalisation, metrological self-check, digital twins, virtual tests, expert assessments, measurements of multidimensional quantities

**For citation:** Pronin A. N., Sapozhnikova K. V., Taymanov R. E. The metrology revolution as a reflection of digitalisation in instrumentation. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):17–26. (In Russ.).

### Введение

Рождение научного журнала в России, издаваемого университетом, отражает интерес к проб-

лемам развития общества, решать которые придется сегодняшним студентам. Футуролог Герд Леонгард, один из ста самых влиятельных людей в Европе по версии журнала «Wired», отметил,

что «следующие 10 лет принесут больше перемен, чем предыдущие 100» [1].

Развитие транспорта и Интернета в сочетании с относительной прозрачностью государственных границ приводит к экспоненциальному росту новых, большей частью цифровых, технологий и их распространению в мире.

Однако нарастает опасность: «Триллионы долларов тратятся на то, чтобы сделать мир технологически «умнее». Но в то время, как машины становятся умнее, мы можем стать глупее» [1]. Устранить эту опасность можно лишь постоянно совершенствуя образование и методы работы в профессии.

Естественно, что перемены нарастают и в метрологии.

Перспективы появления в ближайшем будущем качественно новых задач при обеспечении единства измерений заметны по трендам:

1) широкого распространения эталонов на основе квантовых эффектов в различных видах измерений;

2) резкого увеличения количества датчиков, в том числе в измерительных каналах, далеко разнесенных в пространстве;

3) расширения перечня измеряемых величин, в том числе за счет многопараметрических (многомерных);

4) ограничения ресурсов для выполнения метрологического обслуживания.

Особенно серьезные проблемы возникнут, когда станут актуальными задачи разработки и метрологического обеспечения измерительных систем на основе сильного искусственного интеллекта.

Такие системы через несколько лет все шире будут применяться:

– на транспорте, в том числе беспилотном, и в региональных комплексах управления его движением;

– в медицинской аппаратуре и в индивидуальных средствах контроля состояния здоровья, в том числе соединенных через облако с центрами сбора данных;

– в экспертных комплексах, предназначенных для оценки способности специалиста к определенной деятельности;

– в автоматическом производственно-технологическом оборудовании, в том числе территориально разнесенном на большие расстояния, например, в региональных системах водо- и газоснабжения, перекачки нефтепродуктов и т. д.;

– наконец, в различных роботах, отличающихся возможностью взаимодействия с людьми.

Такие роботы будут оснащены кодексами этики, а их метрологическое обеспечение будет требовать регулярного обучения и самообучения.

Особенность измерительных систем на основе сильного искусственного интеллекта – отсутствие объяснимости многих операций в процедурах, реализуемых комплексами, управляемыми таким интеллектом. Эта особенность и необходимость найти решения, способные исключить опасность получения от искусственного интеллекта информации, которая может привести к авариям и человеческим трагедиям, обсуждалась на междисциплинарной конференции Российской академии наук весной 2022 г.

Как было показано в [2], ситуация далеко не безнадежна. Многие решения могут быть найдены на основе анализа опыта метрологии в обеспечении достоверности результатов измерений и их прослеживаемости. Термин «достоверность» ГОСТ Р [3] трактует как «свойство измерительной информации быть правильно воспринятой и однозначно интерпретированной для принятия управляющих решений». Практически это означает, что погрешность/неопределенность результата измерения находится в пределах, установленных в документации на методику выполнения измерений и (или) на соответствующее средство измерений (СИ)/измерительную систему (ИС) [4].

Полезную информацию, которая помогает в поиске требуемых решений, дает и анализ эволюции живых организмов [5].

## **Перспективы развития метрологии в ближайшие десятилетия**

### **Основные направления цифровизации в метрологии**

Согласно отчету РТВ [6], в 2017 г. были выделены четыре основные метрологические задачи, характерные для цифровизации:

А) цифровая трансформация метрологических услуг;

В) метрология в анализе больших данных;

С) метрология коммуникационных систем для цифровизации;

Д) метрология для моделирования и виртуальных измерительных приборов.

На наш взгляд, сегодня, с учетом новых приоритетов общества, этот перечень должен быть трансформирован следующим образом:

А) цифровая трансформация метрологических услуг;

В) метрология в анализе больших данных, в том числе включающих в себя экспертные оценки;

С) метрология коммуникационных систем для цифровизации;

Д) метрология для моделирования разрабатываемых СИ и измерительных систем ИС, в том числе виртуальных, на основе данных и знаний;

Е) метрология многопараметрических (многомерных) величин, в том числе свойств человека и общества;

Ф) метрология для моделирования динамики и виртуальных испытаний СИ и ИС;

Г) цифровые методы метрологического обеспечения СИ и ИС без их демонтажа.

Поиск методов решения всех этих задач идет быстрыми темпами во всем мире, что отражено во множестве публикаций. В Международной конфедерации по метрологии ИМЕКО создан новый технический комитет ТК 6 «Цифровизация». Целями ТК 6 являются разработка, организация и распространение фундаментальных концепций измерительной науки, связанных с цифровизацией и цифровыми преобразованиями в науке, промышленности и обществе [7].

В рамках этой статьи, учитывая опыт Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), рассмотрены важнейшие особенности решения задач, относящихся к группам В, D, E, F, G.

### **Широкое внедрение методов метрологического самоконтроля**

В части цифровых методов метрологического обеспечения СИ и ИС без их демонтажа наиболее актуальна проблема обеспечения достоверности измерений при увеличении длительности межповерочного/межкалибровочного интервала (МПИ).

В XX в. для обеспечения достоверных результатов измерений было принято каждому СИ назначать постоянный МПИ длительностью один-два года. К началу XXI в. это оказалось проблематичным. Для многих применений экономически неприемлемой стала длительность этого интервала, ее требовалось увеличить, но тогда последствия возникновения метрологической неисправности в СИ в течение МПИ могут существенно возрасти.

К числу важнейших решений, найденных в процессе эволюции, обеспечивающих выживание и увеличение популяции животных с начальной централизацией нервной системы, следует отнести чувство боли и связанную с ним примитивную эмоцию (протоэмоцию). Боль заставляет животное уменьшить физическую нагрузку, что способствует его выздоровлению.

Аналог чувства боли – простейший вариант функции метрологического самоконтроля, предложенный во ВНИИМ в 1980-е гг. [8, 9]. В слу-

чае возникновения в СИ, например, в датчике с функцией самоконтроля, неисправности, было предложено формировать сигнал оператору о необходимости принять меры.

Появление сообществ животных с более развитой нервной системой привело к рождению новой функции – формированию сигнала, который должен быть принят другим живым существом, возможно, находящимся на заметном расстоянии. По существу, ее рождение можно рассматривать как рождение эмоций [10].

Восприятие опасности, сопровождаемое формированием сигнала о ней, – это «страх», наиболее древняя (базовая) эмоция, появившаяся у живых существ, которые «осознали» свою причастность к популяции. С дальнейшим усложнением структуры живых существ, а также по мере усложнения связей между членами популяции количество базовых эмоций возросло.

В частности, второй базовой эмоцией можно считать «интерес», сигнал о котором требует приоритетного внимания других членов популяции к объекту или явлению, которые могут оказаться важными для жизни популяции в части улучшения условий или, возможно, в части ее сохранения.

В ИС со многими компонентами, часть из которых избыточна, введение метрологического самоконтроля позволяет формировать несколько различных сигналов. Например, если ИС прекратила работу, к оператору приходит сигнал тревоги (аналог боли). Но в случае возникновения неисправности в компоненте, у которого есть дублирующий компонент, «боль» возникает кратковременно. По этому сигналу неисправный компонент отключается, а информация передается от дублирующего.

Тем самым оказывается возможным продолжить работу ИС и даже продлить ранее запланированный МПИ. Подобные решения, реализованные на Калининской атомной электростанции, позволили существенно увеличить интервалы между остановками реактора на профилактику, т. е. повысили его экономическую эффективность [11, 12].

В системе снабжения города питьевой водой метрологический самоконтроль позволяет автоматически локализовать места утечки воды и сигнализировать ремонтной бригаде о необходимости ремонта [13].

На десяти гидроагрегатах Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (ГЭС) установлены ИС, предназначенные для автоматического контроля линейных деформаций шпилек крепления крышки гидротурбины путем измерения их линейных перемещений относительно калибровочных стержней, установленных внутри шпилек.

Метрологический самоконтроль датчиков деформации, разработанный во ВНИИМ с участием специалиста ГУАП, исключает появление имевших место ранее ситуаций, когда один или несколько датчиков пережимались крышкой вследствие ее смещения параллельно плоскости или под небольшим углом, что фактически приводило к потере работоспособности ИС, но информация об этом не поступала в систему управления гидроагрегатом [14, 15].

Тем самым метрологический самоконтроль позволяет предотвратить возможность аварий, подобных произошедшей в 2009 г.

Наконец, в ИС с живыми раками в качестве биодатчиков чистоты питьевой воды применение метрологического самоконтроля практически исключает опасность поступления загрязненной воды потребителю в интервалах между проверками исправности системы, поскольку сигнал о загрязнении подается оператору сразу же после его обнаружения раками [16, 17].

Таким образом, метрологический самоконтроль реализуем на основе избыточной информации, вводимой искусственно или выявляемой в контролируемых СИ или ИС. Такой самоконтроль позволяет не только диагностировать возросшую погрешность, но и корректировать ее, а также прогнозировать ее изменение для определения допустимого интервала времени эксплуатации без метрологического обслуживания.

Концепция «метрологического самоконтроля» и примеры ее реализации в промышленности были обсуждены на многих международных конференциях, отражены в опубликованных статьях, книгах, патентах и нормативных документах, в том числе в трех национальных стандартах Российской Федерации [18–20]. В России разработки СИ и ИС с метрологическим самоконтролем выполняются в ряде организаций Санкт-Петербурга, Москвы, Пензы, Омска, Челябинска.

В Великобритании, Германии, Китае, США и некоторых других странах также ведутся работы по метрологическому самоконтролю, называемому часто самовалидацией, но применительно к существенно меньшему числу измеряемых величин.

В ряде случаев такие исследования выполняются применительно к датчикам и ИС, использующим искусственный интеллект [21–25].

#### **Использование виртуальных испытаний и методов обеспечения своевременности передачи информации в ИС**

Как было сказано выше, одной из актуальных метрологических задач в наступающее время является методология виртуальных испытаний СИ и ИС.

Во ВНИИМ ведутся работы в этой области применительно к агрегатам энергетических станций с отработкой решений на опыте эксплуатации ИС, установленных на турбоагрегатах Саяно-Шушенской ГЭС.

В течение первого года эксплуатации ИС контроля деформации шпилек, крепящих крышки турбоагрегатов, во ВНИИМ с ГЭС направлялась полученная измерительная информация. Далее она обрабатывалась с целью выявления значимости факторов, влияющих на ИС, таких как смещение крышки параллельно ее плоскости или односторонний наклон, и разрабатывалась модель процесса эксплуатации ИС с цифровым двойником, учитывающим динамику выделенных факторов [14, 15].

Под цифровым двойником понимается система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних связей с изделием (при его наличии) и (или) с его составными частями [26–29].

Применительно к виртуальным испытаниям СИ и ИС его можно определить как инструмент моделирования влияния среды и материальной системы, взаимодействующей с испытываемым объектом.

Виртуальные испытания с цифровым двойником дают возможность:

- оптимизировать тестовые воздействия, имитирующие факторы, влияющие на датчики ИС, установленные на турбоагрегатах;
- учесть особенности реакции датчиков на эти факторы и выработать необходимые управленческие решения;
- отладить программное обеспечение.

Однако, как было пояснено выше, для проведения виртуальных испытаний и создания цифрового двойника необходимы экспериментальные данные с объекта, на котором разрабатываемая СИ/ИС будет работать. В некоторых случаях, например, связанных с атомной энергетикой, получение этих данных сложно или экономически неприемлемо.

Для устранения названных проблем во ВНИИМ создан Центр метрологической надежности. Основными областями его деятельности являются следующие:

- 1) разработка научно-методических основ оценки метрологической надежности СИ, межповерочных и межкалибровочных интервалов;
- 2) разработка программ и методик испытаний СИ на метрологическую надежность;
- 3) разработка алгоритмов обработки экспериментальных данных и критериев принятия решений об установлении или изменении МПИ.

Другим важным направлением оказалась разработка методов обеспечения своевремен-

ности и достоверности передачи измерительной информации в ИС с функцией метрологического самоконтроля, каналы которой разнесены на большие расстояния друг от друга. В случае задержки информации о резком изменении значения измеряемой величины или о возникшей метрологической неисправности СИ, передаваемой одним из каналов, блоком управления может быть принято решение, опирающееся на недостоверную – на момент его принятия – информацию. Такая ситуация может возникнуть при циклическом опросе каналов, если их число велико, а также при длительном формировании измеренного значения, по крайней мере, в одном или в нескольких каналах. Повышение достоверности здесь может быть обеспечено путем формирования шкалы приоритетов при передаче информации различного типа.

### **Особенности измерения многопараметрических величин**

Принципиально новым направлением метрологии, востребованным цифровой экономикой, являются разработки в гуманитарной области, необходимые для подготовки специалистов, отличающихся более высоким уровнем образного и ассоциативного мышления, способных выдерживать конкуренцию с роботами, снабженными искусственным интеллектом.

Исследования в этой сфере отчасти перекликаются с проводимой по инициативе ВНИИМ работой в школах и вузах, которая привела к появлению нового понятия – «образовательный метрологический кластер», который ориентирован на подготовку метрологов нового поколения. В Санкт-Петербурге кластер включает в себя 13 школ и других образовательных учреждений, шесть вузов, шесть предприятий и организаций. Опыт ВНИИМ Росстандартом распространяется на всю Россию [30].

Потребность в повышении уровня подготовки разработчиков новой техники ощущается не только метрологами. В ноябре 2021 г. Председатель Правительства Российской Федерации М. В. Мишустин подписал постановление об организации на конкурсной основе в магистратурах университетов передовых инженерных школ (ПИШ). Из 91 вуза, принявшего участие в конкурсе, 30, в том числе три из Санкт-Петербурга, получили гранты до 1 млрд рублей на 2022–2024 гг.

В ПИШ должны готовить элитарных разработчиков, способных сформировать в своем воображении образ создаваемого изделия, а, подготавливая компьютерную программу, компетентно представлять ее приложения, например, в биологии, химии и т. д. Реализация такой школы инди-

видуальна. В частности, в Санкт-Петербургском Политехническом университете для каждого из 12 магистрантов в группе запланировано по два наставника из числа ведущих специалистов вуза и заинтересованного предприятия. Естественно, что отбор студентов в ПИШ будет сложным. Не исключены коррупция и заведомо субъективные оценки, что, в конечном итоге, может опорочить представление о полезности элитных инженерных школ.

На наш взгляд, наиболее эффективно осуществлять этот отбор так же, как намечено отбирать метрологов из школ и вузов метрологического кластера, т. е. по заведомо объективным критериям.

Определение таких критериев требует разработки неинвазивных методов и средств измерений величин, как правило, многопараметрических, характеризующих интеллект, способности и эмоциональную сферу человека, а также методы воздействия на них для повышения эффективности воспитания и образования.

Предполагаемая оценка неопределенности результата должна учитывать неопределенность оценки связей между параметрами, формирующими значение оцениваемой величины и их зависимость от времени. Дефинициальная неопределенность модели измерений во многих случаях является ее доминирующей частью.

В проводимых исследованиях нередко большую роль играют экспертные оценки.

Профессионализм экспертов может быть оценен с помощью простых тестов. Оценка объективности намного сложнее. Усреднение полученных оценок или использование их медианы неэффективно, так как в ряде случаев компетентные и непредвзятые оценки может дать меньшая часть экспертов. Проведение повторных испытаний другой группой экспертов может привести к положительному эффекту, но отсутствие связи между экспертами разных групп не всегда доказуемо.

Если для оценки значения многомерной величины используется ИС на основе искусственного интеллекта, то предвзятость экспертов может быть обусловлена их субъективностью и заложена в оценки, в ряде ситуаций подаваемые на входы системы, а также в подбор экспертами величин или знаний, подаваемых на другие ее входы. Однако методы выявления предвзятости при оценке качества продукции и услуг известны и продолжают развиваться [31–36].

Если необходима единовременная оценка, возможно использование инструментального тестирования личностных характеристик экспертов [31, 33, 35], включая тестирование на детекторе лжи (полиграфе) [34].

Особенности метрологических исследований при разработке моделей многомерных величин, как свидетельствует опыт сотрудников ВНИИМ, – необходимость формирования творческих коллективов с участием специалистов из других областей науки и создание атмосферы заинтересованности в результате совместной работы.

ВНИИМ в течение ряда лет сотрудничает с известными психологами, филологами, нейрофизиологами, композиторами, математиками и программистами.

В последние годы повышенный интерес вызывает и возможность расшифровки «языка» общения животных.

Важным результатом исследований здесь стала теоретически и экспериментально обоснованная модель измерения ожидаемых эмоций, возникающих при воздействии биоакустических сигналов животных и фрагментов музыки [37–39]. В модели эмоция определена как обусловленная воздействием нейрофизиологическая реакция, вызывающая переход к состоянию, которое позволяет идентифицировать характер эмоции по ощущению или поведению субъекта.

Разработанную трехступенчатую модель измерений можно рассматривать как модель нейрофизиологического процесса формирования эмоций. Именно поэтому она позволяет объяснить некоторые нетривиальные явления в области нейрофизиологии, филологии, психологии и музыковедения.

В частности, предложенная модель открывает возможность:

– расшифровки эмоциональной окраски звучания речи, что позволяет при ее автоматическом переводе учесть иронию и сарказм;

– объяснения причин уменьшения с возрастом разнообразия оттенков эмоций в акустических воздействиях, падения чувствительности к звучаниям, окрашенным страхом, и даже восприятия их несколько более позитивно;

– раскрытия причин отклонений от этой зависимости, наблюдаемых у отдельных лиц;

– оптимизации построения звукоряда для усиления эмоционального воздействия музыкальных произведений;

– проектирования музыкальных инструментов, отличающихся большей выразительностью;

– расшифровки «языка» животных и т. д.

## Заключение

Вызванные цифровизацией революционные изменения в представлении об измеряемых величинах, а также о методах и средствах обеспечения достоверности и единства измерений требуют качественных изменений в профессиональной подготовке приборостроителей и метрологов.

Развитое ассоциативное мышление, широкая эрудиция, способность и склонность к творческому сотрудничеству со специалистами в других областях науки становятся необходимыми для достижения успеха.

Но это одновременно и фундамент для увлеченности работой и востребованности специалиста в наступающий непростой этап развития цивилизации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонгард Г. Следующие 10 лет принесут больше перемен, чем предыдущие 100 // Business Excellence. 2022. № 1. С. 94–99.
2. Тайманов Р. Е., Сапожникова К. В. Достоверность измерений в свете дискуссии об искусственном интеллекте // Мягкие измерения и вычисления. 2022. № 5. С. 5–15.
3. ГОСТ Р 8. 820-2013. ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.
4. Reliability of measurement information in the «Industry 4.0» era / K. Sapozhnikova, A. Pronin, R. Taymanov, A. Ionov // Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Symposium «Metrology and metrology assurance – 2017». September 8–12, 2017. Sozopol, Bulgaria. 2017. P. 20–25.
5. Taymanov R., Sapozhnikova K. What makes sensor devices and microsystems «intelligent» or «smart»? // Smart sensors and MEMS for industrial applications. 2<sup>nd</sup> ed / eds by S. Nihitjanov, A. L. Estepa. Woodhead Publishing, Elsevier Limited, 2018. P. 1–22.
6. Метрология для дигитализации экономики и общества. URL: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung\\_entwicklung/digitalisierung/Digitalisierung\\_RU\\_METROLOGIJA\\_DLJA\\_DIGITALIZACII\\_ENKONOMIKI\\_I\\_OBSHCHESTVA.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/digitalisierung/Digitalisierung_RU_METROLOGIJA_DLJA_DIGITALIZACII_ENKONOMIKI_I_OBSHCHESTVA.pdf) (дата обращения: 08.09.2022).
7. TC 6 – Digitalization. URL: <https://www.imeko.org/index.php/tc6-homepage> (дата обращения: 08.09.2022).
8. Сапожникова К. В., Тайманов Р. Е., Кочугуров В. В. Метрологический контроль как компонент диагностики гибких производственных систем и робототехнических комплексов // Испытания, контроль и диагностиро-

- вание гибких производственных систем (по материалам семинара 1985 г. в ИМАШ АН им. А. А. Благонравова). М.: Наука, 1988. С. 269–273.
9. Рекомендация МИ 2021-89. ГСИ. Метрологическое обеспечение гибких производственных систем. Основные положения. М.: Комитет по стандартизации и метрологии, 1991.
  10. *Taymanov R., Sapozhnikova K.* Trend in efficient development of measuring instruments and systems // XXIX International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance» (ММА). 2019. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8935960> (дата обращения: 08.09.2022).
  11. *Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I.* Measuring control rod position // Nuclear Plant Journal. 2007. Vol. 25, № 2. P. 45–47.
  12. *Sapozhnikova K., Taymanov R.* Sensor Devices with High Metrological Reliability // Nuclear Power – Control, Reliability and Human Factors / eds by P. Tsvetkov. InTech, 2011. P. 3–26. URL: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/sensor-devices-with-high-metrological-reliability> (дата обращения: 08.09.2022).
  13. *Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R.* Increasing Measurement Trustworthiness as a Necessary Part of Technology Development // Sensors & Transducers. 2021. Vol. 251, № 4. P. 61–69.
  14. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience / R. Taymanov [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. P. 1–7. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1379/1/012049/pdf> (дата обращения: 08.09.2022).
  15. *Sapozhnikova K., Baksheeva Iu., Taymanov R.* Features and experience of metrological self-check organisation in multichannel measuring system // XXX International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance» (ММА). Sozopol, Bulgaria, 2020. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9254242> (дата обращения: 08.09.2022).
  16. Биоэлектронная система с метрологическим самоконтролем для диагностики острой токсичности воды / В. А. Любимцев, С. В. Холодкевич, И. И. Дружинин, А. С. Куракин // Приборы. 2017. Т. 10, № 208. С. 34–39.
  17. *Lyubimtsev V. A., Kholodkevich S. V., Druzhinin I. I.* Measuring systems designed for working with living organisms as biosensors. Features of their metrological maintenance // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. P. 1–6. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1379/1/012077/pdf> (дата обращения: 08.09.2022).
  18. ГОСТ Р 8.673-2009. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010.
  19. ГОСТ Р 8.734-2011. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. М.: Стандартинформ, 2012.
  20. ГОСТ Р 8.825-2013. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний. М.: Стандартинформ, 2019.
  21. *Schleyer G., Russell A.* Classification of exogenous anomalies and self-diagnosis in autonomous robots // Conf. on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies [CHILECON]. 2019. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8987980> (дата обращения: 08.09.2022).
  22. Automatic wheels and camera calibration for monocular and differential mobile robots / K. Chaika, An. Filatov, Ar. Filatov, K. Krinkin // Sciences. 2021. Vol. 11, № 5806. P. 1–16.
  23. A spatial self-calibration algorithm for robot vision / H. Yu [et al.] // Proc. of Int. Conf. on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR – 2018). Springer Nature Switzerland AG, AISC, 2019. Vol. 856. P. 595–602.
  24. *Park K. J., Chung W.* Self-diagnosis of localization status for autonomous mobile robots // Sensors. 2018. P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.3390/s18093168> <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/3168/htm> (дата обращения: 08.09.2022).
  25. *Inzartsev A., Pavin A., Kleshchev A. S.* Application of artificial intelligence techniques for fault diagnostics of autonomous underwater vehicles // Conference: OCEANS – 2016. MTS/IEEE Monterey. 2016. P. 1–6.
  26. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021.
  27. Принципы построения цифровых двойников / В. В. Алексеев, П. Г. Журбило, П. Г. Королев, А. И. Акользи // Приборы. 2022. Т. 259, № 1. С. 38–45.
  28. Нормативное обеспечение цифровых испытаний при создании высокотехнологичных изделий промышленности. Ч. 1 / А. Чернов, А. Козелков, М. Симунина, А. Уськова // Стандарты и качество. 2022. № 1 (1015). С. 26–31.
  29. Нормативное обеспечение цифровых испытаний при создании высокотехнологичных изделий промышленности. Ч. 2 / А. Чернов, А. Козелков, М. Симунина, А. Уськова // Стандарты и качество. 2022. № 3 (1017). С. 34–39.
  30. *Игнаткович А. С.* Задача амбициозная. Но достижимая... О метрологическом образовательном кластере Росстандарта // Мир измерений. 2022. № 2. С. 16–20.
  31. *Прокопчина С. В.* Мягкие измерения: Методология и применение в научных, технических и социально-экономических задачах цифровой экономики // Мягкие измерения и вычисления. 2018. № 9. С. 3–33.
  32. *Shishkin I. F.* Measurements of non-physical quantities. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012029> (дата обращения: 08.09.2022).



33. ГОСТ Р 56041– 2014. Оценка соответствия. Требования к экспертам по сертификации продукции, услуг и процессов. М.: Стандартиформ, 2015.
34. СТО РАЭБУР 51-02-99. Порядок опросов с применением полиграфа. URL: [https://www.polyconius.ru/company/library/act\\_2.php](https://www.polyconius.ru/company/library/act_2.php) (дата обращения: 08.09.2022).
35. Николаева И. А. Измерение интенсивности ценностных переживаний в метрологии // Мир измерений. 2013. № 11. С. 40–45.
36. Prokopchina S. V. The Integration of artificial intelligence and measurement science methods by the regularizing Bayesian approach // Sensors & Transducers. 2021. № 4. P. 71–81.
37. Recognition of expected listeners' emotions based on the artificial intelligence methods / K. Sapozhnikova, S. Hussein, R. Taymanov, Iu. Baksheeva // 28<sup>th</sup> International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance – 2018», 10–14 September 2018. Sozopol, Bulgaria, 2018. P. 297–302.
38. Metrological Approach to Measurements of Emotions Being Expected in Response to Acoustic Impacts / K. Sapozhnikova [et al.] // 18<sup>th</sup> International Congress of Metrology: EDP sciences, Web of Conferences. Paris, France, 19–21 September 2017 / eds by C. Corleto. 2017. P. 1–7. Doi: 10.1051/metrology/20171 0006.
39. Application of neural networks in the instrument for measuring expected listener's emotions / K. Sapozhnikova, S. Hussein, Iu. Baksheeva, R. Taymanov // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2018. P. 1–4. Doi: 10.1088/1742-6596/1065/7/072041.

## REFERENCES

1. Leongard G. The following 10 years will bring more changes than the previous 100 ones. Business Excellence. 2022;(1):94–99. (In Russ.).
2. Taymanov R., Sapozhnikova K. Measurement trustworthiness in light of the debate on artificial intelligence. Soft Measurements and Computing. 2022;(5):5–15. (In Russ.).
3. GOST R 8. 820-2013. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Metrological Assurance. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).
4. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R., Ionov A. Reliability of measurement information in the «Industry 4.0». Proceedings 27<sup>th</sup> International Symposium «Metrology and metrology assurance 2017», September 8–12, 2017. Sozopol, Bulgaria; 2017, pp. 20–25.
5. Taymanov R., Sapozhnikova K. What makes sensor devices and microsystems «intelligent» or «smart»? Smart sensors and MEMS for industrial applications. 2<sup>nd</sup> ed.; eds by S. Nihtianov, A. L. Estepa. Woodhead Publishing, Elsevier Limited; 2018, pp. 1–22.
6. Metrology for digitalization of economy and society. Available from: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung\\_entwicklung/digitalisierung/Digitalisierung\\_RU\\_METROLOGIJA\\_DLJA\\_DIGITALIZACII\\_EHKONOMIKI\\_I\\_OBSHCHESTVA.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/digitalisierung/Digitalisierung_RU_METROLOGIJA_DLJA_DIGITALIZACII_EHKONOMIKI_I_OBSHCHESTVA.pdf) [Accessed 8 September 2022].
7. TC 6 – Digitalization. Available from: <https://www.imeko.org/index.php/tc6-homepage> [Accessed 8 September 2022].
8. Sapozhnikova K. V., Taimanov R. Ye., Kochugurov V. V. Metrological checking as a component of diagnostics of flexible production systems and robotics complexes. Testing, checking and diagnostics of flexible production systems (from the materials of the seminar hold at the A. A. Blagonravov IMASH of the Russian Academy of Sciences in 1985). Moscow: Nauka; 1988, pp. 269–273. (In Russ.).
9. MI Recommendation 2021-89. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Metrological Assurance of Flexible Manufacturing Systems. Fundamentals. Moscow, Committee on Standardization and Metrology; 1991. (In Russ.).
10. Taymanov R., Sapozhnikova K. Trend in efficient development of measuring instruments and systems. XXIX International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance» (MMA). 2019, pp. 1–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8935960> [Accessed 8 September 2022].
11. Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I. Measuring control rod position. Nuclear Plant Journal. 2007;25(2):45–47.
12. Sapozhnikova K., Taymanov R. Sensor devices with high metrological reliability. Nuclear Power – Control, Reliability and Human Factors. InTech; eds by P. Tsvetkov. 2011, pp. 3–26. Available from: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/sensor-devices-with-high-metrological-reliability> [Accessed 8 September 2022].
13. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R. Increasing measurement trustworthiness as a necessary part of technology development. Sensors & Transducers. 2021;251(4):61–69.
14. Taymanov R., Pronin A., Sapozhnikova K. et al. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience. J. Phys.: Conf. Ser. 2019, pp. 1–7. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1379/1/012049/pdf> [Accessed 8 September 2022].

15. Sapozhnikova K., Baksheeva Iu., Taymanov R. Features and experience of metrological self-check organisation in multichannel measuring system. XXX International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance» (MMA). Sozopol, Bulgaria; 2020, pp. 1–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9254242> [Accessed 8 September 2022].
16. Lyubimtsev V. A., Kholodkevich S. V., Druzhinin I. I., Kurakin A. S. Bioelectronic system with metrological self-check intended for diagnosing toxicity of water. *Devices*. 2017;10(208):34–39. (In Russ.).
17. Lyubimtsev V. A., Kholodkevich S. V., Druzhinin I. I. Measuring systems designed for working with living organisms as biosensors. Features of their metrological maintenance. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019, pp. 1–6. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1379/1/012077/pdf> [Accessed 8 September 2022].
18. GOST R 8.673-2009. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Basic Terms and Definitions. Moscow: Standartinform; 2010. (In Russ.).
19. GOST R 8.734-2011. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Methods of Metrological Self-checking. Moscow: Standartinform; 2012. (In Russ.).
20. GOST R 8.825-2013. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Intelligent Sensors and Intelligent Measuring Systems. Methods of Accelerated Tests. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).
21. Schleyer G., Russell A. Classification of exogenous anomalies and self-diagnosis in autonomous robots. Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies [CHILECON]. 2019, pp. 1–6. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8987980> [Accessed 8 September 2022].
22. Chaika L., Filatov An., Filatov Ar., Krinkin K. Automatic wheels and camera calibration for monocular and differential mobile robots. *Sciences*. 2021;11(5806):1–16.
23. Yu H., Wang G., Liu B. et al. A spatial self-calibration algorithm for robot vision. Proceedings of International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR – 2018). Springer Nature Switzerland AG, AISC, 2019, vol. 856, pp. 595–602.
24. Park K. J., Chung W. Self-diagnosis of localization status for autonomous mobile robots. *Sensors*. 2018:1–16. Available from: <https://doi.org/10.3390/s18093168> <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/3168/htm> [Accessed 8 September 2022].
25. Inzartsev A., Pavin A., Kleshchev A. S. Application of artificial intelligence techniques for fault diagnostics of autonomous underwater vehicles. Conference: OCEANS – 2016. MTS/IEEE Monterey. 2016, pp. 1–6.
26. GOST R 57700.37-2021. Computer Models and Simulation. Digital Twins of Products. General Provisions. Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russ.).
27. Principles of digital twin development / V. V. Alekseyev, P. G. Zhurbilo, P. G. Korolev, A. I. Akolzin. *Devices*. 2022;259(1):38–45. (In Russ.).
28. Chernov A., Kozelkov A., Simunina M., Uskova A. Regulatory support for digital testing in the creation of high-tech industrial products. Part 1. Standards and Quality. 2022;(1):26–31. (In Russ.).
29. Chernov A., Kozelkov A., Simunina M., Uskova A. Regulatory support for digital testing in the creation of high-tech industrial products. Part 2. Standards and Quality. 2022;(3):34–39. (In Russ.).
30. Ignatkovuch A. S. The task is ambitious but achievable... About the Rosstandart's metrological educational cluster. *World of Measurements*. 2022;(2):16–20. (In Russ.).
31. Prokopchina S. V. Soft measurements: methodology and application in scientific technical and socio-economic tasks of digital economy. *Soft Measurements and Computing*. 2018;(9):3–33. (In Russ.).
32. Shishkin I. F. Measurements of non-physical quantities. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012029> [Accessed 8 September 2022].
33. GOST R 56041-2014. Conformity Assessment. Requirements for Certification Experts of Products, Services, Processes. Moscow: Standartinform; 2015. (In Russ.).
34. STO Razbur Standard of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation 51-02-99. Interview Procedure Using a Polygraph. Available from: [https://www.polyconius.ru/company/library/act\\_2.php](https://www.polyconius.ru/company/library/act_2.php) [Accessed 8 September 2022].
35. Nickolaeva I. A. Measurement of the intensity of value experiences in metrology. *World of Measurements*. 2013;(11):40–45. (In Russ.).
36. Prokopchina S. V. The Integration of artificial intelligence and measurement science methods by the regularizing Bayesian approach. *Sensors & Transducers*. 2021;(4):71–81. (In Russ.).
37. Sapozhnikova K., Hussein S., Taymanov R., Baksheeva Iu. Recognition of expected listeners' emotions based on the artificial intelligence methods. 28<sup>th</sup> International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance 2018», 10–14 September 2018, Sozopol, Bulgaria. 2018, pp. 297–302.
38. Sapozhnikova K., Taymanov R., Baksheeva Iu. et al. Metrological approach to measurements of emotions being expected in response to acoustic impacts. 18<sup>th</sup> International Congress of Metrology, Paris: EDP sciences, Web of Conferences, September 19–21, 2017; eds by C. Corleto. 2017, pp. 1–7. Doi: 10.1051/metrology/20171 0006.

39. Sapozhnikova K., Hussein S., Baksheeva Iu., Taymanov R. Application of neural networks in the instrument for measuring expected listener's emotions / Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2018, pp. 1–4. Doi: 10.1088/1742-6596/1065/7/072041.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Пронин Антон Николаевич**, вице-президент Метрологической академии, генеральный директор Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева.

Область научных интересов – метрологическое обеспечение средств измерений и измерительных систем.

**Сапожникова Ксения Всеволодовна**, член-корреспондент Метрологической академии, член ТК 7 ИМЕКО, заместитель руководителя лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева.

Область научных интересов – метрологический самоконтроль, измерения в гуманитарной области, искусственный интеллект в измерительных системах.

**Тайманов Роальд Евгеньевич**, действительный член Метрологической академии, член ТК 7 ИМЕКО, руководитель лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева.

Область научных интересов – метрологический самоконтроль, измерения в гуманитарной области, искусственный интеллект в измерительных системах.

**Pronin Anton N.**, Vice-president of Metrological Academy, Director General, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

Research interests – Metrological maintenance of measuring instruments and systems.

**Sapozhnikova Kseniia V.**, Corresponding Member of Metrological Academy, IMEKO TC 7 member, Deputy head of laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

Research interests – metrological self-check, measurements in humanities, artificial intelligence in measuring systems.

**Taymanov Roald E.**, Full Member of Metrological Academy, IMEKO TC 7 member, Head of laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

Research interests – metrological self-check, measurements in humanities, artificial intelligence in measuring systems.

Поступила в редакцию 16.08.2022

Поступила после рецензирования 30.08.2022

Принята к публикации 15.09.2022

Received 16.08.2022

Revised 30.08.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья  
УДК 621.317.08

## Искусственный интеллект как один из элементов цифровой трансформации в метрологии

**Александр Юрьевич Кузин<sup>1</sup>**

kuzin@vniims.ru

**Алексей Николаевич Крошкин<sup>1</sup>**

✉ a.kroshkin@vniims.ru

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы цифровизации в метрологии, а также применения технологий искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей, для восстановления функции измерения при решении метрологических задач. Приведен пример решения практической задачи измерения дебита нефтяных скважин с помощью средства измерений с элементами искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** цифровизация, искусственный интеллект, искусственная нейронная сеть, функция измерений, многофазный расходомер

**Для цитирования:** Кузин А. Ю., Крошкин А. Н. Искусственный интеллект как один из элементов цифровой трансформации в метрологии // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 27–35.

Original article

## Artificial intelligence as one of the elements of digital transformation in metrology

**Aleksandr Yu. Kuzin<sup>1</sup>**

kuzin@vniims.ru

**Alexey N. Kroshkin<sup>1</sup>**

✉ a.kroshkin@vniims.ru

<sup>1</sup> Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The aspects of digitalization in metrology is considered, as well as the use of artificial intelligence technologies, in particular neural networks, to restore the measurement function when solving metrological tasks. An example of solving a practical problem of measuring the flow rate of oil wells by means of measuring instrument with elements of artificial intelligence is given.

**Keywords:** digitalization, artificial intelligence, artificial neural network, measurement function, multiphase flowmeter

**For citation:** Kuzin A. Yu., Kroshkin A. N. Artificial intelligence as one of the elements of digital transformation in metrology. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):27–35. (In Russ.).

### Введение

Цифровая трансформация, или просто цифровизация, обычно определяется как процесс использования цифровых технологий для создания новых или совершенствования существующих организаций, процессов, сервисов, систем взаимоотношений и т. д., с целью их соответствия изменяющимся потребностям государственного управления, бизнеса и технологий. Метрология как наука и как сфера практической деятельности не может находиться в стороне от базовых процессов цифровизации, происходящих во всех сферах жизни. Усилия национальных метрологических организаций по цифровой трансформации

сервисов и процессов в области законодательной метрологии уже более десятка лет координируются Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ, OIML). С этой целью организуются специализированные объединенные рабочие группы, проводятся совещания, вебинары, обмены опытом, разрабатываются стандарты и т. п. [1].

Основная задача цифровой трансформации законодательной метрологии в Российской Федерации сформулирована в [2] как создание некоей инфраструктуры, в рамках которой все участники национальной системы обеспечения единства измерений могут решать свои метрологические задачи с помощью цифровых технологий.

Такая инфраструктура (цифровая платформа) подразумевает создание как технического, так и правового компонента, который должен легализовать всю деятельность по обеспечению единства измерений, выполняемую в рамках этой платформы. Многие компоненты цифровой платформы в настоящее время уже созданы. Например, с 24 сентября 2020 г., в соответствии с Законом об обеспечении единства измерений, сведения об утверждении типа средств измерений (СИ) и результатах их поверки, содержащиеся в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, стали единственным юридически значимым подтверждением результатов данных работ. Фактически реализован переход от бумажных документов к цифровым данным о результатах основных метрологических работ, позволяющий их использовать в цифровом виде для передачи и обработки в самых различных автоматизированных системах.

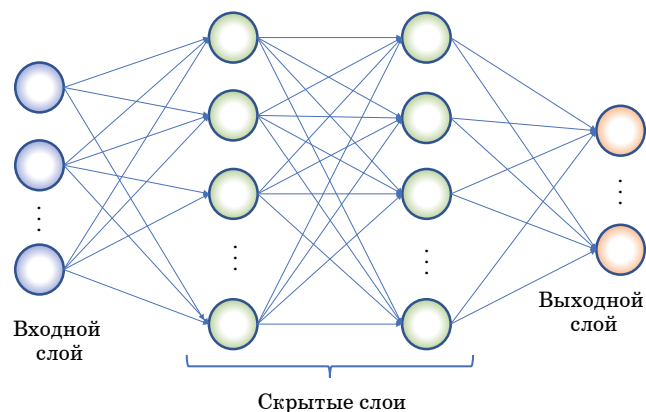
Облик элементов цифровой трансформации сегодня определяется новыми цифровыми технологиями, появившимися за последний десяток лет. Это прежде всего концепции встроенных систем, Интернета вещей (IoT), облачных вычислений, блокчейна, больших данных и др. Эти концепции повлекли за собой появление и бурное развитие технологий и рынков промышленного Интернета, Индустрии 4.0, анализа данных и различных умных сервисов, построенных на базе искусственного интеллекта (ИИ).

В данной статье рассмотрен именно ИИ, который является сегодня одним из самых значимых и бурно развивающихся направлений информационных технологий. В рамках ИИ, помимо технологий традиционного машинного обучения, настоящий бум переживают технологии так называемого глубоко обучения на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Это связано, в первую очередь, с резко возросшей вычислительной мощностью и производительностью «компьютерного железа», которое позволяет реализовывать все более глубокие топологии нейросетей, обучать их на огромных массивах данных и использовать для решения все более сложных и разнообразных задач. Также за счет возросшей мощности конечных устройств готовые и обученные ИНС все больше перемещаются с серверов, где они использовались удаленно в клиент-серверном режиме, в сами эти устройства (контроллеры роботов, телефоны, планшеты, видекамеры и т. п.). Это значительно снижает время отклика или принятия решения и повышает эффективность использования ИНС.

## Применение искусственных нейронных сетей для решения метрологических задач

Под ИНС принято понимать некую искусственно созданную вычислительную среду, имитирующую деятельность биологического мозга высокоразвитого существа (прежде всего, человека), с целью принятия решений на основе имеющейся информации. Основу ИНС составляют искусственные нейроны, связанные между собой определенным образом в соответствии с принятой топологией сети. Каждая такая связь характеризуется своим коэффициентом (весом), который определяет степень взаимодействия двух нейронов между собой (рис. 1). Такая простейшая сеть называется полносвязной, потому что связи нейронов организуются по принципу «каждый с каждым». Выход каждого нейрона рассчитывается как взвешенная сумма его входов. Таким образом, нейроны и веса в полносвязной сети представляют собой просто числа. В специализированных топологиях ИНС (сверточные, RNN, LSTM и др.) математические связи между элементами значительно сложнее. Например, в сверточной сети роль нейрона играет карта признаков, а роль веса – ядро свертки, при этом одно и другое в общем случае является матричной величиной. Но в любом случае, независимо от топологии, в ИНС всегда присутствуют веса, т. е. некие изменяемые коэффициенты, которые управляют прохождением информации со входа на выход ИНС.

При первоначальном создании ИНС не способна выполнять свои функции, так как ее веса назначаются случайным образом. Для создания работающей ИНС требуется ее обучение на реальных данных. С математической точки зрения, «обучение» означает нахождение оптимальных весов, которое обычно выполняется методом



- Рис. 1. Полносвязная нейронная сеть
- Fig. 1. Fully connected neural network

обратного распространения ошибки. Только обученная ИНС способна выполнять свою целевую функцию, т. е. трансформировать информацию, содержащуюся во входных данных, в требуемое решение. Таким образом, качество готовой к применению ИНС зависит как от адекватности топологии сети, так и от качества ее обучения.

Следует отметить, что реальный человеческий мозг рассматривается как так называемый «сильный» интеллект. «Сильный» интеллект способен решать множество совершенно разноплановых задач, причем зачастую почти одновременно, без какой-либо адаптации или перенастройки. Существующий на сегодняшний день ИИ является «слабым» интеллектом. Это означает, что ИИ способен решать только конкретную задачу, для которой он создан, адаптирован и обучен. Соответственно, современные ИНС, несмотря на бурное развитие, являются формой применения «слабого» интеллекта. Они создаются и обучаются для решения конкретных, хорошо поставленных и формализованных задач и не обладают функциональной универсальностью. Появление сильного ИИ не представляется вероятным фактом ближайшего будущего и ожидается экспертами не ранее чем через 20–30 лет.

Перечислить все задачи, которые решаются сейчас с помощью нейросетевых технологий, практически невозможно. Это большая группа задач, связанная с так называемым компьютерным зрением (обнаружение объектов, классификация, сегментация, восстановление качества, трансформация, синтез изображений и др.). Другая группа задач, решаемых с помощью ИНС, связана с обработкой человеческого языка в различных речевых и текстовых технологиях. Также нейросети активно используются для анализа данных, обработки и прогнозирования временных рядов, а также для решения большого количества задач регрессии и предсказания. Широкое применение ИНС находят и в робототехнике.

Главными показаниями к использованию ИНС при решении конкретной задачи являются неочевидность или чрезвычайная сложность зависимости искомого решения от входных данных, т. е. в случае, когда практически невозможно создать формализованный алгоритм принятия решения. В ряде случаев могут помочь так называемые классические методы машинного обучения, но универсальность и эффективность ИНС на сегодняшний день значительно выше.

Метрология, как наука о единстве и точности измерений, зачастую оперирующая со сложными техническими системами, также является потенциальным объектом применения нейросетевых технологий. Рассмотрим, как ИНС могут ис-

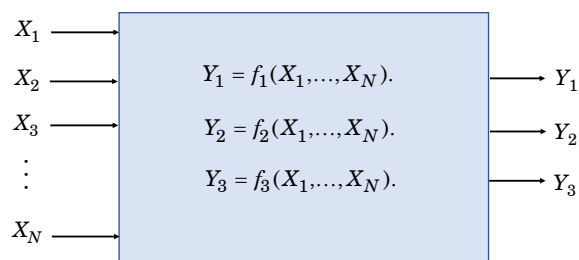
пользоваться для решения измерительных задач. В основополагающих нормативных документах по оценке точности измерений, например, в [3–5], процесс измерений описывается как определение зависимости выходной величины (значения измеряемой величины)  $Y$  от совокупности входных величин  $X_1, \dots, X_N$ , информация о которых доступна. Такая зависимость называется функцией измерения:

$$Y = f(X_1, \dots, X_N). \quad (1)$$

Предполагается, что для модели, задаваемой формулой (1), существует способ вычисления  $Y$  по данным  $X_1, \dots, X_N$  и что получаемое при этом значение  $Y$  единственно. При этом входные величины  $X_1, \dots, X_N$  могут быть как статистически независимыми, так и зависимыми. Во втором случае при расчете значения измеряемой величины и его неопределенности необходим учет ковариаций.

В общем случае измеряемых величин может быть несколько –  $Y_1, \dots, Y_M$ , тогда мы имеем соответствующее число функций измерения. На рис. 2 приведен пример измерительной системы, имеющей три выходные величины. Соответственно, такая система должна реализовывать три функции измерения по числу выходов.

Все вышесказанное справедливо для случая, когда функция измерения  $f(X_1, \dots, X_N)$  известна, либо может быть получена или восстановлена с допустимой достоверностью. Это, например, справедливо для учета внешних условий проведения измерения (температура и влажность воздуха, атмосферное давление). Условия могут отличаться от нормальных, но в допустимых пределах их влияние на результат измерений может быть с достаточной степенью достоверности описано или линейной, или полиномиальной моделью невысокого порядка. Таким же образом в подавляющем большинстве случаев можно учесть в функции измерения и другие влияющие факторы, такие как вибрация, напряжение и частота



• Рис. 2. Измерительная система с  $N$  входами и тремя выходами  
 • Fig. 2. Measuring system with  $N$  inputs and three outputs

питающей сети, магнитные поля и т. п. Другими словами, для большинства измерительных задач функция измерения априорно известна, либо может быть получена исходя из нормативных документов, знаний физической природы явлений, накопленного опыта, практики решения аналогичных измерительных задач. Функция измерения (1) позволяет как получить сам результат измерения  $Y$ , так и рассчитать неопределенность данного результата согласно [3–6].

Однако на практике встречаются сложные измерительные задачи, для которых функция измерения не может быть формализована в приемлемом формате по причине чрезмерной сложности, либо при отсутствии или недостаточности данных о физической природе процесса. Мы можем интуитивно предполагать, либо доподлинно знать, что во входных величинах, доступных для наблюдения, содержится информация, необходимая и достаточная для определения выходной величины, но построить функцию измерения на практике не представляется возможным. Именно в этом случае на помощь метрологии может прийти ИИ и, в частности, технология ИНС. В этом случае входные величины  $X_1, \dots, X_N$  становятся входами, а выходные величины  $Y_1, \dots, Y_M$  – выходами ИНС. Сама ИНС в этом случае, по сути, играет роль функции измерения. Более того, по завершении обучения готовую к применению ИНС можно расписать как серию последовательных математических преобразований. Например, так называемую полносвязную ИНС с  $k$  скрытыми слоями можно расписать как последовательность  $(k+1)$  матричных умножений. То есть, в конечном итоге, мы получаем искомую функцию измерения, но не на основе известной априорной информации, а эмпирическим путем с помощью технологии обучения ИНС.

Применение ИНС ограничено рядом условий. Прежде всего, это релевантность и достаточность входного набора данных  $X_1, \dots, X_N$  для определения выходных величин  $Y_1, \dots, Y_M$ . Другими словами, это должны быть «полезные» данные, в которых содержится информация о выходных величинах, т. е. существует реальная связь входа и выхода. И этих данных должно быть достаточно для определения выхода измерительной системы с необходимой точностью. Нейронная сеть поможет «вытянуть» из входных данных неочевидные или неизвестные зависимости, но получить выход системы «из воздуха» без релевантных данных не сможет.

Вторым неперемным условием применения ИНС является наличие либо возможность сбора обучающего набора экспериментальных данных. Рассматриваемый случай является классиче-

ским примером «обучения с учителем», т. е. для каждой комбинации  $X_1, \dots, X_N$ , нам известен результат  $Y_1, \dots, Y_M$ . И таких пар «вход – выход» для обучения ИНС должно быть много. Размер обучающей выборки в общем случае напрямую влияет на качество обучения ИНС и на точность результатов, получаемых при ее дальнейшем применении. Точных требований к размеру обучающей выборки не существует, они зависят, в частности, от количества входов и выходов, а также от диапазона разброса входных данных  $X_i$ , но в любом случае речь идет минимум о нескольких сотнях экспериментальных точек ( $X_1, \dots, X_N; Y_1, \dots, Y_M$ ).

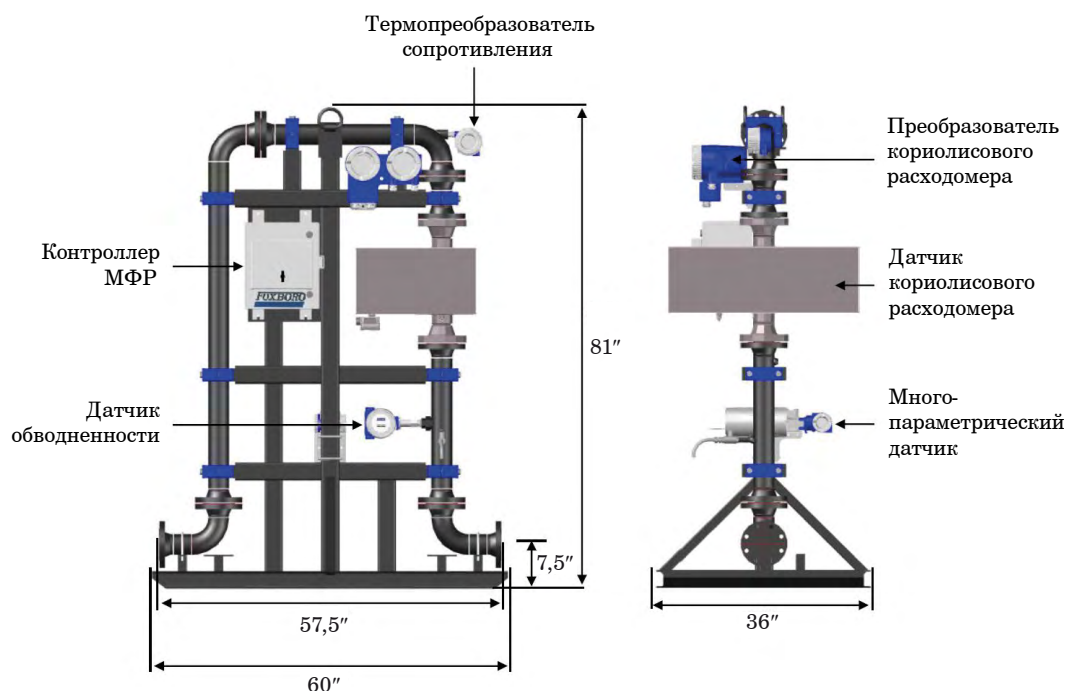
Кроме размера, немаловажными факторами являются сбалансированность и вариативность выборки. Сбалансированность означает, что данные в обучающей выборке должны быть примерно равномерно распределены по диапазону каждой входной величины  $X_i$ . Комбинации (сочетания) входных величин также не должны иметь каких-то заметных перекосов или корреляций. Вариативность означает, что значения входных величин  $X_i$  в обучающей выборке должны охватывать все диапазоны, на которых предполагается применение обученной модели. За пределами диапазонов входных данных, на которых ИНС училась, адекватность модели, по меньшей мере, не гарантируется.

Таким образом, применение ИНС для решения измерительных задач возможно и целесообразно, если:

- 1) функция измерения неизвестна или сложна до такой степени, что ее формализация не представляется возможной;
- 2) доступны релевантные входные данные, которые достаточно полно описывают или формируют выход модели;
- 3) имеется необходимый объем данных для обучения ИНС, либо возможность собрать такие данные.

Применение ИНС для решения метрологических задач не является чем-то абсолютно новым, тем не менее примеров такого применения, а особенно успешного применения, подтвержденного результатами испытаний с целью утверждения типа СИ, не так уж много. В качестве одного из таких примеров заслуживает внимания проект, выполненный на рубеже 2010-х гг. в Технологическом центре компании *Invensys*, расположенном в университете Оксфорда. В результате был разработан принципиально новый многофазный расходомер NetOil&Gas (рис. 3), который в 2012 г. успешно прошел процедуру утверждения типа СИ и нашел коммерческое применение.

При добыче нефти используются различные технологии разработки нефтеносных пластов,



• *Рис. 3. Многофазный расходомер NetOil&Gas*  
 • *Fig. 3. Multiphase flowmeter NetOil&Gas*

в частности, нагнетание в пласт воды. Кроме того, нефть практически всегда сопровождается попутным нефтяным газом (ПНГ). Это приводит к тому, что флюид, извлекаемый из скважины, представляет собой суспензию, состоящую из нефти, воды и газа. Соотношение этих компонентов может существенно различаться от месторождения к месторождению и даже от скважины к скважине. Нефтяные компании по всему миру стараются измерять дебит нефтяных скважин. Эти измерения позволяют эффективно разрабатывать нефтяной пласт, управлять закачкой воды, прогнозировать выход продукции и т. д. По сути, это технологические индикативные измерения, но в Российской Федерации, в силу законодательства о недропользовании, налогообложении, обеспечении единства измерений и в силу ряда других нормативных актов, такие измерения являются обязательными и относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Соответственно, выполняться такие измерения должны с помощью СИ утвержденного типа. Обязательные требования к СИ, измеряющим дебит нефтяных скважин, изначально были сформулированы в [7], а затем с 2021 г. перенесены в [8].

Типовым методом измерения дебита скважин является статический метод, при котором скважинный флюид поступает в сепаратор, где отделяется газ, а затем количество газа и количество

жидкости измеряется в отдельных магистралях. Затем определяется обводненность жидкостной фракции, и, таким образом, измеряются все три компонента скважинного флюида. Данный метод не является удобным и оперативным, поэтому многие компании десятилетиями ведут разработки поточных многофазных расходомеров (МФР), позволяющих в реальном масштабе времени измерять состав скважинного флюида непосредственно в магистрали без предварительной сепарации. Известно несколько более или менее успешных коммерческих разработок МФР. Наибольшее распространение получила конструкция на базе трубки Вентури и гамма-плотномер. Ее основными недостатками являются наличие источника ионизирующего излучения и, как следствие, проблемы с эксплуатацией такого МФР.

Специалистами Технологического центра компании *Invensys* был использован принципиально новый подход, в результате которого МФР был построен на базе общепромышленных СИ торговых марок *Foxboro* и *Weatherford* с применением элементов ИИ, в частности, ИНС. Конструкция расходомера показана на рис. 3. Его основу составляет кориолисовый расходомер (КР) *Foxboro*, разработанный ранее также в Технологическом центре. Кроме расходомера, разработчики использовали в установке многопараметрический датчик давления, датчик температуры RTD и точный влагомер.



Уникальность КР *Foxboro* состоит в том, что в нем реализована цифровая система возбуждения, которая позволяет сохранять работоспособность расходомера при высокой объемной доле газа (ОДГ) и продолжать измерения массового расхода и плотности. Измеряемый в присутствии газа массовый расход и плотность флюида правильнее было бы назвать псевдорасходом и псевдоплотностью, так как погрешности измерения с увеличением ОДГ возрастают относительно приписанных значений. Ученые Технологического центра установили, что для конкретного типоразмера сенсора КР зависимости погрешностей измерения массы и плотности имеют достаточную степень воспроизводимости и связаны с некоторыми параметрами, доступными для наблюдения. Но формализовать эти зависимости в виде функции измерения невозможно. Именно для решения этой задачи и были успешно применены ИНС.

Рассмотрим, как контроллер МФР NetOil&Gas решает задачу измерения компонентов многофазного потока на базе информации от СИ и математического аппарата ИНС.

Имеем физические измерения от СИ:

$\hat{\rho}_c$  – псевдоплотность флюида от КР (кг/м<sup>3</sup>);

$\hat{m}_c$  – массовый псевдорасход флюида от КР (кг/с);

$wc$  – обводненность нефти от влагомера (%);

$T$  – температура смеси от датчика RTD (К);

$P$  – абсолютное давление на входе КР от датчика давления (кПа).

Перед началом измерений в МФР вводятся исходные данные конфигурации (ИДК) по всем трем средам: плотность при нормальных условиях и коэффициент объемного расширения для нефти и воды, а также компонентный состав ПНГ. Такие исходные данные типично требуются для любого МФР. Расходомер NetOil&Gas имеет встроенную базу данных, позволяющую хранить массив ИДК по 60 скважинам.

На основе ИДК и измеренных значений температуры и давления рассчитываются плотности компонентов смеси для рабочих условий:

$$\rho_{\Gamma} = f_{\text{газ}}(\text{ИДК}, P, T); \rho_{\text{В}} = f_{\text{вода}}(\text{ИДК}, P, T);$$

$$\rho_{\text{Н}} = f_{\text{нефть}}(\text{ИДК}, P, T).$$

Вычисляется плотность «только жидкости», на основе показаний влагомера:

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{wc}{100} \rho_{\text{В}} + \frac{100 - wc}{100} \rho_{\text{Н}}.$$

Сравнивается расчетная плотность жидкости с псевдоплотностью, измеренной КР. Если в смеси

есть газовая фракция, измеряемая псевдоплотность будет ниже, чем расчетная плотность жидкости. Можно ввести выраженный в процентах параметр, который назовем потерей плотности:

$$dd = \frac{(\rho_{\text{ж}} - \hat{\rho}_c)}{\rho_{\text{ж}}} \cdot 100 \%.$$

Интуитивно данный параметр связан с ОДГ, однако истинная ОДГ может быть рассчитана только после коррекции измерений псевдоплотности. Поэтому потеря плотности является просто полезным индикатором величины газовой составляющей, который используется как один из входов ИНС.

Далее с помощью ИНС проводится коррекция измерений массового псевдорасхода и псевдоплотности флюида и получаются скорректированные значения:

$$\dot{m}_c = \text{ИНС}_m(\hat{m}_c, \hat{\rho}_c, wc, dd, \dots);$$

$$\rho_c = \text{ИНС}_\rho(\hat{m}_c, \hat{\rho}_c, wc, dd, \dots).$$

Теперь имеются все данные для расчета ОДГ:

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_c}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}} \cdot 100 \%.$$

Через известное значение ОДГ вычисляются массовые расходы газа и жидкости:

$$\dot{m}_{\Gamma} = \frac{\alpha}{100 \%} \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_c} \dot{m}_c; \dot{m}_{\text{ж}} = \frac{100 - \alpha}{100 \%} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_c} \dot{m}_c.$$

Далее, с учетом обводненности, жидкость разделяется на воду и нефть:

$$\dot{m}_{\text{В}} = \frac{wc}{100 \%} \frac{\rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{ж}}} \dot{m}_{\text{ж}}; \dot{m}_{\text{Н}} = \frac{100 - wc}{100 \%} \frac{\rho_{\text{Н}}}{\rho_{\text{ж}}} \dot{m}_{\text{ж}}.$$

Кроме того, специальные математические модели позволяют выделить газ, находящийся в жидком агрегатном состоянии – так называемый растворенный попутный нефтяной газ. Фактическими результатами измерений МФР являются массы и объемы трех компонентов флюида (нефть, вода, газ), находящихся в двух агрегатных состояниях (жидкость, газ). Если нефть и вода находятся только в жидкой фазе, то газ присутствует сразу в двух агрегатных состояниях. В результате измеряются четыре величины: нефть, вода, свободный газ и растворенный ПНГ. Более подробное описание алгоритма измерений и вычислений можно найти в работе [9].

Сбор обучающей выборки для тренировки ИНС выполнялся на специальных трехфазных

расходомерных установках в лабораториях NEL TUV (г. Глазго, Великобритания) и ГЭТ 195-2011 (ФГУП «ВНИИР», г. Казань, Россия). Затем на Государственном эталоне ГЭТ 195-2011 были проведены испытания для целей утверждения типа, по результатам которых МФР NetOil&Gas был зарегистрирован в Государственном реестре СИ за № 51424-12. Примеры с результатами испытаний на соответствие требованиям ГОСТ Р 8.615 [7], проведенных в лабораториях NEL и ВНИИР, приведены в [9, 10]. Помимо лабораторных испытаний, был проведен целый ряд полевых тестов, подтвердивших эффективность технологии NetOil&Gas непосредственно в полевых условиях на месте эксплуатации МФР. Информацию о целом ряде полевых тестов можно найти в работе [11].

Многофазный расходомер NetOil&Gas нашел коммерческое применение. На его базе был создан и реализован заказчиком целый ряд стационарных и мобильных измерительных установок. Примененная в МФР технология бессепарационного измерения дебита скважин позволила нефтяным компаниямкратно сократить время, а также существенно повысить оперативность и информативность измерений. Кроме того, измерительные установки на базе МФР NetOil&Gas обеспечивают заказчикам более низкую совокупную стоимость владения, по сравнению с традиционными установками, использующими сепараторы [10].

## Заключение

На данном примере показано, как технологии ИИ могут применяться в метрологии. Там, где невозможно использовать традиционный

детерминистский подход для восстановления функции измерения, на помощь приходят ИНС. Если доступны для наблюдения релевантные данные, связанные с выходом измерительной системы или формирующие этот выход, ИНС помогает восстановить неизвестные зависимости. Помимо новых измерительных задач, ИНС во многих случаях могут быть использованы для улучшения или уточнения уже работающих на практике моделей измерений. За более чем десять лет, прошедших с момента реализации проекта NetOil&Gas, существенно продвинулись вперед теория и практика применения ИНС, появились интегрированные среды разработки, специализированные программные пакеты, а также возросли вычислительные возможности средств вычислительной техники. Все это открывает совершенно новые возможности и перспективы для широкомасштабного внедрения элементов ИИ в виде как ИНС, непосредственно встроенных в средства измерений, так и ИНС, используемых в методиках постобработки результатов.

Широкое внедрение технологий ИИ, в частности ИНС, в повседневную практику деятельности по обеспечению единства измерений является важной и неотъемлемой частью общего процесса цифровой трансформации в метрологии. Искусственный интеллект, по прогнозам экспертов, будет оставаться лидирующей в мире технологией в течение как минимум ближайших 20–30 лет, поэтому интенсивные исследования и разработки в этом направлении чрезвычайно важны для отечественной метрологии с точки зрения сохранения своих позиций в общем тренде мирового технологического развития.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Schwartz R.* Digital Transformation in (Legal) Metrology – The View of the BIPM-OIML Joint Task Group // OIML bulletin. 2021. Vol. LXII, № 3. P. 5–9.
2. *Golubev S., Kuzin A.* National metrology law as a driver for digital transformation // OIML bulletin. 2021. Vol. LXII, № 3. P. 21–26.
3. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009. Неопределенность измерения. Введение в Руководства по выражению неопределенности измерения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146870> (дата обращения: 12.09.2022).
4. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности измерения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146871> (дата обращения: 12.09.2022).
5. JCGM GUM-6:2020. Guide to the expression of uncertainty of measurement. Part 6: Developing and using measurement models. URL: [https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM\\_GUM\\_6\\_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337](https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM_GUM_6_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337) (дата обращения: 12.09.2022).
6. РМГ 91-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерений». Общие принципы. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564053240> (дата обращения: 12.09.2022).

7. ГОСТ Р 8.615-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200043054> (дата обращения: 12.09.2022).
8. ПНСТ 360-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200167722> (дата обращения: 12.09.2022).
9. Coriolis mass flow metering for three-phase flow: A case study / M. Henry, M. Tombs, M. Zamora, F. Zhou // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 30. P. 112–122. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.01.003> (дата обращения: 12.09.2022).
10. New multi-phase flow metering technology available for industrial measuring units in the oil and gas industry / R. Casimiro [et al.] // *Нефтяное хозяйство*. 2014. № 5. С. 114–118.
11. Henry M., Tombs M., Zhou F. Field experience of well testing using multiphase Coriolis metering // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2016. Vol. 52. P. 121–136. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.09.014> (дата обращения: 12.09.2022).

## REFERENCES

1. Schwartz R. Digital Transformation in (Legal) Metrology – The View of the BIPM-OIML Joint Task Group. *OIML bulletin*. 2021;LXII(3):5–9.
2. Golubev S., Kuzin A. National metrology law as a driver for digital transformation. *OIML bulletin*. 2021;LXII(3):21–26.
3. GOST 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009. Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to guides on the expression of uncertainty in measurement. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200146870> [Accessed 12 September 2022].
4. GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200146871> [Accessed 12 September 2022].
5. JCGM GUM-6:2020. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Part 6: Developing and using measurement models. Available from: [https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM\\_GUM\\_6\\_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337](https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM_GUM_6_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337) [Accessed 12 September 2022].
6. RMG 91–2019. State system for ensuring the uniformity of measurements. Usage of terms «error of measurement» and «uncertainty of measurements». General principles. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/564053240> [Accessed 12 September 2022].
7. GOST R 8.615–2005. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurements of the amount of oil and petroleum gas extracted from the bowels. General metrological and technical requirements. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200043054> [Accessed 12 September 2022].
8. ПНСТ 360–2019. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurements of the amount of oil and petroleum gas extracted from the bowels. General metrological and technical requirements. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200167722> [Accessed 12 September 2022].
9. Henry M., Tombs M., Zamora M., Zhou F. Coriolis mass flow metering for three-phase flow: A case study. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013;(30):112–122. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.01.003> [Accessed 12 September 2022].
10. Casimiro R., Henry M., Tombs M. et al. New multi-phase flow metering technology available for industrial measuring units in the oil and gas industry. *Neftyanoe khozyajstvo*. 2014;(5):114–118. (In Russ.).
11. Henry M., Tombs M., Zhou F. Field experience of well testing using multiphase Coriolis metering. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2016;(52):121–136. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.09.014> [Accessed 12 September 2022].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кузин Александр Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, действительный член Метрологической академии Российской Федерации, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы.

**Kuzin Aleksandr Yu.**, D. Sc. in Technical Sciences, Professor, Member of Russian Metrological Academy, deputy director, Russian Research Institute for Metrological Service.

Область научных интересов – метрология, метрологическое обеспечение нанотехнологий, информационные и измерительные системы, законодательное регулирование обеспечения единства измерений.

**Крошкин Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, член-корреспондент Метрологической академии Российской Федерации, начальник отдела Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы.

Область научных интересов – метрология, калибровка средств измерений, неопределенность измерений, искусственный интеллект, нейронные сети.

Поступила в редакцию 14.07.2022

Поступила после рецензирования 29.08.2022

Принята к публикации 15.09.2022

Research interests – metrology, metrological support of nanotechnologies, information and measuring systems, legislative regulation of assurance of measurement uniformity.

**Kroshkin Alexey N.**, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of Russian Metrological Academy, Head of department, Russian Research Institute for Metrological Service.

Research interests – metrology, calibration of measuring devices, uncertainty of measurements, artificial intelligence, neural networks.

Received 14.07.2022

Revised 29.08.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья  
УДК 621.317.08

## Цифровая трансформация информационной составляющей метрологии

**Сергей Александрович Денисенко<sup>1</sup>**

sdenisenko@vniims.ru

**Александр Юрьевич Кузин<sup>1</sup>**

kuzin@vniims.ru

**Илья Владимирович Красавин<sup>1</sup>**

✉ i.krasavin@vniims.ru

**Юлия Леонидовна Фролова<sup>1</sup>**

y.frolova@vniims.ru

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрена цифровая трансформация информационной составляющей обеспечения единства измерений, ее текущее состояние и перспективы развития. Приведены приоритетные направления развития информационной системы, предназначенной для создания и ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений.

**Ключевые слова:** цифровизация, Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, информационная составляющая

**Для цитирования:** Денисенко С. А., Кузин А. Ю., Красавин И. В., Фролова Ю. Л. Цифровая трансформация информационной составляющей метрологии // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 36–43.

Original article

## Digital transformation of the information component of metrology

**Sergey A. Denisenko<sup>1</sup>**

sdenisenko@vniims.ru

**Alexander Yu. Kuzin<sup>1</sup>**

kuzin@vniims.ru

**Ilya V. Krasavin<sup>1</sup>**

✉ i.krasavin@vniims.ru

**Julia L. Frolova<sup>1</sup>**

y.frolova@vniims.ru

<sup>1</sup> Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The article deals with the digital transformation of the information component of measurement assurance, its current state and development perspectives. The priority directions of development of information system intended for creation and maintaining the Federal information fund on assuring the uniformity of measurements are given.

**Keywords:** digitalization, Federal Information Fund on Uniformity of Measurements, information component

**For citation:** Denisenko S. A., Kuzin A. Yu., Krasavin I. V., Frolova Ju. L. Digital transformation of the information component of metrology. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):36–43. (In Russ.).

### Введение

Указом Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 утверждена «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» [1] (далее – Стратегия), определяющая цели, задачи и меры по реализации внутренней и внешней политики Российской

Федерации в сфере применения информационных и коммуникационных технологий, направленных на развитие информационного общества, формирование национальной цифровой экономики, обеспечение национальных интересов и реализацию стратегических национальных приоритетов.

В целях реализации «Стратегии развития информационного общества в Российской

Федерации на 2017–2030 годы» распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р утверждена Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [2] (далее – Программа), направленная на создание условий для развития общества знаний в Российской Федерации, повышение благосостояния и качества жизни граждан нашей страны путем повышения доступности и качества товаров и услуг, произведенных в цифровой экономике с использованием современных цифровых технологий, повышения степени информированности и цифровой грамотности, улучшения доступности и качества государственных услуг для граждан, а также безопасности как внутри страны, так и за ее пределами.

В соответствии с Программой, цифровая экономика представлена тремя следующими уровнями, которые в своем тесном взаимодействии влияют на жизнь граждан и общества в целом:

1) рынки и отрасли экономики (сферы деятельности), где осуществляется взаимодействие конкретных субъектов (поставщиков и потребителей товаров, работ и услуг);

2) платформы и технологии, где формируются компетенции для развития рынков и отраслей экономики (сфер деятельности);

3) среда, которая создает условия для развития платформ и технологий и эффективного взаимодействия субъектов рынков и отраслей экономики (сфер деятельности) и охватывает нормативное регулирование, информационную инфраструктуру, кадры и информационную безопасность.

Обеспечение единства измерений, как и метрологическое обеспечение в целом, является одной из отраслей экономики, оказывающей непосредственное влияние на качество жизни граждан и общества и экономику страны в целом. Таким образом, цифровизация метрологического обеспечения является неотъемлемой частью процесса цифровой трансформации экономики Российской Федерации.

Следует отметить, что, в соответствии со Стратегией, под цифровой экономикой понимается хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг.

В области обеспечения единства измерений в качестве одного из приоритетных направле-

ний цифровизации выступает информационное обеспечение, в целях которого создан и ведется Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

### **Текущее состояние цифровой трансформации информационной составляющей системы обеспечения единства измерений**

Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений создан с целью обеспечения потребности граждан, общества и государства в получении объективной и достоверной информации, используемой в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, животного и растительного мира, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической безопасности, и образуется следующими документами и сведениями:

– нормативные правовые акты Российской Федерации, содержащие требования к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений;

– нормативные документы в области обеспечения единства измерений;

– информационные базы данных, включающие в себя, в том числе, сведения по справочным данным о физических константах и свойствах веществ и материалов, сведения о результатах мониторинга состояния системы обеспечения единства измерений, прогнозирования измерительных потребностей экономики и общества;

– международные документы в области обеспечения единства измерений;

– международные договоры Российской Федерации в области обеспечения единства измерений;

– сведения об аттестованных первичных референтных методиках (методах) измерений, референтных методиках (методах) измерений и методиках (методах) измерений;

– единый перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;

– сведения о государственных эталонах единиц величин, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;

– сведения об утвержденных типах стандартных образцов;

– сведения об утвержденных типах средств измерений;

– сведения о результатах поверки средств измерений.

Для создания и ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений в 2016 г. в рамках реализации ведомственной программы цифровой трансформации Росстандартом России создана вторая очередь Федеральной государственной информационной системы Росстандарта (подсистема «АРШИН»). На момент создания подсистема «АРШИН» позволила в полном объеме реализовать функции Росстандарта по организации ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений и предоставлению публичного доступа к документам и сведениям, содержащимся в нем.

Однако современные тренды цифровой трансформации экономики требуют дальнейшего развития информационных систем в целом и информационной системы, предназначенной для ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений. Дополнительным катализатором развития подсистемы «АРШИН» стали изменения в основополагающий закон в области обеспечения единства измерений, внесенные Федеральным законом от 27 декабря 2019 г. № 496 «О внесении изменений в Федеральный закон „Об обеспечении единства измерений“». Согласно внесенным изменениям, с момента их вступления в действие утверждение типа стандартных образцов и типов средств измерений, а также результаты поверки подтверждаются не бумажными документами – свидетельствами об утверждении типа и свидетельствами о поверке, а сведениями об утвержденных типах стандартных образцов, типах средств измерений и результатах поверки, включенными в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Изменения в форме подтверждения утверждения типа средств измерений и результатов поверки потребовали аудита состава и форматов сведений, подлежащих включению в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. А необходимость обеспечения возможности обработки и анализа данных, что является неотъемлемой частью цифровой трансформации, потребовала формализации этих сведений.

С целью решения данных задач были разработаны нормативные правовые акты, регламентирующие порядок создания и ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений и по модернизации модуля подсистемы «АРШИН», предназначенного для учета и публикации сведений о результатах поверки, – модуля «Поверки».

При модернизации модуля «Поверки» также была решена сложная задача организации взаимодействия модуля «Поверки», обеспечивающего передачу формализованных сведений о результатах поверки средств измерений, с реестрами подсистемы «АРШИН», сведения в которых не формализованы. Такими реестрами являются реестры утвержденных типов средств измерений, эталонов единиц величин, утвержденных стандартных образцов.

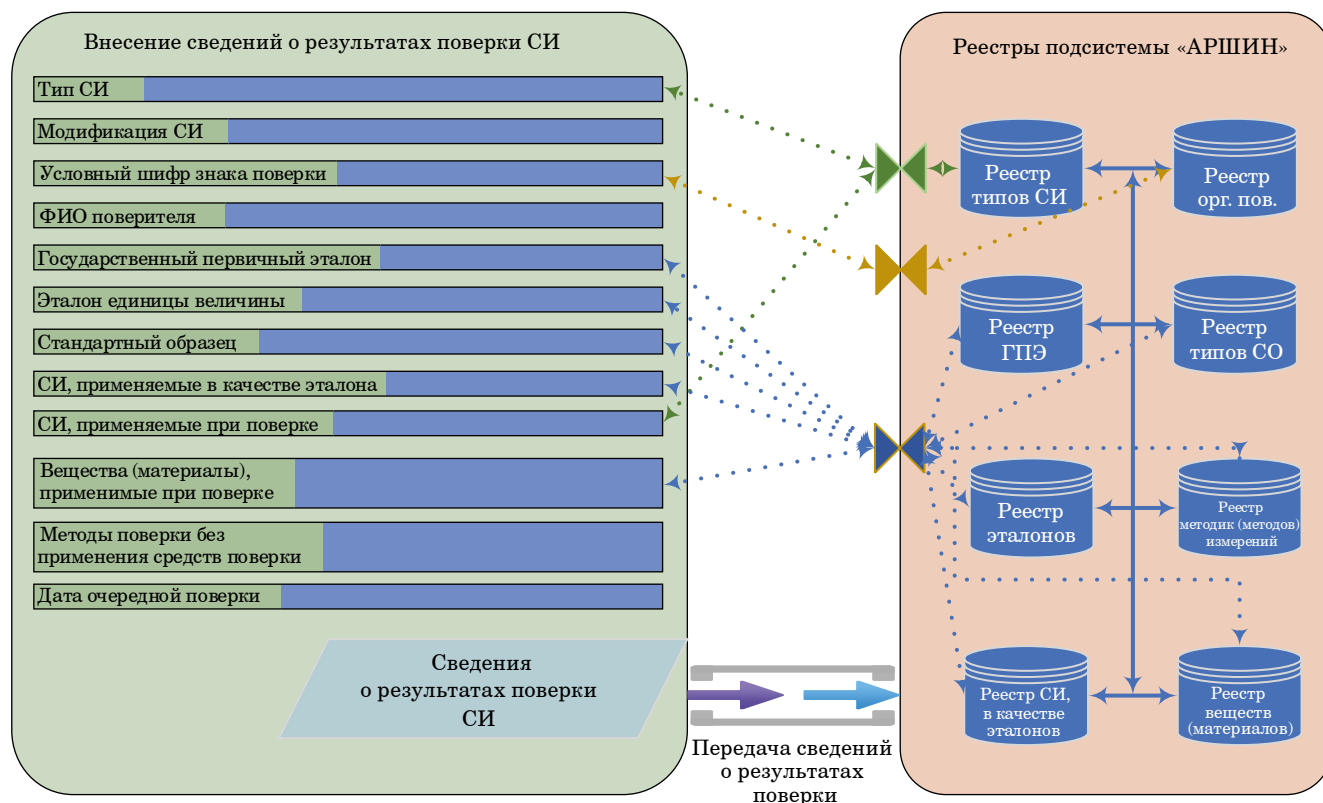
В результате решения данной задачи была организована схема информационного взаимодействия компонентов подсистемы «АРШИН», показанная на рис. 1.

Хранение сведений о результатах поверки организовано в реляционных базах данных, обеспечивающих возможность автоматизированной обработки и анализа сведений.

В то же время, несмотря на успешную организацию взаимодействия между модулем «Поверки» и другими реестрами подсистемы «АРШИН», в полном объеме формализовать сведения о результатах поверки средств измерений не представляется возможным, ввиду необходимости формализации сведений об утвержденных типах средств измерений и эталонах единиц величин. Так, например, в настоящее время невозможно указать модификацию утвержденного типа средства измерений из списка утвержденных; интервал между поверками, установленный при утверждении типа; обозначение и наименование методики поверки, по которой выполнялась поверка.

Указанные недостатки формализации могут быть устранены после завершения модернизации модуля, предназначенного для ведения реестра утвержденных типов средств измерений и формализации сведений о них.

Несмотря на имеющиеся недостатки, 24 сентября 2020 г. был сделан большой шаг в направлении цифровизации информационного обеспечения единства измерений, заключающийся в гармоничном сочетании изменений в Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений», в нормативных правовых актах Минпромторга России, разработанных для реализации изменений в Федеральный закон, и технической реализации требований нормативных правовых актов в реально работающей информационной системе. При этом намечены направления дальнейшего развития информационной системы, обеспечивающей создание и ведение Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений в рамках цифровой трансформации обеспечения единства измерений.



• Рис. 1. Схема информационного взаимодействия модуля «Проверки» с реестрами подсистемы «АРШИН»  
 • Fig. 1. Scheme of information interaction of the «Verification» module with the «ARSHIN» subsystem registers

### Выполняемые мероприятия по цифровой трансформации обеспечения единства измерений

Как отмечено выше, для обеспечения возможности формализации сведений о результатах поверки средств измерений необходима формализация сведений об утвержденных типах средств измерений. Данная задача в настоящее время решается в рамках модернизации модуля «Типы СИ», направленной на приведение атрибутивного состава сведений об утвержденных типах средств измерений, включаемых в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, в соответствие с «Порядком создания и ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, передачи сведений в него и внесения изменений в данные сведения, предоставления содержащихся в нем документов и сведений», утвержденным приказом Минпромторга России от 28 августа 2020 г. № 2906 (утвержден приказом Минпромторга России от 28 августа 2020 г. № 2906) [3]. Еще одной очень важной задачей модернизации модуля «Типы СИ» является обеспечение возможности предоставления одной из наиболее востребованных государственных услуг, оказываемой

Росстандартом, – государственной услуги по утверждению типа средств измерений.

Следует отметить, что модернизация модуля «Типы СИ», предназначенного для ведения реестра Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, помимо формализации сведений об утвержденных типах средств измерений, должна обеспечить реализацию требований Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» в части присвоения заводских номеров или буквенно-цифровых обозначений средствам измерений, позволяющих однозначно идентифицировать каждый экземпляр средства измерений.

Безусловно, реализация данных требований не представляется возможной без их регламентации в нормативных правовых актах, что подтверждает необходимость параллельного развития нормативных правовых актов и информационных систем, реализующих их требования.

Модернизация модуля «Типы СИ» повлечет за собой необходимость развития модуля «Проверки», направленного на формализацию таких атрибутов, как модификации СИ, интервалов между поверками, методик поверки и т. д.

В настоящее время сведения об утвержденных типах СИ в Федеральный информационный



фонд по обеспечению единства измерений вносятся вручную. Предоставление государственной услуги по утверждению типов средств измерений в настоящее время осуществляется фактически так же – вручную. Такой порядок влечет за собой увеличение сроков предоставления государственной услуги, а также наличие ошибок, связанных с человеческим фактором. В данной ситуации обеспечение возможности предоставления государственной услуги по утверждению типов средств измерений в электронном виде с минимизацией операций, выполняемых большим числом сотрудников в ручном режиме, является еще одним направлением цифровизации.

### **Дальнейшие направления цифровизации информационной составляющей обеспечения единства измерений**

В дальнейшем цифровую трансформацию обеспечения единства измерений можно рассматривать как развитие по двум направлениям:

1) совершенствование информационной системы, предназначенной для ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений;

2) создание и внедрение информационной системы обработки и анализа больших данных, содержащихся в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений.

Совершенствование информационной системы должно заключаться в модернизации модуля «Эталоны», направленной также на формализацию сведений об эталонах единиц величин, приведение в соответствие нормативным правовым актам порядка передачи сведений о первичной и периодической аттестации эталонов единиц величин, обеспечение возможности прослеживания передачи единицы величины от государственных первичных эталонов к средствам измерений. Формализация сведений об эталонах единиц величин требует установления атрибутивного состава сведений об эталонах единиц величин, подлежащих включению в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Это свидетельствует о том, что нормативные правовые акты, регламентирующие деятельность в области обеспечения единства измерений, могут быть как ускорителем цифровой трансформации, так и причиной ее замедления, что, безусловно, требует своевременной их адаптации и актуализации.

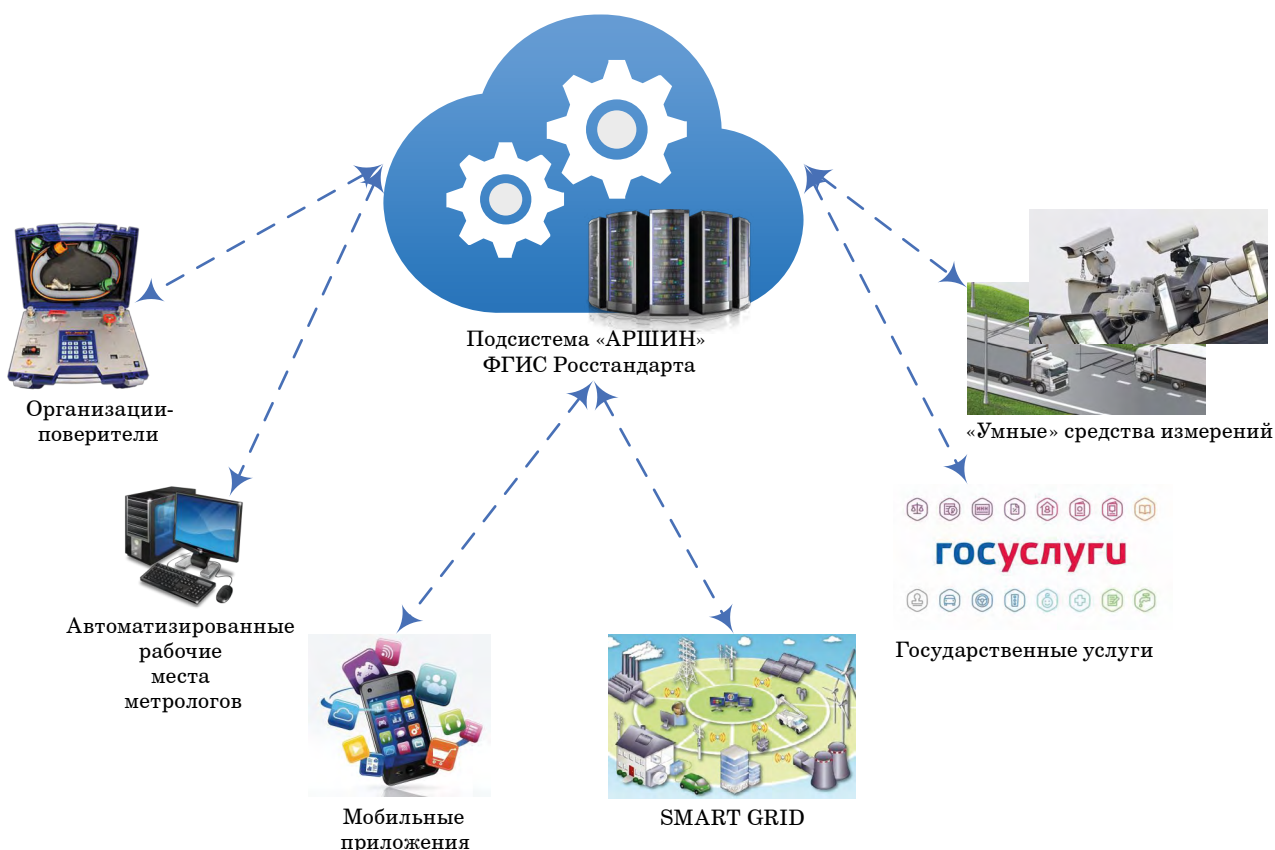
Формализация сведений об утвержденных типах средств измерений, эталонах единиц величин, учет их формализации в сведениях о ре-

зультатах поверки средств измерений позволят создать источник данных для разработки информационно-аналитической системы, предназначенной для мониторинга состояния системы обеспечения единства измерений и решения различных задач анализа больших данных, в том числе с применением алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта.

При этом перевод государственной услуги по утверждению типов средств измерений в электронный вид через Единый портал государственных и муниципальных услуг позволит обеспечить прослеживаемость сведений от подаваемых заявителем при подаче заявления на предоставление государственной услуги до сведений, включаемых в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Это, несмотря на существующие научно-методические и организационные трудности в формализации исчерпывающего перечня сведений об утвержденных типах средств измерений (описания типа и методики поверки), значительно повысит прозрачность процедуры предоставления государственной услуги по утверждению типа средства измерений.

Следует отметить, что создание и внедрение информационной системы обработки и анализа больших данных, содержащихся в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, не позволит реализовать систему, способную без участия аналитиков данных решать любые поставленные перед ней задачи, но при этом позволит обеспечить необходимыми исходными данными для реализации алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта, позволяющих решать задачи как мониторинга состояния обеспечения единства измерений, так и прогнозирования измерительных потребностей экономики и общества, страны в целом.

Также формализация данных в области обеспечения единства измерений позволит обеспечить создание ядра для формирования метрологического облака (рис. 2), содержащего актуальные сведения в области обеспечения единства измерений, обогащенные за счет взаимодействия с другими информационными системами, в том числе информационными системами других федеральных органов исполнительной власти, что, в свою очередь, позволит решать различные сложные задачи как в области обеспечения единства измерений, так и в других смежных областях. Так, например, формализованные сведения об эталонах единиц величин позволят создать основу для реинжиниринга процессов формирования заявляемых областей аккредитации на выполнение поверки средств



- Рис. 2. Метрологическое облако
- Fig. 2. Metrology Cloud

измерений, исходя из имеющихся у заявителя эталонов единиц величин. Формализация прослеживаемости позволит обеспечить контроль корректности сведений о результатах поверки средств измерений, вносимых в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Создание метрологического облака позволит обеспечить обмен сведениями как между пользователями и метрологическим облаком в целях решения задач обеспечения единства измерений, так и между конечными пользователями сервисов, таких как заказчики и исполнители услуг, результаты оказания которых должны отображаться в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Актуальной задачей такого взаимодействия является подтверждение результатов поверки средств измерений энергоресурсов в системах формирования платежных документов. Метрологическое облако также позволит обеспечить доступ к сведениям в области обеспечения единства измерений посредством системы межведомственного электронного взаимодействия заинтересованным федеральным органам исполнительной власти

при реализации их функций и оказании государственных и муниципальных услуг, что, безусловно, окажет положительное влияние на качество жизни граждан и экономику страны в целом.

## Заключение

Уже сейчас имеющиеся в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений частично формализованные сведения о результатах поверки средств измерений позволяют решать ряд аналитических и расчетных задач, направленных на оценку состояния системы обеспечения единства измерений, оценку качества и «добросовестности» работы аккредитованных юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

Формализация исчерпывающего перечня сведений, включаемых в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, позволит обеспечить значительное расширение спектра решаемых задач как мониторинга состояния системы обеспечения единства измерений, так и прогнозирования измерительных

потребностей; задач, решаемых в интересах как производителей средств измерений, так и их изготовителей. Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы как Оператор Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений обладает необходимыми компетенциями в области разработки и внедрения информационных систем, а также в области разработки и реализации ал-

горитмов обработки информации. А реализация данных компетенций позволит обеспечить доступ к актуальной информации в любой момент времени, что значительно сократит временные затраты на оказание услуг в области обеспечения единства измерений, а также сократит количество ошибок, связанных с человеческим фактором.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы / утв. Указом Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420397755/titles/64U0IK?ysclid = 18cxxp0ynx639452987> (дата обращения: 22.09.2022).
2. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» / утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 22.09.2022).
3. Порядок создания и ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, передачи сведений в него и внесения изменений в данные сведения, предоставления содержащихся в нем документов и сведений / утв. Приказом Минпромторга России от 28 августа 2020 г. № 2906. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/00012020102220032> (дата обращения: 22.09.2022).

## REFERENCES

1. Strategies of development of information society in the Russian Federation for 2017–2030 / approved by the Decree of the President of the Russian Federation of May 9, 2017 no. 203 «On the Strategy of development of information society in the Russian Federation for 2017–2030». Available from: <https://docs.cntd.ru/document/420397755/titles/64U0IK?ysclid = 18cxxp0ynx639452987> [Accessed 22 September 2022].
2. Program «Digital Economy of the Russian Federation» / approved by the order of the Government of the Russian Federation July 28, 2017 no. 1632-r. Available from: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> [Accessed 22 September 2022].
3. Procedure for creation and maintenance of the Federal Information Fund on Ensuring Uniformity of Measurements, transfer of information to it and amending this information, provision of documents and information contained in it / approved by the Ministry of Industry and Trade of Russia on August 28, 2020 no. 2906. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/00012020102220032> [Accessed 22 September 2022].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Денисенко Сергей Александрович**, директор Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы.

Область научных интересов – метрология, метрологическое обеспечение предприятий промышленности, законодательное регулирование обеспечения единства измерений.

**Кузин Александр Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, действительный член Метрологической академии Российской Федерации, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы.

**Denisenko Sergey A.**, Director, Russian Research Institute for Metrological Service.

Research interests – metrology, metrological assurance of industrial enterprises, legal regulation of measurement uniformity assurance.

**Kuzin Alexander Yu.**, D. Sc. in Technical Sciences, Professor, Full Member of Russian Metrology Academy. Deputy Director, Russian Research Institute for Metrological Service.

Область научных интересов – метрология, метрологическое обеспечение нанотехнологий, информационные и измерительные системы, законодательное регулирование обеспечения единства измерений.

**Красавин Илья Владимирович**, кандидат технических наук, член-корреспондент Метрологической академии Российской Федерации, руководитель Центра мониторинга и прогнозирования Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы.

Область научных интересов – метрология, метрологическое обеспечение производства, информационные системы, информационно-аналитические системы, искусственный интеллект, нейронные сети, законодательное регулирование обеспечения единства измерений.

**Фролова Юлия Леонидовна**, кандидат технических наук, аналитик Центра мониторинга и прогнозирования Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы.

Область научных интересов – метрология, метрологическое обеспечение производства, информационные системы, информационно-аналитические системы, искусственный интеллект, нейронные сети.

Поступила в редакцию 14.07.2022

Поступила после рецензирования 01.09.2022

Принята к публикации 15.09.2022

Research interests – metrology, metrological support of nanotechnology, information and measuring systems, legal regulation of measurement uniformity.

**Krasavin Ilya V.**, PhD in Technical Sciences, Corresponding Member of Russian Metrology Academy. Head of the Centre for Monitoring and Forecasting, Russian Research Institute for Metrological Service.

Research interests – metrology, metrological assurance of production, information systems, information-analytical systems, artificial intelligence, neural networks, legal regulation of measurement uniformity.

**Frolova Julia L.**, PhD in Technical Sciences, analyst of the Center for Monitoring and Forecasting, Russian Research Institute for Metrological Service.

Research interests – metrology, metrological assurance of production, information systems, information-analytical systems, artificial intelligence, neural networks.

Received 14.07.2022

Revised 01.09.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья  
УДК 004.9

## Бережливая цифровизация организационных систем

**Станислав Анатольевич Назаревич<sup>1</sup>**  
albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

**Владимир Александрович Тушавин<sup>1</sup>**  
✉ tushavin@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4989-7456

**Елена Александровна Фролова<sup>1</sup>**  
frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Представлен содержательный взгляд на смысловой дрейф парадигмы технологической организации функционирования производственных систем от механистической индустриализации к цифровой трансформации и Индустрии 4.0. Сформирован оригинальный ракурс использования бережливой идеологии для развертывания процессов цифровой трансформации организационных систем и жизненных циклов создания ценности, уточнены некоторые особенности восприятия уровня зрелости основных процессов и меры их готовности к изменениям. Сформировано описание документального основания для осуществления формализации процесса перехода на новую технологическую концепцию цифровой трансформации, описаны нормативно-правовые документы, регламентирующие содержание Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Рассмотрены вопросы корпоративной коллизии между стейкхолдерами от различных методологий управления процессами, содержательно описаны конфликты применения традиционного инструментария TQM (Total Quality Management – «всеобщее управление качеством») и LEAN (Lean production – «бережливое производство») в организационных системах. Управление изменениями как важный процесс инновационного поведения организационных систем опирается на формализованные инструменты менеджмента рисков, включая стратегические риски миграции кадрового персонала. Замещение рутинных процессов предлагаемыми цифровыми решениями может привести к утрате организационного знания в реализуемых процессах, что отразится на уровне зрелости процессов, повысит сопротивление персонала изменениям и увеличит депрессивность корпоративной культуры.

Представлены возможные подходы к нивелированию внутренних конфликтов в процессах управления изменениями организационных систем с помощью инструментов бережливой цифровой трансформации.

**Ключевые слова:** бережливая цифровизация, организационные системы, жизненные циклы, уровни зрелости, инновации, управление изменениями, бережливая идеология, национальные программы, цифровая трансформация

**Для цитирования:** Назаревич С. А., Тушавин В. А., Фролова Е. А. Бережливая цифровизация организационных систем // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 44–53.

Original article

## Lean digitalization of organizational systems

**Stanislav A. Nazarevich<sup>1</sup>**  
albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

**Vladimir A. Tushavin<sup>1</sup>**  
✉ tushavin@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4989-7456

**Elena A. Frolova<sup>1</sup>**  
frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article presents a meaningful look at the semantic drift of the paradigm of the technological organization of the functioning of production systems from mechanistic industrialization to digital transformation and Industry 4.0. An original perspective on the use of lean ideology for deploying the processes of digital transformation of organizational systems and life cycles of value creation is presented, some features of the perception of the level of maturity of the main processes and the measure of their readiness for change are clarified. A description of the documentary basis for the implementation of the formalization of the process of transition to a new technological concept of digital transformation has been formed, and legal documents regulating the content of the National program «Digital Economy of the Russian Federation» have been described. The issues of corporate conflict between stakeholders from various process management methodologies are considered, the conflicts of using traditional TQM (Total Quality Management) and LEAN (Lean production – «lean production») tools in organizational systems are described in detail. Change management as an important process of innovative behavior of organizational systems relies on formalized risk management tools, including the strategic risks of personnel migration. Replacing routine processes with proposed digital solutions can lead to a loss of organizational knowledge in the processes being implemented, which will affect the level of process maturity, increase staff resistance to change and increase the depressiveness of the corporate culture.

*Possible approaches to leveling internal conflicts in the processes of managing changes in organizational systems using the tools of lean digital transformation are presented.*

**Keywords:** lean digitalization, organizational systems, life cycles, maturity levels, innovation, change management, lean ideology, national programs, digital transformation

**For citation:** Nazarevich S. A., Tushavin V. A., Frolova E. A. Lean digitalization of organizational systems. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):44–53. (In Russ.).

## Введение

В настоящее время широкое распространение получили тренды в области цифровой трансформации организационных систем. Переход от существующих стабильных и поддающихся прогнозированию макроэкономических явлений к так называемому VUCA-миру (Volatility – непостоянство, Uncertainty – неопределенность, Complexity – сложность, Ambiguity – неоднозначность) стал жизненно важной повесткой для технологических визионеров и содержательных лидеров организационных систем. Динамичность и неопределенность заставляют работать над издержками в основных процессах, прикладывая все больше сил для разработки или поиска новых результативных инструментов повышения эффективности.

Наблюдаемый в настоящее время сдвиг парадигмы от автоматизации и информатизации производства и технологических процессов к так называемой цифровизации можно рассмотреть как востребованное инновационное поведение, способное привести к качественным изменениям в производственных системах. В этом контексте также иногда употребляется такое понятие, как «переход к Индустрии 4.0», поэтому следует договориться о терминах и определениях применительно к целям данной статьи.

Как известно, под Индустрией 4.0 понимают цифровизацию производственного сектора, сопряженную со сбором данных с помощью датчиков, установленных практически во все компонентах и оборудовании, а также с повсеместным внедрением киберфизических систем и анализом всех доступных данных. Термин же «цифровизация» в настоящее время несколько шире, поскольку так называемая «Платформа „Индустрия 4.0“» («High-Tech Strategy 2020 Action Plan») была разработана в 2011 г. в рамках стратегии развития немецкой промышленности и не отражает развитие промышленных надсистем на базе информационных технологий, произошедших за последнее десятилетие и не включает в себя социальную сферу и экономику страны в целом. Помимо немецкого проекта, существуют аналогичные проекты во Франции – «Industrie du Futur», в Китае – «Smart Manufacturing» и т. д., однако в отечественной литературе обычно используют именно термин «Индустрия 4.0».

С другой стороны, в соответствии с определением: «Цифровизация (цифровое развитие) – процесс организации выполнения в цифровой среде функций и деятельности (бизнес-процессов), ранее выполнявшихся людьми и организациями без использования цифровых продуктов. Цифровизация предполагает внедрение в каждый отдельный аспект деятельности информационных технологий» [1, 2], цифровизация является отрасленезависимым подходом, включающим в себя так называемую Индустрию 4.0.

В рамках реализации Указов Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», в том числе с целью решения задачи по обеспечению ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере, Правительством Российской Федерации сформирована Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная протоколом заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 4 июня 2019 г. № 7.

Несмотря на изложенные положительные моменты в развитии цифровизации в России, следует отметить потенциальное противоречие между курсом на ускоренное внедрением цифровых технологий и зрелостью бизнес-процессов цифровизируемого предприятия, которое содержит в себе достаточно высокие проектные риски.

Развертывание новых и эволюция действующих основных процессов укладывается в настоящие положения ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-2-2009, однако готовность организационных систем к изменениям и частичной реструктуризации корпоративной культуры подлежит измерению и мониторингу с целью минимизировать организационно-технологические риски.

Производственно-экономические и ситуационно-технические проблемы, решаемые организационными системами, построенными по механическими принципам, генерируют достаточное количество информации для создания базы знаний и инициализации процессов управления изменениями с целью прекращения или сведения

к приемлемому минимуму возникающих ошибок и несоответствий в производственных и технологических процессах.

Однако проводимые организационно-технические решения по нивелированию основных проблем, возникающих в производственных системах, сталкиваются с устоявшейся корпоративной культурой построенной, на принципах теории X&Y МакГрегора, где в зависимости от поведенческой модели персонала используются различные утилиты управления. Следовательно, большинство изменений будет восприниматься персоналом как реализация негативной модели теории МакГрегора. Тем самым формируется устойчивый образ традиционной вертикально организационной структуры, действительно способной к устойчивости перед внешними вызовами, но слабо функциональной в процессах накопления и синтеза новых инструментов и решений в случаях итеративности типовых проблем или формирования новых, нетиповых вызовов.

Информационная эра, созданная базовыми инновациями в конце прошлого века, открыла доступ к целому морфологическому множеству вторичных технологий, ведущих к появлению улучшающих инноваций, позволяющих поднять уровень управляемости результативностью и эффективностью процессов организационных систем. Цифровые технологии стали подобной инновацией и позволили трансформировать процессы производственных систем и сделать их более обезличенными, количественное участие персонала в рутинных процессах переходит в качество и приобретает функцию принятия решений и контроля операционных действий.

Однако опыт исследований крупнейших ИТ-проектов США консалтинговой компанией *The Standish Group*, начиная с 1995 г., показывает, что только 31 % проектов в сфере информационных технологий (ИТ) являются успешными, из этих успешных проектов только 46 % обеспечивают высокую ценность для потребителя [3]. Исходя из изложенного, представляется целесообразным использовать базовые принципы бережливого производства и современного проектного менеджмента в проектах по цифровизации, поскольку ориентация на ценностные предложения является одним из базовых принципов этой методологии. Этот тезис коррелирует, в частности, с тем, что введенный в действие с 30 апреля 2022 г. ГОСТ Р 59799-2021 «Умное производство. Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0)» уже содержит в себе понятийный аппарат, связанный с процессами создания ценностей.

## Проблемы и предпосылки цифровой трансформации

Цифровая трансформация создает предпосылки для смены организационных моделей производственных систем массового ручного труда при серийном и крупносерийном производстве к механизированным или высокоавтоматизированным технологическим процессам. В некоторых отраслях производственно-промышленного сектора наблюдается замещение потокового персонала высококвалифицированными кадрами, способными обслуживать автоматизированные сложные технические системы и комплексы. Процессы миграции кадрового потенциала в целом по отрасли или в смежные отраслевые сферы составляет тренд настоящего времени. Однако процессы кадровой миграции влекут за собой кризис в системах управления организационным знанием. Накопленное формальное и неформальное знание о процессах и технологиях составляет ядро организационных систем и позволяет аккумулировать достаточное количество информации для создания базы знаний, обращение к которой повышает эффективность процессов управления изменениями по отношению к внешним вызовам. Следовательно, необходима последовательная политика в вопросах развития корпоративной культуры и восприятия персонала как источника организационного знания, необходимого для интеграции цифровых технологий во всех процессах жизненного цикла производственных систем.

Под влиянием процессов цифровой трансформации существует вероятность, что реставрация унаследованных технологий, элементы которых были в свое время популяризированы и селективно использованы содержательными лидерами в функциональных организационных системах, будут восприняты как современный и эффективный инструмент для достижения целей стратегии экономии на издержках. Образом интересного решения является предложение рассмотреть жизненные циклы производственных систем через бережливую идеологию.

Проблемы интеграции концептов бережливого производства (БП) в технологические процессы и в процессы управления организационными системами обозначились с момента возникновения коллизии между обладателями знаний о технике внедрения бережливой идеологии и лидерами технологических изменений, руководствующимися принципами проектного менеджмента Project Management Body of Knowledge (PMBoK).

Современная методология управления проектами и бережливого производства основана на

базовых принципах, соответствие между которыми приведено в табл. 1.

Вопрос прямого соответствия отдельных принципов, перечисленных в табл. 1, остается дискуссионным, однако следует отметить полное соответствие стандартов в следующих принципах: ориентация на создание ценности для потребителя, оптимизация реакции на риски, адаптация с учетом контекста (ситуационное управление) и встроенное качество.

Исходя из изложенного, предлагается синергетический подход к цифровизации, основанный на базовых принципах бережливого производства и современного проектного менеджмента, в дальнейшем называемый «бережливая цифровизация». Таким образом, под бережливой цифровизацией следует понимать процесс организации выполнения в цифровой среде функций и деятельности (бизнес-процессов), ранее выполнявшихся людьми и организациями без использования цифровых продуктов, основанный на принципах бережливого производства [6] и внедряемый в соответствии с принципами проектного менеджмента [5].

Однако все же существует риск [7] возникновения гетерогенности целеполагания участников процесса интеграции, что может привести к полумерам и размытой результативности внедрения. Некоторые организационные системы пошли по пути стратегии областной интеграции, где был выбран экспериментальный участок создания ценности в производственной системе и проведена работа по изменению локальной корпоративной культуры. Результатами подобного процесса стали внедренные элементы бережливой идеологии [6] и рост визуализированной бюрократизации, формализации процесса. Увеличение целевой и визуальной неопределенности в достижении результатов интеграции бережливой идеологии было выражено в непонимании персоналом полезного эффекта от внедрения, что является следствием локализованного применения, а также игнорирования оперативных инструментов для управления изменениями, таких как Agile, SMART, Scram.

Сложная комплексная задача реализации современных концептов управления изменениями может опираться также на модифицированные

- Таблица 1. Сопоставление базовых принципов
- Table 1. Comparison of basic principles

Принципы бережливого производства в соответствии с ГОСТ Р 56020-2020 [4]	Принципы проектного менеджмента в соответствии с РМВоК 7 [5]
Стратегическая направленность	Способствовать изменениям для достижения предполагаемого будущего. Принимать концепции адаптируемости и устойчивости
Ориентация на создание ценности для потребителя	Фокусироваться на ценности
Организация потока создания ценности для потребителя	Результативно вовлекать заинтересованные стороны
Постоянное улучшение	
Вытягивание	
Сокращение потерь	
Визуализация и прозрачность	
Приоритетное обеспечение безопасности	Оптимизировать реакции на риски. Уметь работать в сложных условиях
Построение корпоративной культуры на основе уважения к человеку	Быть исполнительным, уважительным и заботливым управляющим. Создавать среду, способствующую сотрудничеству между членами команды проекта. Демонстрировать лидерские модели поведения
Встроенное качество	Обеспечивать качество в процессах и поставляемых результатах
Установление долговременных отношений с поставщиками	
Соблюдение стандартов	
Принятие решений, основанных на фактах	Адаптировать с учетом контекста. Распознавать, оценивать взаимодействия в системе и реагировать на них

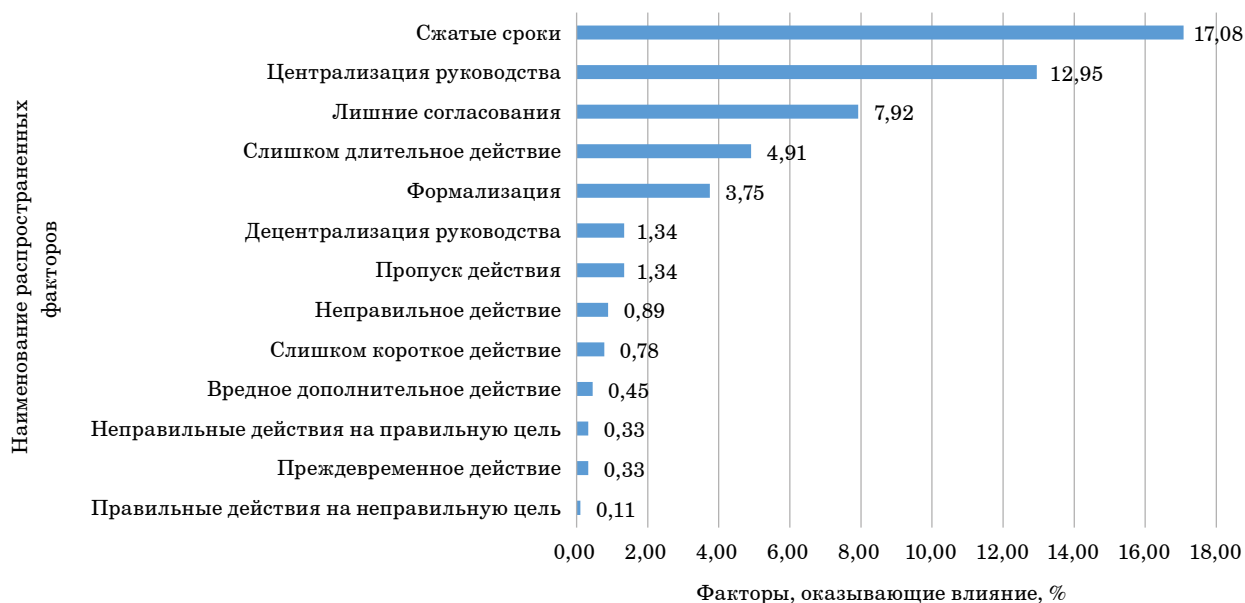


традиционные инструменты, широко себя зарекомендовавшие в практической деятельности и используемые достаточно полно для развертывания новых процессов и усовершенствования текущих – с минимальными затратами, одним из таких инструментов является цикл «PDCA – SDCA». Итеративно используя цикл «PDCA – SDCA» и SMART, возможно достичь синергического эффекта в задачах модернизации технологических процессов или использовать подобные инструменты для контроллинга процессов цифровой трансформации [7] в производственных системах.

Формирование технического задания для процесса управления изменениями, разработка организационно-технологических моделей и подходов к формированию банка инструментов, применяемых на различных этапах жизненного цикла, позволит упорядочить и структурировать данные по издержкам на их развертывание и реализацию. Таким образом, применение бережливой цифровизации можно развернуть на всех этапах жизненного цикла – исследовательском, опытно-конструкторском, предпроизводственном, освоения производства, аттестации, эксплуатации. Поэтому термин «бережливые жизненные циклы» можно рассматривать как комплексную систему для рационализации и управления гибридными производственными процессами, имеющими гетерогенную структуру, включающую в себя как рутинные технологические операции [8], так и творческие процессы научно-прикладного характера.

## Цифровые технологии для бережливых жизненных циклов

Применение цифровых технологий для бережливых жизненных циклов позволит уйти от технологических и документарных аудитов, вызывающих определенную меру недоверия у проверяемого персонала, особенно если процедура проведения внутреннего аудита инициируется соседними структурными подразделениями. Сопrotивление персонала проводимым исследованиям может быть результативно представлено через фальсификацию статистических данных по технологическим процессам, измененным метрикам по выработкам на рабочих местах, соответствующим или не соответствующим стандартам, или внутренним нормативным квотам на производительность и производственную дисциплину. Исследование технологических процессов с помощью традиционных методик аудитов и технологической хронометрии рабочих операций может принять характер непопулярных мер по проведению исследований производственных систем среди как линейного персонала, так и содержательных лидеров организационных систем. На рисунке показаны результаты исследований, полученные путем проведения внутренних аудитов традиционных организационных систем с механистическим вертикальным управлением. Процентное отношение возникающих проблем в технологических процессах напрямую коррелирует с факторами, приведенными на рисунке.



- Факторы, оказывающие влияние на технологические процессы, %
- Factors influencing technological processes, %

Снижение влияния факторов на технологические процессы может быть достигнуто либо разработкой точечных рекомендаций и адресных решений, либо внедрением элементов различных методологий, не исключая проблем, возникающих при их развертывании. Поэтому так необходимо проводить анализ важных проблем и внутренних конфликтов, возникающих при развертывании и реализации основных функ-

ций производственных систем, применяя цикл «PDCA – SDCA».

Проанализирован существующий актуальный перечень проблем, подлежащих рассмотрению для исследования причин частичной реализации элементов бережливых технологий, которые могут возникнуть в процессе создания цифровых бережливых жизненных циклов для производственных систем (табл. 2).

- Таблица 2. Характерные проблемы для организационных систем и решения, предлагаемые различными методологиями
- Table 2. Typical problems for organizational systems and solutions offered by different methodologies

Проблемы	Организация производства	Бережливая идеология	Цифровая трансформация [9]
1. Сложно-структурированное представление о процессе диспетчеризации мощностей производственной системы	Разработка модели расчета загрузки мощностей производственной системы с помощью существующих ресурсов владельцев процесса	Использование технологических аудитов, применение таких инструментов, как хронометрия технологических процессов, диаграмма спагетти, майндмэппинг	Технологии «умного» производства (Smart Manufacturing), компьютерное зрение для хронометрии технологических процессов
2. Отсутствие визуализации процесса контроля закупок от исходящей заявки структурного подразделения от заказчика процесса закупки	Проблема решается путем разработки и внедрения бланка SIPOC и выявления требований заказчика к производителю и заказчика к поставщику через диаграмму решений	Данную проблему также целесообразно решать с помощью введения методов визуализации и карточек Канбан	Рекомендательные системы и интеллектуальные системы поддержки принятия решений, дашборды для подразделений, формирующих заявки на оборудование
3. Чрезмерная централизация и масштабирование административно-управленческого персонала, хроническая ограниченность временного ресурса для организации	Отсутствие системы периодического мониторинга эффективности персонала, аттестационных мероприятий, аудит индивидуального целеполагания	Дополнительный инструмент для выявления интеллектуального потенциала с помощью ментальных карт, формирование KPI для процессов [10]	Дистанционная централизация управленческого персонала посредством применения VR/AR-контента и технологии визуального присутствия, VR-аудиты
4. Увеличенный временной интервал между началом и окончанием базовых и вспомогательных процессов производственной системы	Ошибка этапа планирования жизненного цикла (ЖЦ) может быть решена внедрением в технологию процесса и его документацию рисковых диаграмм, проведением FMEA-анализа и внедрением ГОСТ Р ИСО 31000-2019	SMED, разработка карты потока создания ценности, проведение технологического аудита, пересмотр цифровых квот	Технологии захвата движений в VR/AR и фотограмметрии, математическое моделирование и управление ЖЦ изделия или продукции (Smart Design)
5. Отсутствие видения модели физического протекания технологических операций	Отсутствие систематических аудитов для итерационной актуализации научно-технической документации, характеризующей процессы результативности	Карты стандартных операций, диаграммы спагетти, карты VSM	Цифровые двойники технологических операций, платформенные решения для пользователей: редакторы создания контента и его дистрибуции [11]

- Окончание табл. 2
- End of the table 2

Проблемы	Организация производства	Бережливая идеология	Цифровая трансформация [9]
6. Недостаток информации о практическом применении и морфологии применения инструментов БП, TQM	Единовременное решение проблемы путем однократного вмешательства в функциональную структурную модель с целью навязать еще одну методику работы	Многоуровневый и систематический аудит, итерационное применение методов 5S с целью слияния бережливой идеологии с повседневными рутинными процессами, создающими ценность организации	Использование VR/AR-технологий на промышленных предприятиях, важную роль играет создание универсальных инструментов для создания, редактирования и доставки контента в VR/AR, включая библиотеки шаблонов и цифровых объектов [8]
7. Текущая корпоративная культура управления соответствует индустриальному этапу развития	Сложная императивная иерархическая система производства, основанная на реализации функции и поддержки существования организации на рынке	Продуктовые организационные системы, структурированные по принципам быстрых ЖЦ, ориентированных на реализацию и продвижение собственного производимого продукта с итеративным аудитом создаваемой ценности	Интерфейсы обратной связи и сенсоры для VR/AR, используемые всем персоналом без статусных ограничений, распознавание и синтез речи [12]
8. Неполнота проработки вопросов конструкторско-технологической подготовки производства	Отсутствие или неполнота функциональности существующих моделей диспетчеризации загрузки производственных мощностей при непрогнозируемом ритме запросов рыночной среды, неполнота воздействия существующей системы ERP на основные процессы создания ценности	Предиктивное управление на основе методики ОЕЕ в сочетании с технологией ТРМ и выделение ресурса для команды интеграции, разработанных рекомендаций по улучшению процессов	Семантические корпоративные поисковые системы, классификаторы документов, распознаватели речи и разговорные интеллектуальные агенты. Технологии организации и синхронизации данных
9. Бюрократическое рассогласование требований нормативно-технических документов, регламентирующих деятельность в одной производственной цепочке	Традиционная организация функциональных структур по принципу «борьба департаментов», отсутствие единой политики и механизма актуализации и унификации документации	Нивелирование процессных барьеров путем перемещения административно-управленческого персонала в общее пространство с минимизированными расстояниями друг от друга, по принципу единого офиса	Интерфейсы обратной связи и сенсоры для VR/AR, используемые всем персоналом без статусных ограничений, распознавание и синтез речи. Семантические корпоративные поисковые системы, классификаторы документов
10. Отсутствие восприятия внутренних поставщиков как участников систем ЖЦ	Акцент на внутреннего потребителя означает не только основополагающую роль в деятельности системы, но и получение достоверной информации о нуждах и пожеланиях потребителя, что позволит увеличить производственные мощности на этапах ЖЦ, создающих ценность	Максимально упростить форму для создания записей по визуализации процесса потока создания ценности, включающего в себя всех участников ЖЦ	Технологии обеспечения целостности и непротиворечивости данных (консенсус)

## Заключение

Таким образом, переход к цифровой трансформации позволит реставрировать процессы интеграции бережливой идеологии в жизненные циклы производственных систем. Разработка необходимых моделей и систем, основанных на цифровой трансформации, выведет производственные системы на новый качественный уровень управления результативностью. Создание дистанционных систем для диспетчеризации и постоянного мониторинга хода технологического процесса будет предпосылкой для формирования банка знаний для управления изменениями в технологических процессах для корректировки конструкторской документации, после полученных рекламаций или требований о лучшем качестве от потребителей. Процессы исследований и опытно-конструкторские работы при внедренных цифровых бережливых жизненных циклах позволят оперативно реагировать на изменения рынка и перевести условные серийные производ-

ственные системы к крупно-индивидуальным заказам. Цифровые технологии позволят отказаться от ГОСТ 2.116 «Карта технического уровня», итеративно используемого в начале развертывания жизненных циклов производственных систем и в конце жизненного цикла продукта в принятии решений о выводе продукта с рынка. Перевод требований ГОСТ 2.116 к цифровым платформам и информационной интеграции с банком данных Федерального института промышленной собственности позволит увеличить результативность процессов анализа технической новизны и практической значимости разрабатываемого или уже производимого изделия.

Переход к процессам цифрового качества, к цифровым процессам мониторинга технологических операций – это новые решения для новой цифровой экономики, и настоящая статья может стать удобным методическим материалом в процессах принятия решений о внедрении бережливой цифровизации в жизненные циклы производственных систем.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Приказ Минкомсвязи России от 01.08.2018 г. № 428 «Об утверждении Разъяснений (методических рекомендаций) по разработке региональных проектов в рамках федеральных проектов национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minkomsvyazi-Rossii-ot-01.08.2018-N-428/> (дата обращения: 07.03.2022).
2. Цифровая экономика РФ. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 2021. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/> (дата обращения: 07.03.2022).
3. Benchmarks and Assessments / The Standish Group. URL: <https://www.standishgroup.com/benchmark> (дата обращения: 07.03.2022).
4. ГОСТ Р 56020-2020. Бережливое производство. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2021. 20 с.
5. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK®). 7-е изд. / Project Management Institute, Inc. Pennsylvania. USA: Project Management Institute, Inc., 2021. 496 с.
6. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.
7. ГОСТ Р 56404–2021. Бережливое производство. Требования к системам менеджмента. М.: Стандартинформ, 2021. 20 с.
8. Гусева Л. И., Винниченко А. В. Внедрение системы LEAN в изготовление блока управления вычислением и отображением // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Междунар. форум. 2020. С. 125–127.
9. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты: докл. к XXII Апрельской Междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. М., 13–30 апр. 2021 г. / Г. И. Абдрахманова [и др.]; рук. авт. кол. П. Б. Рудник; науч. ред. Л. М. Гохберг, П. Б. Рудник, К. О. Вишневецкий, Т. С. Зинина; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 239 с.
10. Стовец Ю. В., Балашов В. М. Алгоритмы и средства создания компетентностных моделей специалиста технического профиля // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Вторая Всерос. науч. конф. СПб., 2021. С. 229–232.
11. Пономарев К. С., Феофанов А. Н., Гришина Т. Г. Стратегия цифрового двойника производства как метод цифровой трансформации предприятия // Вестн. современных технологий. 2019. № 4 (16). С. 23–30.
12. Казадио Д. Ф., Чабаненко А. В. Цифровизация и Индустрия 4.0: перспективы и вызовы // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Материалы III Междунар. форума в рамках празднования 80-летия С.-петерб. гос. ун-та аэрокосм. приборостроения, 300-летия Российской академии наук / под ред. В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2021. С. 389–390.

## REFERENCES

1. Order of the Ministry of Telecom and Mass Communications of Russia dated August 1, 2018, no. 428 «On approval of Clarifications (guidelines) on the development of regional projects within the framework of federal projects of the national program “Digital Economy of the Russian Federation”». Available from: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minkomsvyazi-Rossii-ot-08/01/2018-N-428/> [Accessed 03 July 2022].
2. Digital economy of the Russian Federation. Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation, 2021. Available from: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/> [Accessed 03 July 2022].
3. Benchmarks and Assessments / The Standing Group. Available from: <https://www.standishgroup.com/benchmark> [Accessed 03 July 2022].
4. GOST R 56020-2020. Lean. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standartinform; 2021. 20 p. (In Russ.).
5. Guide to the Body of Knowledge in Project Management (PMBOK® Guide). 7<sup>th</sup> ed. / Project Management Institute, Inc. Pennsylvania. USA: Project Management Institute, Inc.; 2021. 496 p.
6. GOST R ISO 31000-2019. Risk management. Principles and leadership. Moscow: Standartinform; 2020. 19 p. (In Russ.).
7. GOST R 56404-2021. Lean. Requirements for management systems. Moscow: Standartinform; 2021. 20 p. (In Russ.).
8. Guseva L. I., Vinnichenko A. V. Implementation of the LEAN system in the manufacture of a control unit for computing and display. Metrological support of innovative technologies. International forum; 2020, pp. 125–127. (In Russ.).
9. Abdrakhmanova G. I., Bykhovsky K. B., Veselitskaya N. N. et al. Digital transformation of industries: starting conditions and priorities: dokl. to XXII April International. scientific conf. on problems of economic and social development. Moscow, April 13–30. 2021; eds by P. B. Rudnik; scientific ed. L. M. Gokhberg, P. B. Rudnik, K. O. Vishnevsky, T. S. Zinina; National research University «Higher School of Economics». Moscow: Ed. house of the Higher School of Economics; 2021. 239 p. (In Russ.).
10. Stovpets Yu. V., Balashov V. M. Algorithms and tools for creating competence models for a technical specialist. Modeling and situational management of the quality of complex systems: Second All-Russian. scientific conf. SPb.; 2021, pp. 229–232. (In Russ.).
11. Ponomarev K. S., Feofanov A. N., Grishina T. G. The strategy of the digital twin of production as a method of digital transformation of the enterprise. Bulletin modern technologies. 2019;(4(16)):23–30. (In Russ.).
12. Kazadio D., Chabanenko A. V. Digitalization and Industry 4.0: prospects and challenges // Metrological support of innovative technologies: Proceedings of the III International forum as part of the celebration of the 80<sup>th</sup> anniversary of St. Petersburg. state un-ta aerospace. instrument making, 300<sup>th</sup> anniversary of the Russian Academy of Sciences; eds by V. V. Okrepilov. SPb.: SUAI; 2021, pp. 389–390. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Назаревич Станислав Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – повышение эффективности функционирования научно-производственных систем.

**Тушавин Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством процессов информационного обеспечения наукоемкого производства.

**Фролова Елена Александровна**, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой инно-

**Nazarevich Stanislav A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – improving the efficiency of the functioning of scientific and production systems.

**Tushavin Vladimir A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management of information support processes for science-intensive production.

**Frolova Elena A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Assistant Professor, Professor, Head of the Department,

ватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы управления качеством сложных технических систем.

Поступила в редакцию 09.07.2022

Поступила после рецензирования 18.08.2022

Принята к публикации 15.09.2022

the Chair of Innovatics and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods of quality management of complex technical systems.

Received 09.07.2022

Revised 18.08.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья

УДК 621.389:681.121.89.082.4

## Исследование метрологических характеристик инновационного ультразвукового плотномера газа Turbo Flow UDM

Роман Игоревич Соломичев<sup>1</sup>

✉ sktb\_solomichev@turbo-don.ru, orcid.org/0000-0003-1833-4108

Светлана Викторовна Соломичева<sup>1</sup>

sktb\_razvitie2@turbo-don.ru

<sup>1</sup> Научно-производственное объединение «Турбулентность-ДОН», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрена проблема измерения расхода газа на узлах учета средней и малой производительности, а именно: из-за динамически меняющегося компонентного состава газа, вследствие смешивания газа из различных месторождений, возникает несоответствие периодически вносимого в вычислитель расходомера компонентного состава и реального состава газа в трубопроводе. Согласно последним техническим требованиям, узлы учета газа должны выполнять функции автоматического определения компонентного состава газа и плотности газа при стандартных условиях. Это приводит к значительному удорожанию строительства новых и реконструкции существующих узлов учета. В статье описаны модификации разработанного инновационного измерителя плотности газа Turbo Flow UDM, а также акустический метод измерения плотности, положенный в его основу. В основе лежит измерение скорости звука ультразвуковым преобразователем расхода газа и ее пересчет при известных температуре и давлении в значение плотности газа в зависимости от концентрации компонентов газовой смеси. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований рассчитаны погрешности, вносимые в результат измерения плотности газа от влияющих входных величин – температуры, давления и скорости звука в газе.

Экспериментальным путем установлены погрешности определения компонентного состава природного газа с помощью разработанного акустического метода, реализованного в исследуемом плотномере в условиях подконтрольной эксплуатации на узле учета газа. Относительная погрешность определения основного компонента природного газа – метана, в сравнении с показаниями хроматографического анализа предварительно отобранных проб газа, – составляет не более 0,26 % за временной период 2 месяца. При этом относительная погрешность определения плотности газа, приведенная к стандартным условиям за этот же период, не превышает 0,176 %.

**Ключевые слова:** скорость звука, плотность газа, ультразвуковой плотномер, природный газ, компонентный состав, относительная погрешность

**Для цитирования:** Соломичев Р. И., Соломичева С. В. Исследование метрологических характеристик инновационного ультразвукового плотномера газа Turbo Flow UDM // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 54–64.

Original article

## Metrological characteristics investigation of innovative ultrasonic gas density meter Turbo Flow UDM

Roman I. Solomichev<sup>1</sup>

✉ sktb\_solomichev@turbo-don.ru, orcid.org/0000-0003-1833-4108

Svetlana V. Solomicheva<sup>1</sup>

sktb\_razvitie2@turbo-don.ru,

<sup>1</sup> Limited Liability Company Scientific and Production Association «Turbulentnost-DON», Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract.** The gas flow measurement problem at metering stations of medium and low productivity is considered, namely: due to the dynamically changing gas component composition, due to the gas mixing from various fields, there is a discrepancy between the component composition periodically entered into the flowmeter computer and the actual gas composition in the pipeline. According to the latest technical requirements, gas metering units must perform the functions of automatically determining the gas composition and gas density under standard conditions. This leads to a significant increase in the cost of building new and reconstructing existing metering stations. The article describes the modifications of the developed innovative gas density meter Turbo Flow UDM, as well as the acoustic method of density measurement, which is its basis. It is based on the measurement of the sound speed with an ultrasonic gas flow transducer and its conversion at known temperature and pressure into the value of the gas density depending on the gas mixture components concentration. As a result of theoretical and experimental studies, the errors introduced into the result of measuring the gas density from the influencing input quantities – temperature, pressure and sound velocity in the gas – are calculated.

The errors in determining the component composition of natural gas were experimentally established using the developed acoustic method implemented in the density meter under study under controlled operation conditions at the gas metering unit. The relative error in determining the main component of natural gas – methane, in comparison with the readings of the chromatographic analysis

of pre-selected gas samples – is no more than 0.26 % over a time period of 2 months. In this case, the relative error in determining the gas density, reduced to standard conditions for the same period, does not exceed 0.176 %.

**Keywords:** sound speed, gas density, ultrasonic density meter, natural gas, component composition, relative error

**For citation:** Solomichev R. I., Solomicheva S. V. Metrological characteristics investigation of innovative ultrasonic gas density meter Turbo Flow UDM. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):54–64. (In Russ.).

## Введение

Потребность в поточных плотномерах при организации системы количественного учета (по массе) энергоносителей при их транспортировании, приемке, хранении и отпуске с каждым годом только растет. Причем зачастую массу вещества невозможно измерить непосредственным взвешиванием на весах, и ее приходится определять по результатам измерений объема и плотности.

При организации системы количественного учета природного газа, а также для вычисления объемного расхода газа, приведенного к стандартным условиям, обычно применяют один из следующих методов (по ГОСТ 8.611-2013, п. 6.3.1 [1]):

– рTZ-пересчет (является действующим методом, который реализован во всех существующих расходомерах газа). Применяется к газам, для которых имеются данные о коэффициенте сжимаемости, рассчитываемом на основе известного компонентного состава газа:

$$q_C = q_V \frac{1}{K_{СЖ}} \frac{T_C}{p_C} \frac{p}{T}, \quad (1)$$

где  $q_C$  – объемный расход газа, приведенный к стандартным условиям (при 20 °С и 0,101325 МПа), м<sup>3</sup>/ч;  $q_V$  – объемный расход газа при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/ч;  $K_{СЖ} = Z/Z_C$  – коэффициент сжимаемости, рассчитанный на основе факторов сжимаемости газовой смеси;  $p, p_C$  – давление газа в рабочих и стандартных условиях соответственно, Па;  $T, T_C$  – температура газа в рабочих и стандартных условиях соответственно, К;

– ρ-пересчет (по плотности газа). Применяется к газам, для которых отсутствуют данные о коэффициенте сжимаемости (компонентном составе), или точность существующих расчетных методов не удовлетворяет требованиям ГОСТ:

$$q_C = q_V \frac{\rho}{\rho_C}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность газа при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_C$  – плотность газа, приведенная к стандартным условиям, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно СТО Газпром 5.37-2011 [2], узлы учета газа классов А, Б и В должны выполнять функ-

ции автоматического определения компонентного состава газа и плотности газа при стандартных условиях. На данный момент не все узлы измерения соответствуют данному требованию, следовательно, плановое строительство новых и модернизация существующих узлов потребует серьезных материальных вложений на оснащение системами измерения физико-химических параметров (ФХП) газа.

Тем не менее на узлах измерения малой пропускной способности в газотранспортных организациях внедрение подобных систем происходит недостаточно интенсивно, что вызвано в основном дороговизной автоматических потоковых хроматографов и экономической нецелесообразностью их применения для подобных узлов измерения. В данном случае применяются измерительные приборы, предназначенные для проведения дискретных или лабораторных измерений ранее отобранных проб газа [3] (с периодичностью один раз в две недели). Данные лабораторного анализа по системам телеметрии передаются в вычислительные блоки расходомеров по узлам измерения расхода, которые приводят расход газа из рабочих к стандартным условиям.

Из-за динамического изменения компонентного состава (плотности) газа и несвоевременного его внесения в вычислительный блок расходомера формируется погрешность измерения расхода газа. В качестве хорошей альтернативы дорогостоящим автоматическим потоковым хроматографам и лабораторным методам анализа выступает метод «ρ-пересчета». В этой связи разработке и исследованию новых принципов измерения плотности, созданию конструкций плотномеров, основанных на этих принципах, освоению и расширению промышленного производства плотномеров, удешевлению их стоимости уделяется все больше внимания [4, 5].

С другой стороны, исходя из проведенного обзора существующих отечественных плотномеров, которые могут производить потоковую оценку плотности природного газа, необходимо отметить, что их погрешность зачастую не соответствует установленным требованиям ГОСТ 8.611-2013 [1], чего нельзя сказать о зарубежных средствах измерения, которые более полно удовлетворяют требованиям подобных систем. Кроме того, существующие плотномеры газа способны измерять только одно значение плотности – при рабочих



условиях (функция в основном всех плотномеров различных производителей) или плотность, приведенную к стандартным условиям (лишь несколько производителей подобных плотномеров). Однако приборы зарубежных производителей не всегда доступны по причине высокой цены и дорогостоящего обслуживания или экономических преднамеренных мероприятий запретительного характера со стороны иных государств.

### Цель и задачи исследования

Целью исследования является определение метрологических характеристик инновационных ультразвуковых плотномеров газа серии Turbo Flow UDM при измерении плотности газа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) определить коэффициенты влияния входных величин – температуры, давления и скорости звука – на выходное значение плотности;

2) провести испытания расходомера в условиях эксплуатации на подконтрольном узле измерения с последующим анализом метрологических характеристик определения плотности природного газа и оценки погрешности определения компонентного состава газа с использованием разработанной расчетной методики.

### Результаты исследования

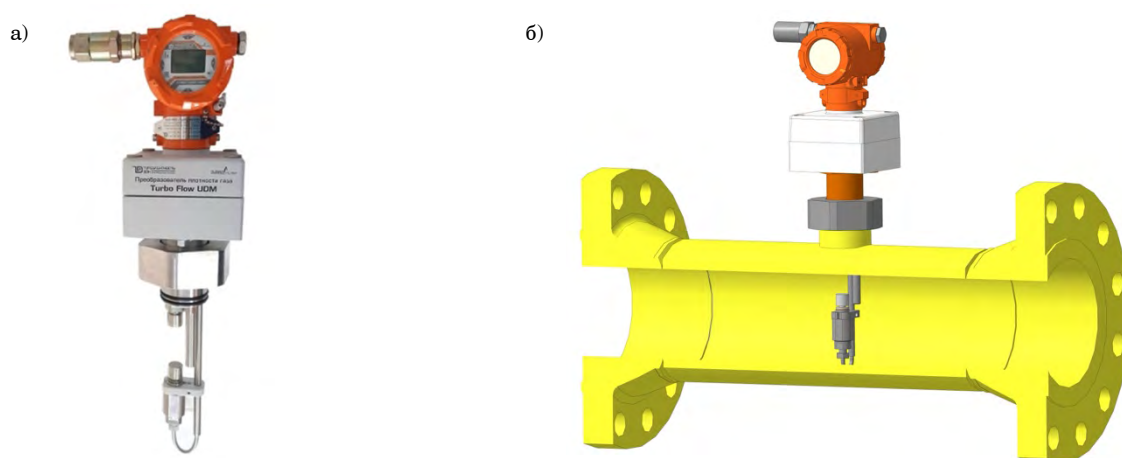
В конструкторском бюро Научно-производственного объединения «Турбулентность-ДОН» (г. Ростов-на-Дону, Россия) разработан и испытан потоковый измеритель плотности газа серии

Turbo Flow UDM (Ultrasonic Density Meter), основанный на ультразвуковом принципе измерения. Конструкция прибора предполагает несколько различных исполнений по способу установки в газовый трубопровод: врезной – модификация UDM-I (рис. 1) и байпасный – UDM-B (рис. 2).

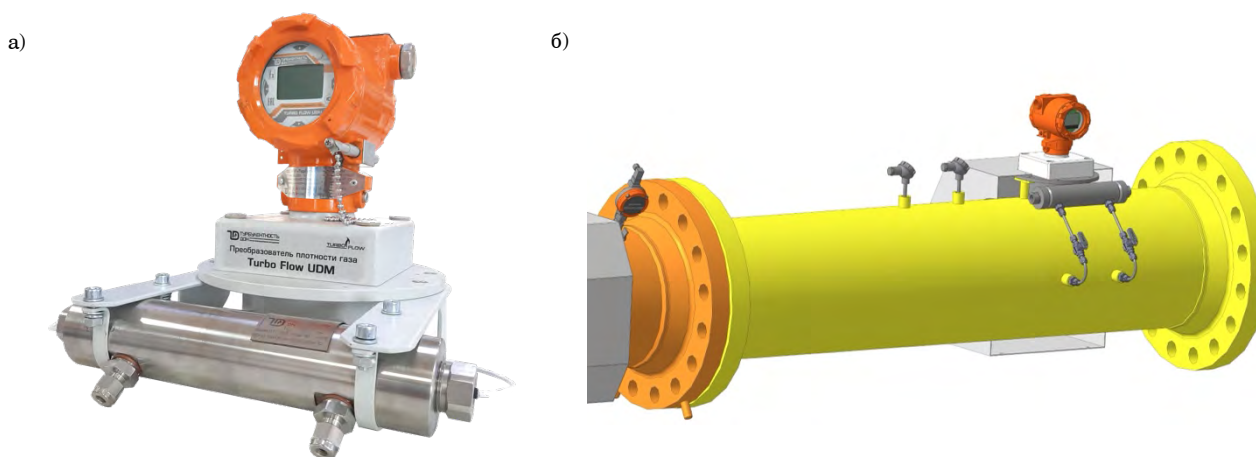
Модификация плотномера UDM-I предполагает установку чувствительных элементов – ультразвуковых (УЗ) преобразователей – непосредственно в газовый поток, а именно – перпендикулярно его направлению на прямолинейном участке трубопровода после УЗ-расходомера (в случае совместного использования) или при его установке в сосуды хранения газа. В данном случае разница времен распространения зондирующих УЗ-колебаний от первого приемопередатчика ко второму и наоборот равна нулю, т. е. прибор измеряет только скорость звука в среде и практически не зависит от скорости ее потока. В состав прибора входят встроенный преобразователь температуры и внешний преобразователь давления, что делает его независимым средством измерения.

Модификация UDM-I имеет несколько исполнений: «S» – для инертных и углеводородных газов, не агрессивных к материалу первичного преобразователя; «Н» – для дымовых газов.

Измеритель плотности по способу установки «закрытый байпас» (исполнение UDM-B) состоит из измерительной камеры, к которой газ подводится и отводится посредством импульсных трубок, соединенных с трубопроводом. В измерительной камере вдоль прохождения газового потока расположены два УЗ-приемопередатчика. Ввиду малого объема измерительной камеры и сечения импульсных трубок, скорость потока газа, проходящего через байпас, незначительна, даже при максимальной скорости потока через



• Рис. 1. Потоковый измеритель плотности газа, модификация UDM-I (а), и способ его установки на трубопроводе (б)  
 • Fig. 1. Gas flow density meter, modification UDM-I (а), and method of its installation on the pipeline (б)



• *Рис. 2. Поточный измеритель плотности газа, модификация UDM-B (а), и способ его установки на трубопроводе (б)*  
 • *Fig. 2. Gas flow density meter, modification UDM-B (a), and method of its installation on the pipeline (б)*

основное сечение трубопровода. Поэтому влияние на измерение скорости звука в камере будет минимальным. В состав прибора входят внешние преобразователи температуры и давления. Для минимизации влияния температуры окружающей среды на измерение скорости звука камера покрывается защитным кожухом с термоизоляцией. Метрологические и технические характеристики потоковых УЗ-плотномеров газа серии UDM приведены в табл. 1; 2.

Для измерения непосредственно скорости звука применен время-импульсный метод, основанный на измерении времени распространения УЗ-волн в контролируемой среде в зависимости от изменения ее плотности. Зондирующие импульсы пропускаются через среду с определенным периодом  $T$

с помощью УЗ-передатчика и принимают эхо-импульсы приемником. Импульсы запуска устанавливаются в логическую единицу измерительный триггер, который разрешает работу измерителя временных интервалов. Эхо-импульс после усиления и преобразования в цифровой вид сбрасывает в ноль измерительный триггер, в результате чего на выходе формируется импульс длительностью  $t$ . Цифровой код, пропорциональный длительности импульса, поступает в блок обработки, где вычисляется скорость звука в среде, а затем плотность газа с учетом температуры и давления.

Вычислительный модуль блока электроники плотномеров разработан на основе высокопроизводительных контроллеров, позволяющих производить измерения плотности газа в режиме

• *Таблица 1. Метрологические характеристики потоковых плотномеров серии UDM*  
 • *Table 1. Metrological characteristics of UDM series flow densitometers*

Характеристика	Значение
Модификации	UDM-B, UDM-I исполнение «S»
Диапазоны измерений плотности газа в рабочих условиях, кг/м <sup>3</sup>	1) от 0,14 до 350,00*; 2) от 0,42 до 350,00
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений плотности газа в рабочих условиях, %	(±0,3); (±0,5) во всем диапазоне измерений плотности газа 1; (±0,14)** только в поддиапазоне измерений плотности газа 2
Пределы допускаемой относительной погрешности результата измерений плотности газа, приведенной от условий измерений к стандартным условиям, %	(±(X+0,1)), где X – пределы допускаемой относительной погрешности измерений плотности газа в рабочих условиях, %

\* – максимальный диапазон измерений плотности газа; для конкретного преобразователя плотности диапазон измерений, не превышающий максимального, указывается в паспорте;

\*\* – при условии измерений:

а) температуры газа с абсолютной погрешностью, °C, не хуже  $(\pm(0,15 + 0,002)|t|)$ , где  $t$  – измеренное значение температуры газа, °C;

б) давления газа с относительной погрешностью, %, не хуже  $((\pm 0,1 + 0,01)P_{\max}/P)$  при  $P_{\max}/P \leq 3$ , где  $P$  – измеренное значение давления газа, МПа;  $P_{\max}$  – верхний предел измерений используемого средства измерения давления, МПа.

• Таблица 2. Основные технические характеристики плотномеров UDM  
 • Table 2. Main technical characteristics of UDM densitometers

Характеристика	Значение		
	UDM-B	UDM-I, исполнение «S»	UDM-I, исполнение «H»
Диапазон выходного токового сигнала, мА	От 4 до 20		
Цифровые проводные интерфейсы	Протокол HART, протокол MODBUS RTU. По интерфейсам RS-232, RS-232 TTL и RS-485		
Цифровые беспроводные интерфейсы	GSM, GPRS, Bluetooth		
Маркировка взрывозащиты	1Ex db ma [ia Ga] IIC T4 Gb		
Потребляемая мощность, Вт, не более	10		
Средняя наработка до отказа, ч, не менее	70 000		
Средний срок службы, лет	12		
<b>Условия эксплуатации</b>			
Измеряемая среда	Газы, не агрессивные к материалу первичного преобразователя		
Диапазон температуры измеряемой среды, °С, исполнения: T1 T2 T3 T4	От -40 до +70 От -60 до +70 - -	- - От -40 до +260 От -40 до +450	
Максимальное рабочее давление измеряемой среды, МПа, не более	32		0,14
Параметры окружающего воздуха: температура окружающего воздуха, °С относительная влажность воздуха, % атмосферное давление, кПа	От -50 до +80 До 95 От 84,0 до 106,7		
Скорость потока газа, м/с, не более	65	40	120
Напряжение питания, В	От 12 до 24		

Примечание: без учета дополнительной массы соединительного фланца, гайки или штуцера (определяется заказом).

реального времени. Наряду с высокой чувствительностью и низкой относительной погрешностью измерения плотности газа, необходимо отметить следующие преимущества разработанных ультразвуковых потоковых плотномеров UDM:

- возможность измерения плотности в рабочих условиях с приведением ее к стандартным условиям;
- наличие функции оценки компонентного состава анализируемого газа;
- наличие функции оценки теплотворной способности углеводородных газов;
- возможность измерения плотности как природного, так и свободного нефтяного газа, а также технически важных газов.

Использование плотномера серии UDM в системе с ультразвуковыми измерителями расхода газа Turbo Flow UFG дает возможность реализации функции  $\rho$ -пересчета измеренного объемного

расхода в массовый согласно ГОСТ 8.611-2013, а также при приведении расхода (объема) газа к стандартным условиям, при этом данный измерительный комплекс способен осуществлять динамический учет изменения физико-химических показателей газа в режиме реального времени. Кроме того, нужно отметить следующие преимущества от использования данной системы:

- непрерывное ведение часовых/суточных архивов измеряемых параметров потока газа;
- исключение условно-постоянных значений в расчетах;
- непрерывное измерение теплофизических параметров газовой смеси;
- возможность автоматического изменения метода расчета, если имеется выход за пределы применимости методов;
- исключение ошибок ввода данных;
- снижение стоимости модернизации существующих узлов измерения расхода газа, когда

использование потоковых хроматографов экономически нецелесообразно;

– возможность дооснащения плотномерами существующих узлов учета газа, которые оборудованы расходомерами серии Turbo Flow UFG.

Такой акустический измеритель представляет интерес для практических приложений, только если он в состоянии реализовать измерения с высокой точностью, т. е. относительная погрешность измерений параметров должна быть не выше нескольких десятых долей процента [6].

На рис. 3 приведена классификация погрешностей измерения плотности газа УЗ-методом, которая состоит из систематической и случайной составляющей [7].

Если случайные погрешности обычно исключаются при помощи математического аппарата путем полной или частичной компенсации, то систематическая погрешность определяется погрешностями измерительных каналов входных величин, участвующих в расчете плотности газа: скорости

звука, температуры, давления. Для определения суммарной систематической погрешности измерения плотности от нескольких влияющих величин необходимо установить коэффициенты влияния при входных величинах, используя основное уравнение измерений плотности газа:

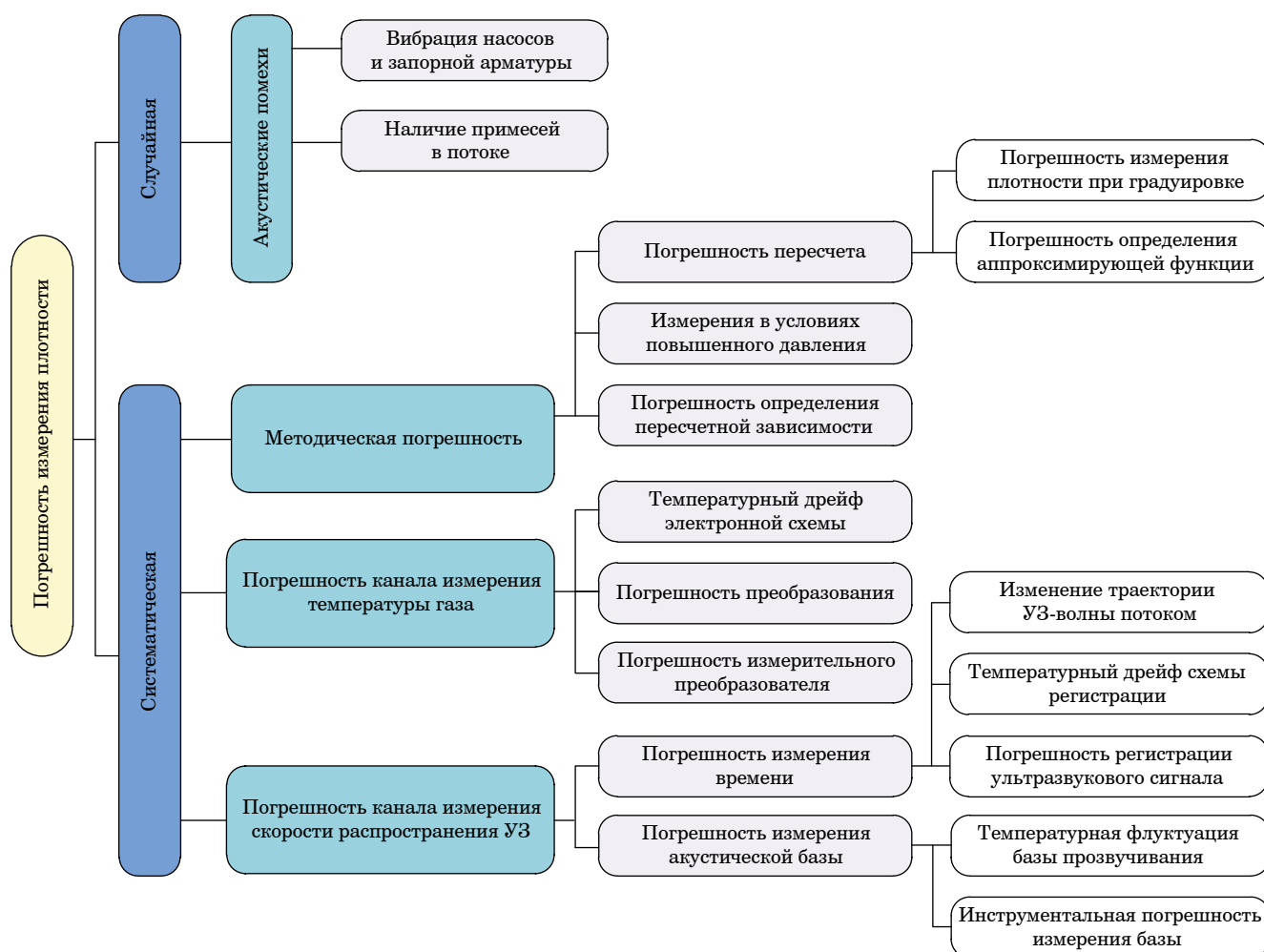
$$\rho = \frac{\gamma P}{V_{зв}^2 K_{СЖ}}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $\gamma = C_p/C_v$ ;  $C_p$ ,  $C_v$  – изобарная и изохорная теплоемкости соответственно, Дж/(г·К);  $P$  – абсолютное давление газа, Па;  $V_{зв}$  – скорость звука в газе, м/с;  $K_{СЖ}$  – коэффициент сжимаемости газа.

Запишем коэффициенты влияния, продифференцировав уравнение (3):

– для скорости звука:

$$\frac{d}{dV_{зв}} \rho = -\frac{2C_p P}{C_v V_{зв}^3 K_{СЖ}}; \quad (4)$$



• Рис. 3. Классификация погрешностей измерения плотности  
 • Fig. 3. Classification of density measurement errors

– для давления:

$$\frac{d}{dP} \rho = \frac{C_P}{C_V V_{зв}^2 K_{СЖ}}; \quad (5)$$

– для показателя адиабаты:

$$\frac{d}{d\gamma} \rho = \frac{P}{V_{зв}^2 K_{СЖ}}; \quad (6)$$

– для коэффициента сжимаемости:

$$\frac{d}{dK_{СЖ}} \rho = -\frac{C_P P}{C_V V_{зв}^2 K_{СЖ}^2}. \quad (7)$$

Расчет абсолютных значений коэффициентов влияния согласно формулам (4)–(7) сведен в табл. 3 для различных газов при стандартных условиях (20 °С, 0,101325 МПа).

Влияние погрешности измерения входных величин на результат измерения плотности газа:

– для скорости звука:

$$\Delta \rho_{V_{зв}} = \frac{d\rho}{dV_{зв}} \Delta V_{зв}, \text{ кг/м}^3, \quad (8)$$

или

$$\delta \rho_{V_{зв}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho_{V_{зв}}}{\rho} 100\right)^2}, \text{ \%},$$

где  $\Delta V_{зв} = \delta_{V_{зв}} V_{зв}$ ,  $\delta_{V_{зв}} = 0,03 \%$ ;

– для давления газа:

$$\Delta \rho_P = \frac{d\rho}{dP} \Delta P, \text{ кг/м}^3, \quad (9)$$

или

$$\delta \rho_P = \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho_P}{\rho} 100\right)^2}, \text{ \%},$$

где  $\Delta P = \delta_P P$ ,  $\delta_P = 0,1 \%$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Влияние погрешности измерения температуры ( $\Delta T = (0,15 + 0,002|t|)$  °С) на результат измерения плотности газа  $\delta_{\rho_T}$  ввиду ее затруднительного выведения теоретическим путем, оценивалось экспериментально для различных газов (для значений плотности при стандартной температуре 20 °С и смещенной на величину  $T + \Delta T = 20,19$  °С (табл. 5).

- Таблица 3. К расчету коэффициентов влияния для различных газов
- Table 3. To the calculation of the influence coefficients for various gases

Газ	$\gamma$	$V_{зв}$ , м/с	$K_{СЖ}$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{d\rho}{dV_{зв}}$ , [ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ]	$\frac{d\rho}{dP}$ , [ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{Па}$ ]	$\frac{d\rho}{d\gamma}$ , [ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{ед.}$ ]	$\frac{d\rho}{dK_{СЖ}}$ , [ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{ед.}$ ]
Аргон	1,6685	318,970	0,99934	1,6627	-0,0104	16,4102	0,9966	-1,6639
Азот	1,4011	349,110	0,99976	1,1651	-0,0067	11,4987	0,8316	-1,1654
Метан	1,30587	445,007	0,99814	0,6694	-0,0030	6,6189	0,5126	-0,6719
Гелий	1,6674	1007,899	1,00048	0,1662	-0,0003	1,6406	0,0997	-0,1662

- Таблица 4. Определение численных значений вкладов от погрешностей измерения входных величин
- Table 4. The numerical values determination of the contributions from the input quantities measurement errors

Газ	$V_{зв}$			$P$		
	$\Delta V_{зв}$ , м/с	$\Delta \rho_{V_{зв}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta \rho_{V_{зв}}$ , %	$\Delta P$ , МПа	$\Delta \rho_P$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta \rho_P$ , %
Аргон	0,095691	-0,001	0,06	0,000101	0,00166	0,10
Азот	0,104733	-0,0007			0,00116	
Метан	0,133502	-0,0004			0,00067	
Гелий	0,30237	-0,0001			0,00017	

- Таблица 5. Влияние погрешности измерения температуры на результат измерения плотности газа
- Table 5. Influence of temperature measurement error on the gas density measurement result

Газ	$T = 20$ °С		
	$\Delta T$ , °С	$\Delta \rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta \rho_T$ , %
Аргон	0,19	-0,00085	0,051
Азот		-0,00059	
Метан		-0,00034	
Гелий		-0,00085	

Таким образом, суммарная систематическая погрешность измерения плотности газа в зависимости от влияния погрешностей измерительных каналов входных величин определяется как:

$$\delta_{\rho} = 1,1\sqrt{\delta\rho_{V_{зв}}^2 + \delta\rho_P^2 + \delta\rho_T^2} = 0,14 \%. \quad (10)$$

Разработанный конструкторским бюро Научно-производственного объединения «Турбулентность-ДОН» метод определения плотности природного газа по измеренной скорости звука также позволяет оценить концентрации таких компонентов углеводородной газовой смеси, как метан (CH<sub>4</sub>), этан (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), бутаны (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), пентаны (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>), гексан (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>), азот (N<sub>2</sub>) и углекислый газ (CO<sub>2</sub>). При этом сделано только одно допущение, что инертные газы (гелий, аргон) имеют незначительные концентрации и представлены в сумме с азотом.

Согласно алгоритму расчета, сначала по измеренной скорости звука в газе при рабочих условиях ( $T = T_{раб}$ ,  $P = P_{раб}$ ) вычисляется концентрация метана. Далее вычисляется скорость звука для стандартных условий, на основе которой происходит определение остальных концентраций компонентов газовой смеси (рис. 4). В рамках данной методики расчета получена зависимость концентрации основного компонента – метана  $C_{CH_4}$ , мол.% от скорости звука  $V_{зв.раб}$ , м/с, в газовой смеси с учетом влияния температуры  $T_{раб}$ , °C, и давления  $P_{раб}$ , МПа. Далее вычисляется скорость звука, приведенная стандартным условиям  $V_{зв.с.у}$  м/с, на основе которой рассчитываются концентрации остальных компонентов смеси.

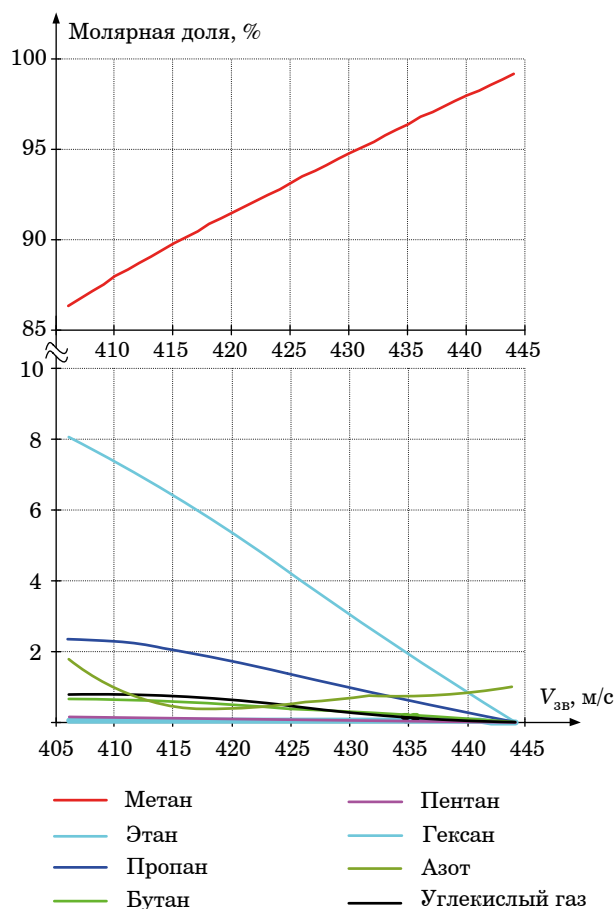
Расчетные соотношения для определения компонентного состава хорошо согласуются со значительным объемом экспериментальных данных, в том числе на основе паспортов качества газа Публичного акционерного общества «Газпром» на различные составы природного газа для концентраций по метану от 87 до 99 %.

В условиях реальной эксплуатации плотномеров газа Turbo Flow UDM на протяжении более 18 месяцев на подконтрольном узле измерения расхода газа (Газораспределительный пункт № 136, г. Ростов-на-Дону, Россия) получен значительный объем экспериментальных данных по части измерений ФХП газа. Произведено вычисление относительной погрешности определения состава газовой смеси покомпонентно при сравнении данных, полученных путем непосредственного поточного измерения с помощью разработанного плотмера, и данных, полученных путем лабораторного хроматографического анализа предварительно отобранных проб газа.

Для наглядности на рис. 5 показаны графические зависимости относительной погрешности определения компонентного состава за два месяца. Расчетный период – семь дней – выбран с учетом предоставления еженедельных данных хроматографического анализа газа лабораторией Ростовского линейного производственного управления магистральных газопроводов (ЛПУ МГ). При этом время отбора проб (каждый понедельник в 10:00) синхронизирован с выборкой из архивных данных измерителя плотности.

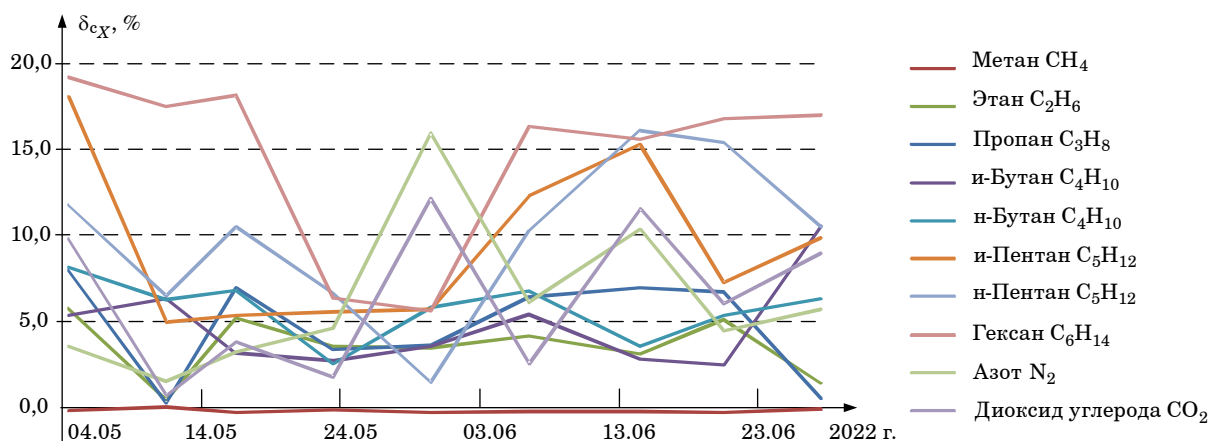
На рис. 6 показана графическая диаграмма распределения относительной погрешности концентрации компонентов газовой смеси, которые определяются по разработанной методике, реализованной в измерителях плотности Turbo Flow UDM. Среднее значение отклонения измеренной концентрации метана – основного компонента природного газа – от паспортного (полученного хроматографическим анализом) – составило не более 0,26 %.

На рис. 7, а приведен график изменения плотности газа, приведенной к стандартным условиям,

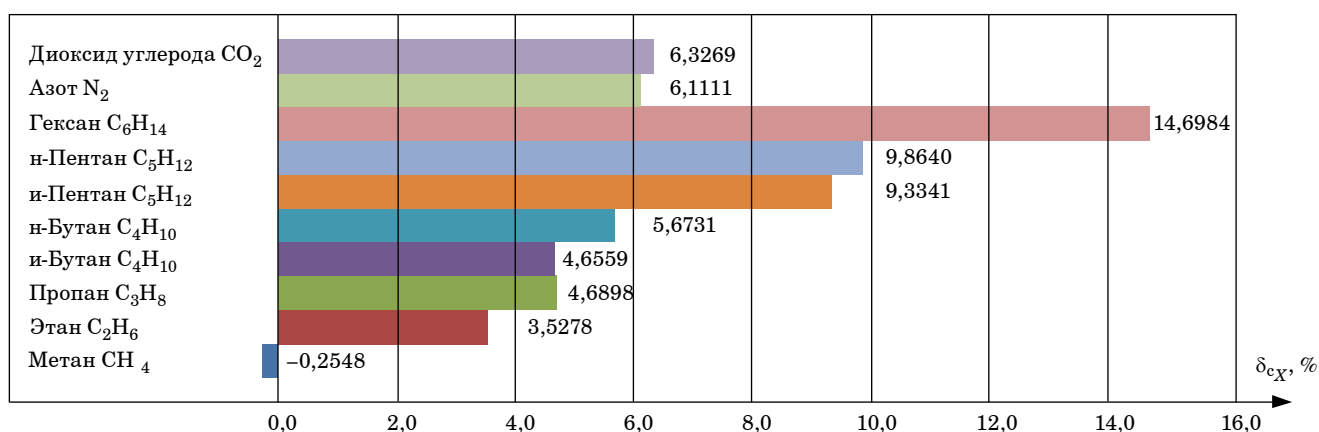


• Рис. 4. Зависимость концентрации газов в смеси от скорости звука при стандартных условиях

• Fig. 4. The concentration Dependence of gases in the mixture on the speed of sound under standard condition



• Рис. 5. Относительная погрешность определения компонентного состава природного газа измерителем плотности Turbo Flow UDM  
 • Fig. 5. Relative error in determining the natural gas component composition with a densitometer Turbo Flow UDM



• Рис. 6. Средняя относительная погрешность определения концентрации компонент за май-июнь 2022 г.  
 • Fig. 6. Average relative error in determining the components concentration for May-June 2022

на рис. 7, б – график относительной погрешности определения плотности, полученные на основе измеренных значений преобразователем плотности газа Turbo Flow UDM и данных хроматографического анализа проб газа (расчетная методика ГОСТ 30319.3). Как видно из полученных экспериментальных зависимостей, относительная погрешность измерения плотности не превышает 0,176 % (заявленная относительная погрешность измерения плотности, приведенной к стандартным условиям, – не более 0,24 %).

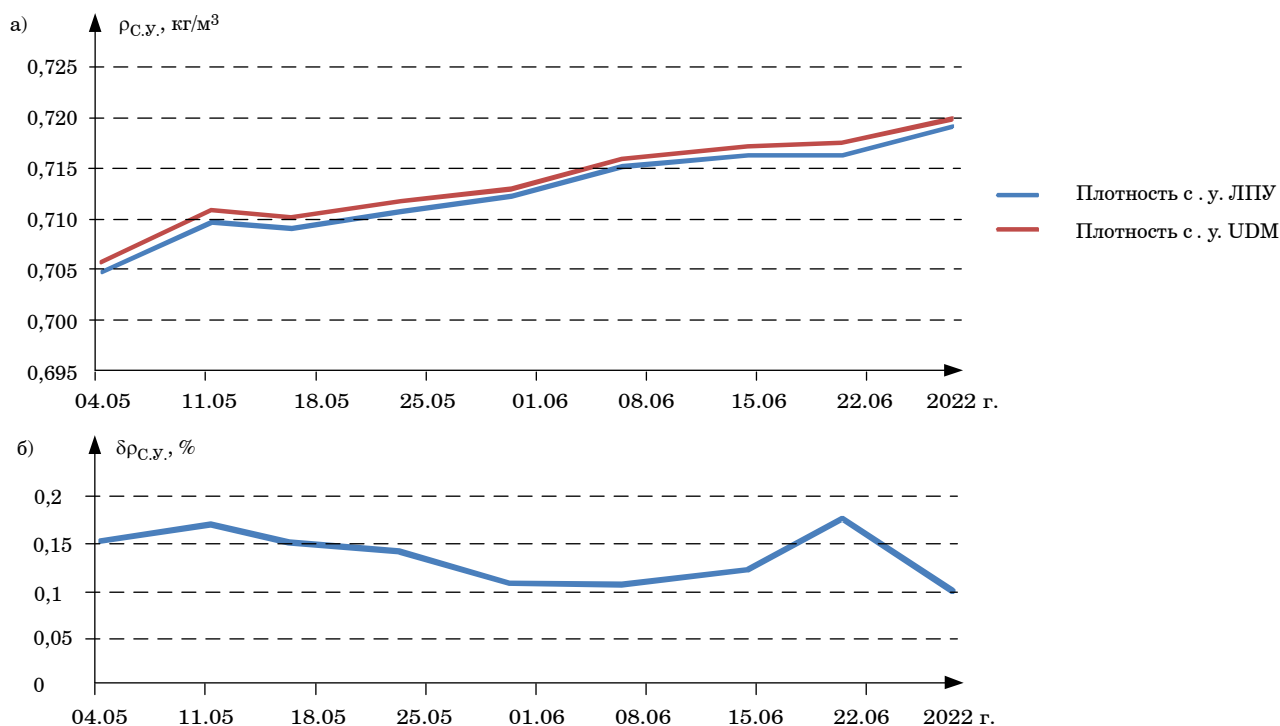
Таким образом, применение разработанных инновационных УЗ-плотномеров газа серии Turbo Flow UDM в автоматизированной измерительной системе на базе ультразвуковых расходомеров Turbo Flow UFG дает возможность реализации функции ρ-пересчета измеренного объемного расхода в массовый согласно ГОСТ 8.611-2013, при этом данный измерительный комплекс способен осуществлять полный динамический

учет изменения ФХП газа в режиме реального времени с удовлетворительными метрологическими характеристиками для узлов класса А и ниже (табл. 7, п. 9.2.1.4 из ГОСТ 8.611-2013).

## Выводы

1. В работе описана проблема измерения массового расхода природного газа, возникающая из-за динамического изменения состава газа и несвоевременного его внесения в вычислитель УЗ-преобразователя расхода, и предложены пути автоматизации измерений.

2. Описаны возможности решения данной задачи с помощью приборов учета Turbo Flow UFG и потоковых измерителей плотности газа Turbo Flow UDM. Наличие уникальной функции измерения плотности природного газа (рабочей и приведенной к стандартным условиям) с возможностью



• Рис. 7. Изменение во времени плотности газа, приведенной к стандартным условиям (а) и относительной погрешности ее измерения (б)  
 • Fig. 7. Change in time of the gas density reduced to standard conditions (a) and its measurement the relative error (b)

приближенной оценки его компонентного состава расширяет его диагностические возможности для повышения точности и достоверности измерения.

3. Проведена оценка метрологических характеристик ультразвукового измерителя плотности газа Turbo Flow UDM, а именно – оценка систематической суммарной погрешности от влияния измерительных каналов входных величин – температуры, давления, скорости звука.

4. Произведено вычисление относительной погрешности определения состава газовой смеси покомпонентно при сравнении данных, полученных путем непосредственного поточного измерения

с помощью разработанного плотномера, и данных, полученных путем лабораторного хроматографического анализа предварительно отобранных проб газа. Так, среднее значение отклонения измеренной концентрации метана (в диапазоне ее изменения от 93,76 до 95,32 мол.%) – основного компонента природного газа от паспортного (полученного хроматографическим анализом) – составило не более 0,26 %. По мере снижения концентрации компонент в газовой смеси погрешность определения их концентрации возрастает (от 3,53 % для этана и до 14,7 % для гексана).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 8.611-2013. Расход и количество газа. Методика измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104093> (дата обращения: 30.07.2022).
2. СТО Газпром 5.37-2011. Единые технические требования на оборудование узлов измерения расхода и количества природного газа, применяемых в ОАО «ГАЗПРОМ». URL: <https://elima.ru/docs/?id=6291> (дата обращения: 30.07.2022).
3. ИНТЕХ ГмбХ. Определение плотности газа или жидкости. Приборы для определения плотности жидкости и газа. URL: [http://intech-gmbh.ru/density\\_determination/](http://intech-gmbh.ru/density_determination/) (дата обращения: 30.07.2022).
4. Андреева М. М., Староверова Н. А., Нурахметов М. Б. Обзор рынка расходомеров для нефтяной и газовой промышленности // Вестн. технолог. ун-та. 2015. Т. 18, № 10. С. 42–46
5. Соломичев Р. И., Слонько А. Н., Дубинин В. А. Методы повышения метрологической надежности ультразвуковых расходомеров в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Газовая пром-ть. 2019. Спецвып. № 2 (786). С. 112–117.



6. Ермолаев А. Н., Мельничук О. В. Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред // Электротехн. и информ. комплексы и системы. 2017. Т. 13, № 4. С. 92–97.
7. Ермолаев А. Н., Мельничук О. В. Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред // Электротехн. и информ. комплексы и системы. 2017. Т. 13, № 4. С. 92–97.

## REFERENCES

1. GOST 8.611-2013. Consumption and amount of gas. Measurement technique using ultrasonic flow transducers. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200104093> [Accessed 30 July 2022].
2. STO Gazprom 5.37-2011. Uniform technical requirements for the equipment of units for measuring the flow and quantity of natural gas used in OAO GAZPROM. Available from: <https://elima.ru/docs/?id = 6291> [Accessed 30 July 2022].
3. INTECH GmbH. Determination of the density of a gas or liquid. Instruments for determining the density of liquid and gas. Available from: [http://intech-gmbh.ru/density\\_determination/](http://intech-gmbh.ru/density_determination/) [Accessed 30 July 2022].
4. Andreeva M. M., Staroverova N. A., Nurakhmetov M. B. Market overview of flowmeters for the oil and gas industry. Vestnik technologist. university. 2015;18(10):42–46. (In Russ.).
5. Solomichev R. I., Slonko A. N., Dubinin V. A. Methods for improving the metrological reliability of ultrasonic flow meters under the influence of destabilizing factors. Gazovaya Prom. 2019;(2):112–117. (In Russ.).
6. Ermolaev A. N., Melnichuk O. V. Modern means of measuring the density of liquid disperse media. Elektrotekhn. and inform. complexes and systems. 2017;13(4):92–97. (In Russ.).
7. Ermolaev A. N., Melnichuk O. V. Modern means of measuring the density of liquid disperse media. Elektrotekhn. and inform. complexes and systems. 2017;13(4):92–97. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Соломичев Роман Игоревич**, кандидат технических наук, главный конструктор по изделию конструкторского бюро Научно-производственного объединения «Турбулентность-ДОН».

Область научных интересов – научные основы создания, совершенствования технических и программных компонент систем измерения расхода, плотности жидкости и газа, измерения концентрации составляющих пылегазовых смесей.

**Соломичева Светлана Викторовна**, начальник службы развития Научно-производственного объединения «Турбулентность-ДОН».

Область научных интересов – научные основы создания, совершенствования технических и программных компонент систем на основе ультразвуковых методов измерений и неразрушающего контроля.

Поступила в редакцию 02.08.2022

Поступила после рецензирования 18.08.2022

Принята к публикации 15.09.2022

**Solomichev Roman I.**, PhD in Technical Sciences, Chief Product Designer of the design bureau LLC, Research and production association «Turbulentnost-DON».

Research interests – the scientific basis for the creation, technical and software components improvement of systems for measuring flow, liquid and gas density, measuring the dust-gas mixtures concentration.

**Solomicheva Svetlana V.**, Head of the development service of LLC, Research and production association «Turbulentnost-DON».

Research interests – the scientific basis for the creation, technical and software components improvement of systems based on ultrasonic measurement methods and non-destructive testing.

Received 02.08.2022

Revised 18.08.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья  
УДК 62-5:681.2

## Концепция морской горизонтальной посадки крыльевого космического аппарата путем стыковки с экранопланом

**Александр Владимирович Небылов<sup>1</sup>**

✉ nebylov@aanet.ru, orcid.org/0000-0001-5168-3436

**Владимир Александрович Небылов<sup>1</sup>**

vladnebylov@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1449-6898

**Александр Иванович Панферов<sup>1</sup>**

panferov@aanet.ru, orcid.org/0000-0002-7499-5245

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Государственные расходы на развитие космонавтики составляют значительную часть бюджета многих стран, в том числе нескольких развивающихся. Значительное снижение удельной стоимости космических запусков, безусловно, является одной из важнейших задач космонавтики. Ясно, что эффективным способом снижения стоимости запусков и посадок является обеспечение существенной многоразовости использования всех ступеней и элементов космической техники. Причем стремиться нужно не к минимальному двойному использованию, а к десятикратному и большему. В настоящей публикации, имеющей отчасти обзорный характер, анализируется и углубляется концепция интегрированной транспортной системы, включающей в себя воздушно-космический самолет (ВКС) и экраноплан, используемый как разгонщик при запуске, и подвижную посадочную платформу при посадке. Посадка заключается в стыковке ВКС и экраноплана на заключительном этапе снижения и выравнивания скоростей. Колесное шасси не требуется ни при взлете, ни при посадке, что позволяет повысить полезную нагрузку.

**Ключевые слова:** стоимость космических запусков, многоразовость, интегрированная транспортная система, воздушно-космический самолет, экраноплан, стыковка двух крыльевых аппаратов

**Благодарности.** Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FSRF-2020-0004, раздел 2.

**Для цитирования:** Небылов А. В., Небылов В. А., Панферов А. И. Концепция морской горизонтальной посадки крыльевого космического аппарата путем стыковки с экранопланом // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 65–81.

Original article

## The concept of winged space vehicle marine horizontal landing by docking with ekranoplane

**Alexander V. Nebylov<sup>1</sup>**

✉ nebylov@aanet.ru, orcid.org/0000-0001-5168-3436

**Vladimir A. Nebylov<sup>1</sup>**

vladnebylov@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1449-6898

**Aleksandr I. Panferov<sup>1</sup>**

panferov@aanet.ru, orcid.org/0000-0002-7499-5245

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Government spending on the development of astronautics makes up a significant part of the budget of many countries, including several developing ones. A significant reduction in the unit cost of space launches is certainly one of the most important tasks of astronautics. It is clear that an effective way to reduce the cost of launches and landings is to ensure a significant reusability of all stages and elements of space technology. Moreover, you need to strive not for the minimum double use, but for tenfold and more. This publication, which is somewhat of an overview, analyzes and deepens the concept of an integrated transport system, including an aerospace plane (ASP) and an ekranoplan (EK), used as an accelerator during launch, and a mobile landing platform during landing. The landing consists in the docking of the ASP and EK at the final stage of descent and equalization of speeds. No wheeled undercarriage is required for either takeoff or landing, allowing for higher payloads.

**Keywords:** space launch cost, reusability, integrated transport system, aerospace plane, ekranoplane, docking of two winged vehicles

**Acknowledgements.** The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the State task № FSRF-2020-0004, section 2.

**For citation:** Nebylov A. V., Nebylov V. A., Panferov A. I. The concept of winged space vehicle marine horizontal landing by docking with ekranoplane. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):65–81. (In Russ.).

## Введение

Проект «воздушно-космический самолет (ВКС) + экраноплан (ЭК)» был предложен Й. Окхами, Н. Томита и А. В. Небыловым в 1999 г. [1, 2] и поддержан многими специалистами. В настоящее время актуальность проекта возросла в связи с освоением космодрома «Восточный» и необходимостью приема космических аппаратов, приземляющихся в акватории Тихого океана. В статье анализируются требования к ВКС и к тяжелому экраноплану-катамарану для реализации проекта. Формулируются требуемые и достижимые показатели всепогодности ЭК определенных размеров и аэродинамической компоновки [3]. Излагаются методы синтеза и оптимизации систем управления абсолютным и относительным движением обоих крыльевых аппаратов, предлагаются алгоритмы управления в разных режимах движения.

Описываются прототипы систем горизонтального запуска и посадки (НТНЛ), проектировавшиеся или реализованные в разных странах. Оцениваются стоимостные особенности проекта и производственные возможности для создания тяжелого экраноплана в России. Предлагаются многовариантные направления применения ЭК, обеспечивающие его ежедневную загрузку по разным направлениям и периодическое эффективное использование как уникального транспортного средства для обслуживания ВКС. Делается вывод о конкурентоспособности и перспективности проекта «ВКС+ЭК», но со значительным сроком реализуемости, поскольку пока нет ни подходящего ВКС, ни подходящего ЭК.

При снижении стоимости запуска на низковысотную околоземную орбиту и последующей посадки 1 кг полезной нагрузки до критической величины порядка USD 500 были бы пересмотрены многие принципы выполнения и критерии эффективности космических операций. Становится целесообразным вывод в космос некоторых производственных технологий, создание на Луне и на ближайших астероидах промышленности по производству ракетного топлива, металлических элементов для конструирования космических аппаратов, добычи драгоценных металлов и других приносящих прибыль производств, которые будут появляться в процессе проведения космических исследований и освоения космоса. Однако пока многочисленные идеи по существенному удешевлению космических запусков не реализованы, хотя этому уделяется большое внимание. Требуется снижение стоимости, как минимум, на порядок по отношению к существующему уровню, для чего нужны новые конструктивные идеи. Ясно, что эффективным способом снижения сто-

имости космических запусков и посадок является обеспечение многоразовости всех ступеней и отдельных элементов космической техники. Причем стремиться нужно не к минимальному двойному использованию, а к десятикратному.

В будущем, несомненно, будет создан одноступенчатый ВКС, который сможет, подобно обычному гиперзвуковому самолету, не терять ничего, кроме топлива, при каждом запуске и посадке. Но многорежимный двигатель с необходимой тягой, успешно функционирующий в широком диапазоне скоростей – от практически нулевой до 33 М, пока не создан, из-за чего пока рассматривают только двух- или даже трехступенчатые ВКС с комбинированным двигателем, совмещающим свойства турбореактивного в атмосфере и прямоточного реактивного при выходе из атмосферы. Поэтому целесообразно исследовать ВКС с крыльями на каждой ступени. Но требуемая при этом мягкая посадка каждой ступени на аэродром трудно осуществима. При использовании одного аэродрома посадка первой ступени с крыльями возможна только при преодолении расстояния дважды. Вариант двух аэродромов сужает набор направлений движения при взлете – аэродромов не может быть много.

Мягкая посадка каждой ступени без крыльев возможна с использованием либо парашютов, либо основных двигателей, тяга которых достаточна для компенсации силы тяжести в течение довольно длительного времени. При вертикальном старте эффективной идеей является вертикальная мягкая посадка на заранее подготовленную площадку или на плавучую платформу в океане. Это применяет Илон Маск в отношении первой ступени ракеты «Falcon 9» (рис. 1). Но пока о настоящей многоразовости говорить рано. Кроме того, в лучшем случае повторное использование первой ступени может снизить стоимость запуска на 10 %, но не на порядок. Многократное использование, даже при тщательном обслуживании между полетами, пока сильно снижает регулярность запусков. Можно легко подсчитать истинную зависимость вероятности безаварийного запуска от числа предварительных запусков и среднюю стоимость запуска с учетом стоимости обслуживания для определенных исходных данных.

Наконец, примем во внимание, что уже на протяжении 60 лет основным способом посадки бескрылого космического аппарата является парашютная система с посадочным модулем. Однако ее многоразовость может быть только частичной, поскольку двигательный отсек теряется, а приземляется только сравнительно дешевый посадочный модуль, да и его сохранность после не очень мягкой посадки сомнительна. Обгоревшее



- *Рис. 1. Посадка первой ступени ракеты «Falcon 9» на баржу в океане*
- *Fig. 1. Landing of the rocket «Falcon 9» first*



- *Рис. 2. Парашютная посадка космического корабля «Союз-МС-15»*
- *Fig. 2. Parachute landing of the space ship stage on the barge in the ocean «Soyuz-MS-15»*

теплозащитное покрытие надо полностью восстанавливать, и это недешево. Современные потребности пилотируемой космонавтики привели к востребованности космических аппаратов, вмещающих шесть или более космонавтов, а не три, как «Союз». Однако построить шарообразный (с нулевым аэродинамическим качеством) космический аппарат на шесть или более пассажиров не удастся ввиду ограниченной грузоподъемности даже самых совершенных парашютных систем (рис. 2). Кроме того, размеры спускаемого аппарата и всех других крупногабаритных элементов ракет должны быть согласованы с шириной колеи российских железных дорог в 1524 мм и с шириной железнодорожных вагонов, в которых космическую технику перевозят из мест изготовления на космодромы.

Космический корабль типа «Space Shuttle» или «Буран» со вместимостью восьми-десяти кос-

монавтов сейчас бы очень пригодился для экскурсий космических туристов и запуска больших групп спутников, однако восстанавливать их никто не будет. «Shuttle» показал себя слишком дорогостоящим в обслуживании. «Буран» потребовал для перевозки создания самого большого в мире самолета АН-225, но эти технологии и производственные мощности сейчас утрачены. Тушинский машиностроительный завод, где осуществлялась сборка «Бурана», обанкротился. Территория и подъездные пути к нему застраиваются. Научно-производственное объединение (НПО) «Молния», где проектировался «Буран», также находится в тяжелом финансовом положении.

В отношении крылатых космических аппаратов с горизонтальной посадкой следует заметить, за последние 20–30 лет в мире накоплен значительный опыт их испытательных полетов. Многоцелевая авиационно-космическая система (МАКС) предполагала использование для запуска в качестве первой ступени тяжелого самолета-разгонщика и далее – ракетный запуск, возможно, с внешним топливным баком, а горизонтальная посадка допускалась на обычный аэродром. Разработчик – НПО «Молния». Был использован опыт работ НПО «Молния» по крыльевым аппаратам «Спираль» и «Бор-4». Важным преимуществом МАКС стало отсутствие необходимости в специальном космодроме. Система базировалась на обычных аэродромах первого класса, дооборудованных необходимыми для МАКС средствами наземного комплекса управления космическими системами. Проект был закрыт в 1991 г., почти сразу после закрытия программы «Буран» в 1988 г. Крыльевой европейский космический корабль «Germes» также был выведен на орбиту вертикально ракетой и после выполнения миссии должен был совершать аэродинамический спуск и посадку на аэродром. После определения удельной стоимости запуска в 5000 долларов США программа была закрыта. Проект «Зенгер-2» был предложен немецкой компанией *Messerschmitt-Bolkow-Blohm* в 1980 г. как европейская альтернатива системе «Space Shuttle». Корабль имел двигатель для выведения на орбиту, маневров в космосе и схода с орбиты. Стоимость программы оценивалась в 5,3 млрд долларов США. В процессе работы над проектом компании удалось создать проточный реактивный двигатель, который прошел серию наземных испытаний и мог обеспечить необходимые характеристики для всего спектра условий применения. Проект был закрыт в 1995 г. из-за проблем финансирования и чрезмерно затянувшегося срока реализации.

Проект «НОРЕ» разрабатывался в Японии с начала 1980-х гг. как многоразовый четырехместный космический самолет с вертикальным запуском японской ракетой Н-II и горизонтальной посадкой. В связи с радиационной аварией на атомной электростанции (АЭС) Фукусима-1 в 2011 г. и тяжелейшими восстановительными работами бюджет космических разработок Японии был сокращен в два раза, и проект «НОРЕ» был закрыт. Это был очень оригинальный проект с попыткой реализовать мягкую горизонтальную посадку в океане.

Свой проект космических аппаратов горизонтального запуска имелся и в Великобритании. Он назывался «HOTOL» («Horizontal Take-Off and landing» – «Горизонтальный взлет и посадка») и разрабатывался в 1980-х гг. Спроектированный как одноступенчатый крылатый космический аппарат многоразового использования «HOTOL» планировалось оснастить уникальными воздушно-реактивными (турборакетными) двигателями RB545, которые разрабатывались компанией *Rolls-Royce*. Двигатель работал на жидком водороде в качестве топлива и жидком кислороде в качестве окислителя, позволял значительно сократить необходимое количество окислителя на борту благодаря использованию заборного атмосферного кислорода при полете в нижних слоях атмосферы. Однако сравнение с ракетой не показало значительных преимуществ, и финансирование проекта было прекращено.

В США также был амбициозный проект «NASP» («National Aero-Space Plane») по созданию одноступенчатого космолета «X-30». Самолет должен был самостоятельно, без помощи самолета-разгонщика, взлетать, достигать околоземной орбиты и возвращаться на Землю. Сейчас этот проект приостановлен. Аналогичный британский проект разрабатывается и сейчас. Он назван «Skylon» и является продолжением проекта «HOTOL». В теоретических исследованиях показано, что стоимость 1 кг полезной нагрузки, доставляемой на низкую орбиту, будет снижена примерно до 650 фунтов стерлингов за килограмм. По состоянию на 2017 г., была обеспечена лишь небольшая часть финансирования для разработки и строительства «Skylon».

Американский проект «Boeing X-37» (другое название – «X-37B Orbital Test Vehicle», OTV) – экспериментальный беспилотный орбитальный самолет многоразового использования, созданный для испытания будущих технологий. Он предназначен для функционирования на высотах 200–750 км, способен быстро менять орбиты, маневрировать. Работы над созданием «Boeing X-37» начались в 1999 г., NASA совместно

с *Boeing*. В 2002 г. с *Boeing* был заключен новый контракт, который предусматривал создание двух экспериментальных аппаратов для атмосферных испытаний и одного для орбитального полета. В 2004 г. разработка «X-37» была передана из NASA в Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США (DARPA). Прошли два успешных свободных полета путем сбрасывания. В 2006 г. ВВС США объявили, что они будут продолжать развивать орбитальный проект, считая, что основными задачами «X-37B» являются многоразовые технологии космических аппаратов. После полета на орбите аппарат совершает посадку в самолетном режиме. Аппарат, внешне похожий на «X-37B», уже выполнил пять полетов. Первый состоялся в 2010 г., он продолжался 244 дня. Следующие четыре полета длились 468, 675, 718 и 780 дней соответственно. Последний продолжался с сентября 2017 г. по октябрь 2019 г. Какие-либо данные о достигнутой удельной стоимости запуска не разглашаются. Тем не менее, по-видимому, этот проект является наиболее «продвинутым» в освоении технологий построения многоразовых аппаратов.

В настоящее время многие разработчики космических кораблей проявляют наибольшую активность в создании средств обслуживания «космических туристов», желающих совершить краткосрочный круиз в космос (или хотя бы суб-орбитальный полет) даже за большие деньги порядка 20–30 млн долларов США. Рынок космического туризма очень широк, и даже авансовые поступления за будущие полеты позволяют ускорить разработки и добиться значительных результатов. Важно, что работают в этой области космонавтики в основном частные компании, способные быстро, по сравнению с крупными государственными организациями, принимать необходимые решения. Наибольших результатов добились две-три компании. Цель у них одна – сделать полеты в космос более доступными. Обе они использовали технологию «воздушный старт», заключающуюся в запуске ракетного орбитального модуля с космонавтами с высоколетающего самолета и, в итоге, после выполнения краткосрочной миссии на орбите, – в горизонтальном приземлении на аэродром по-самолетному или на парашюте.

Компания *Virgin Galactic*, основанная британским предпринимателем Р. Брэнсоном в США, разрабатывала свою авиакосмическую туристическую систему более 25 лет. Разработчики вплотную подошли к границам космоса. В 2004 г. были совершены полеты первого из таких аппаратов испытательного «SpaceShipOne» –

суборбитального пилотируемого космического корабля многоразового использования. Развитием программы стал «SpaceShipTwo» для штатных полетов (рис. 3; 4). Корабли этого класса более комфортабельны и способны брать на борт до восьми человек, включая двух членов экипажа. В 2019 г. «SpaceShipTwo» поднялся до высоты 90 км. Компания заканчивает разработку системы. Будут проведены еще четыре испытательных полета *Virginia* до первых коммерческих полетов с пассажирами в 2022 г. Аппарат «SpaceShipTwo» доставляют на высоту около 20 км с помощью трехфюзеляжного самолета-носителя «White Knight Two» («WK2»). После включения собственного ракетного двигателя аппарат начинает самостоятельный полет и достигает высоты 135–140 км, после чего возвращается на аэродром старта в режиме планера. Все рейсы планируется начинать и заканчивать на одном аэродроме в штате Калифорния.

В компании *Space Exploration Technologies (SpaceX)* миллиардера Илона Маска успешно осуществлено создание частного космического корабля «Crew Dragon» (рис. 5; 6). Он уже доставляет космонавтов на Международную космическую станцию (МКС). По-видимому, уже



• Рис. 3. Космический самолет «SpaceShipTwo» под центральным фюзеляжем самолета-носителя «White Knight Two»

• Fig. 3. Space plane «SpaceShipTwo» under the central fuselage of carrier aircraft «White Knight Two»



• Рис. 4. Капсула «SpaceShipTwo» в полете

• Fig. 4. Capsule «SpaceShipTwo» in flight

в 2022 г. компания сможет предложить полет и космическим туристам. Отправлять их будут в облегченной капсуле «SpaceX Dragon», которая вмещает четыре человека. Тур будет заключаться в выполнении двух-трех витков вокруг Земли на 400-километровой орбите с приземлением на воду у побережья Флориды.

Корабль «Crew Dragon» также считается многоразовым, однако пока нет данных о полном сохранении теплозащитного покрытия при аэродинамическом торможении в атмосфере. Возможно, какие-то элементы такого покрытия придется заменять после каждой посадки в океане с неминуемым резким охлаждением раскаленного корпуса в холодной воде. Пока любая попытка сделать



• Рис. 5. Космический корабль «Crew Dragon» фирмы SpaceX

• Fig. 5. Spaceship «Crew Dragon» of the firm SpaceX



• Рис. 6. Капсула «SpaceX Dragon» в полете за пределами атмосферы

• Fig. 6. Capsule «SpaceX Dragon» in flight outside the atmosphere

какой-либо элемент космической транспортной системы многократно приводит к дополнительным расходам на диагностику и восстановление полной работоспособности, а также повышенный запас топлива для посадочных двигателей. Эти расходы в неблагоприятных случаях могут превысить экономию от многократности. Поэтому, несмотря на позитивную предварительную информацию о достижениях «SpaceX», существует только один радикальный способ обеспечения полной многократности – это переход к системам горизонтального запуска и посадки перспективных крыльевых аппаратов. Для этого требуется доработать широкодиапазонный двигатель, точнее, комбинированный двигатель со свойствами воздушно-реактивного двигателя (ВРД) для широкого диапазона скоростей полета в атмосфере и ракетного двигателя для космоса.

Многие конкурирующие частные фирмы во главе с лидерами отрасли *Virgin Galactic*, *SpaceX* и *Blue Origin* весьма успешно разрабатывают технические средства для пилотируемых полетов. Разрабатывается несколько проектов [1–4] частных суборбитальных и даже орбитальных пилотируемых многократных космических аппаратов. Руководство NASA неоднократно заявляло о своей заинтересованности в коммерциализации околоземной орбиты и космической программы в целом.

«Мощным» конкурентом *SpaceX* является фирма *Blue Origin* миллиардера Джеффа Безоса. Ее многократный космический корабль для суборбитального туристического полета «New Shepard» (рис. 7) уже готов отправить первых туристов в космос. Это будет несколько минут невесомости в корабле «самолетного» типа, похожем на капсулу. Ее вместимость – шесть человек.



- Рис. 7. Запуск новой ракеты-носителя «New Shepard»
- Fig. 7. Launch of the rocket-carrier «New Shepard»

Корабль «New Shepard» состоит из 18-метровой многократной одноступенчатой ракеты с одним водородно-кислородным двигателем BE-3 и герметичной капсулы для экипажа. После старта ракета в течение 3 мин разгоняет космический корабль до скорости 3200 км/ч при перегрузке на уровне 3g. Затем на высоте около 75 км пассажирская капсула отделяется от ракеты и продолжает движение по инерции, позволяя людям почувствовать невесомость. На 4-й минуте полета капсула достигает максимальной высоты – выше 100 км. Продолжая двигаться по баллистической траектории, на 9-й минуте она снова входит в атмосферу и начинает торможение тремя парашютами. В момент раскрытия парашютов перегрузки могут достигать 5,5g, но уже через 2–3 мин капсула совершает мягкую посадку в пустынной местности Техаса.

Само разнообразие появляющихся сегодня вариантов выведения и возвращения с орбиты показывает, что в этой области существует определенный «кризис идей», и мы, возможно, скоро увидим появление принципиально новых технически отработанных и экономически эффективных решений, позволяющих существенно снизить стоимость выхода в космос.

### Особенности горизонтального запуска и посадки

Итак, запуск на орбиту и посадка с орбиты пока еще слишком дороги. Необходимо разработать новые идеи проектов, которые смогут существенно усовершенствовать транспортировку космических аппаратов, грузов и пассажиров. Тенденцией в развитии космических аппаратов является стремление увеличить их грузоподъемность, пассажироместимость и повысить надежность функционирования [4–9]. Замена трехместных «Союзов» на шестиместные аппараты – в планах Роскосмоса. Разрабатывают десятиместные новые космические корабли, использующие запуск и посадку в океане.

Системы вертикального пуска будут становиться все более дорогими из-за удорожания равнинных участков Земной поверхности в экваториальных районах. Люди предпочитают использовать их для производства продуктов питания, а не как зоны отчуждения космодромов. Управляемый спуск всех используемых ступеней ракеты станет обязательным, чтобы ликвидировать «зону отчуждения». Именно поэтому нужен универсальный двигатель, развивающий необходимую тягу от нулевой скорости до космической скорости 33 М. Пока еще трудно поверить, что

такой широкодиапазонный двигатель будет создан в ближайшем будущем, а значит, нужен ускоритель для запуска маршевого двигателя на малых дозвуковых скоростях. Такой ускоритель необходим для достижения дозвуковой скорости, когда подъемная сила гиперзвукового крыла будет превышать вес аппарата. Приземляющиеся космические корабли также постоянно модернизируются с целью увеличения пассажироместимости. Возможности парашютных систем ограничены, и для спуска крупногабаритных аппаратов на Землю следует использовать аэродинамическое торможение капсулообразного посадочного комплекса с управляемым углом атаки во избежание перегрева от слишком резкого торможения в атмосфере. Кроме того, десантирование на парашюте в океан связано с требованием быстрого нахождения десантной капсулы эвакуационной командой, что не всегда возможно при большой зоне ожидания.

### Требуемые и достижимые характеристики большого экраноплана

Экранный эффект наиболее выражен на высоте полета  $h$ , не превышающей  $1/5$  хорды крыла  $b$ , и практически исчезает при  $h = b$ . По фотоизображениям известных больших ЭК можно оценить ширину хорды крыла примерно как  $1/5$  длины  $L$  аппарата.

Основными особенностями ЭК самолетной компоновки являются:

- прямоугольное крыло малого удлинения с «шайбами» на концах;
- прочный обтекаемый корпус, выдерживающий механические нагрузки при взлете с воды и редкие удары морских волн;
- наличие избыточной мощности двигателя для преодоления «горба» гидродинамического сопротивления;
- наличие совершенной системы автоматического управления движением.

Самым крупным из реально построенных ЭК [5] является «КМ» разработки «ЦКБ по СПК» под руководством Р. Алексеева со взлетной массой 440 т. Крейсерская скорость – 430 км/ч. Еще один интересный российский ЭК – «Лунь» со взлетной массой 380 т, который был спущен на воду в 1990 г. Его гражданский аналог «Спасатель» (рис. 8) предназначался для выполнения поисково-спасательных работ на море. «Спасатель» можно рассматривать как прототип нового крупного ЭК, способного решить задачу создания комплексной космической транспортной системы совместно с воздушно-космическим самолетом

(рис. 9). Основные характеристики «Спасателя»: размах крыла – 44 м; длина – 73,8 м; высота – 19,2 м; масса пустого – 243 т; максимальная взлетная масса – 380 т.

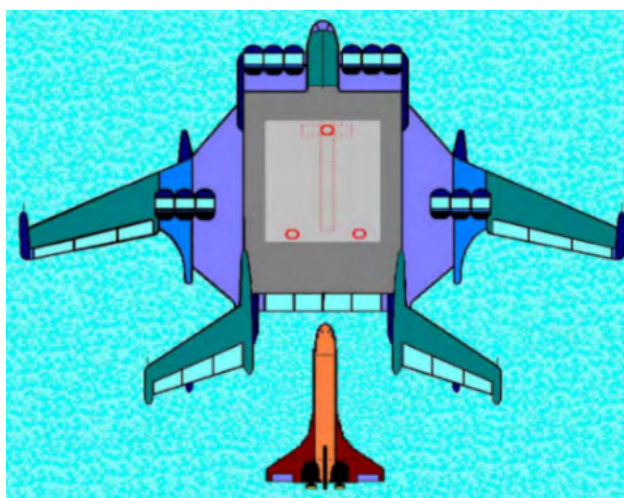
Важной характеристикой любого ЭК является мореходность, т. е. возможность взлета с поверхности моря определенной шероховатости, характеризующейся высотой морского волнения трехпроцентной обеспеченности  $h_3$  %.

Мореходные качества «Спасателя» легко определяются. При длине  $L = 73,8$  м хорда крыла составит  $b = L/5 = 73,8/5 = 14,8$  м.

Желаемая высота движения  $h$  относительно среднего невозмущенного уровня моря не будет превышать  $h = b/5 = 14,8/5 = 3,0$  м. Чтобы выдерживать это требование с запасом, даже при самой



- Рис. 8. ЭК «Спасатель» [5, 13]
- Fig. 8. EK «Spasatel» [5, 13]



- Рис. 9. Сближение ВКС и ЭК-катамарана [5, 13]
- Fig. 9. Approaching of ASP and EK-catamaran [5, 13]



неблагоприятной погрешности стабилизации высоты (учитывающей как погрешность измерения высоты, так и негативное влияние сильных порывов ветра) в 30 %, необходимо уменьшить заданную высоту полета  $h_d$  на 30 % и принять  $h_d = 0,7h = 0,7 \cdot 3,0 = 2,1$  м.

С другой стороны, эта высота должна позволять избежать даже редких столкновений с гребнями волн при максимально допустимой амплитуде волн. Отсюда можно оценить мореходные качества. Отметим, что здесь под высотой волны  $h_{3\%}$  понимается расстояние от подножия волны до ее гребня с запасом 3 %, т. е. удвоенная амплитуда гармонической волны. Для «Спасателя» при полете на заданной высоте высота волны может достигать  $h_{3\%} = 2h_d = 4,2$  м. Это практически соответствует 6-балльной морской волне, которая по шкале занимает интервал высот  $h_{3\%} = 3,5 \div 6,0$  м.

Мореходные качества в 5–6 баллов не соответствуют возможности всепогодного применения этого ЭК в океане. Для достижения всепогодного и всесезонного применения требуется повысить мореходность не менее чем до неполных 7 баллов, учитывая высоту волны  $h_{3\%} = 6$  м. Для этого требуется увеличить размер ЭК примерно пропорционально допустимой высоте волн, т. е. и  $6,0/4,2 = 1,43$ . Тогда для приемлемой длины ЭК получим:  $L = 73,8 \cdot 6,0/4,2 = 105$  м. Взлетная масса увеличится пропорционально третьей степени увеличения габаритов и составит  $380 \cdot (1,43)^3 = 1110$  т. Конечно, эти расчеты приблизительны. ЭК такой массы предполагается строить по двухкорпусной (катамаранной) схеме с иными пропорциями длины и размаха крыла, чем у однокорпусного «Спасателя». Но они все же позволяют дать важные ориентиры по выбору параметров нового действительно крупного ЭК.

Еще один аргумент при выборе взлетной массы и габаритов ЭК связан с необходимостью нести большую полезную нагрузку. Для ЭК «Спасатель» доля полезной нагрузки составляет 36 % от взлетной массы [5, 7, 10]. При массе 1110 т допустимую полезную нагрузку можно ожидать как  $0,36 \cdot 1110 = 400$  т. Такая полезная нагрузка позволяет нести даже заправленный ВКС при выполнении функций «Спасателя» и, тем более, помогать ВКС без топлива при посадке и стыковке с ЭК. Учтем, что для российского ВКС «Буран» стартовая масса составляла всего 105 т, а полезная нагрузка – 30 т. Может быть целесообразным использование ЭК разных размеров при старте и посадке ВКС, особенно при большом расстоянии между точками старта и посадки ВКС. ЭК должен облегчить ВКС решение многих задач при взлете и посадке: доставка в экваториальную зону старта, дозаправка с использованием криогенной тех-

ники, освобождение от необходимости предпосадочного маневрирования, управление стыковкой, ускоренная доставка закрепленного на палубе ЭК ВКС на базу для подготовки к следующему пуску.

Учитывая как погрешность измерения высоты, так и негативное влияние сильных порывов ветра на ошибку управления в 30 %, необходимо уменьшить заданную высоту полета  $h_d$  на 30 % и принять значение  $h_d = 0,7h = 0,7 \cdot 3,0 = 2,1$  м.

С другой стороны, эта высота должна позволять избежать даже редких столкновений с гребнями волн при максимально допустимой амплитуде волн. Отсюда можно примерно оценить мореходные качества. Для «Спасателя» при полете на заданной высоте высота волны может достигать  $h_{3\%} = 2h_d = 4,2$  м. Это практически соответствует 6-балльной морской волне, которая по шкале Гидрометеослужбы (ГМС) занимает интервал высот  $h_{3\%} = 3,5 \div 6,0$  м. Поэтому при выборе размеров и массы ЭК, в первую очередь, следует учитывать его мореходность, а не грузоподъемность.

Кроме того, важно обеспечить многопрофильное использование строящегося ЭК не только в космическом проекте, но и во многих других транспортных задачах по обслуживанию труднодоступных районов с неразвитой аэродромной сетью. Большой ЭК может быть особенно полезен в Арктике, так как его полет может происходить над поверхностью воды, льда и снега, а для взлета можно быстро выделить или подготовить участки с мелкими неровностями, которые не подходят для самолетов. ЭК также является идеальным средством спасения людей в катастрофических ситуациях.

Понимание преимуществ больших ЭК пришло после длительного периода поиска корпоративных заказчиков для дешевых, т. е. малых ЭК. Вице-премьер России Ю. Борисов заявил в 2018 г. о создании нового российского экспериментального ЭК «Орлан» массой 600–800 т или больше. Срок начала его испытаний был установлен на 2027 г. Постройка даже одного «Орлана» позволила бы испытать его в разных условиях и улучшить конструкцию. Заметим, что в конце июля 2022 г. Ю. Борисов перестал быть вице-премьером и был назначен главой Роскосмоса.

Радиус разворота больших ЭК может составлять 4–6 км, даже если ЭК создает дополнительную боковую силу на руль направления за счет отклонения элеронов для создания крена. Однако крен приводит к частичной потере экранного эффекта, так как требует увеличения высоты. Поэтому при согласованном повороте допускаются лишь малые значения крена порядка  $1^\circ$ , что затрудняет маневрирование ЭК. Тем не менее в задаче стыковки ЭК и ВКС ведущая роль должна

принадлежать ЭК, чтобы максимально разгрузить ВКС от всех остальных задач, кроме стыковки. Понятно, что ЭК должен заблаговременно занять траекторию, необходимую для сближения с ВКС, для чего прогнозирование и планирование движений обоих транспортных средств должно быть достаточно точным и заблаговременным. После замыкания систем управления относительным движением взаимную несоосность в горизонтальной плоскости постепенно уменьшают до нескольких метров и далее до  $2\sigma = 1$  м, уменьшая разницу их высот до 3–5 м.

При нормальной тяговооруженности порядка 30 % суммарная тяга двигателей должна быть порядка  $(4\div 9)\cdot 10^3$  кН. Ее могут обеспечить 6÷8 двигателей тягой по 500 кН каждый. Российский двигатель ПД-35 с тягой около 50 т. будет разработан в Ростехе (в г. Перми) к 2024 г. Схожая проблема возникла при проектировании российского самолета «Иркут» МС-21.

### Особенности горизонтального старта и посадки

Как уже было сказано, необходимо разработать новые идеи проектов космической техники, которые смогут существенно улучшить транспортировку космических аппаратов, грузов и пассажиров. Основная тенденция в развитии космических аппаратов – стремление увеличить их грузоподъемность, пассажироместимость и повысить надежность функционирования [10, 13, 14]. Планируется замена трехместных «Союзов» на шестиместные. Активно разрабатываются десятиместные космические корабли нового поколения, особенно с использованием океана как площадки для запуска и посадки.

### Анализ вариантов взаимодействия ЭК и ВКС, запускаемого с космодрома «Восточный»

Оценим возможности космодрома «Восточный» по обеспечению безопасности экипажа в аварийных режимах и в штатных режимах движения. Стандартная хорошо отработанная на космодроме «Байконур» схема отстреливания капсулы с экипажем при аварии ракеты-носителя может быть применена и на «Восточном», но при определенных особенностях. Если отстреливание производится с неподвижной ракеты или в течение короткого времени после взлета, то «круг приземления» невелик и космонавтов, как и на «Байконуре», быстро находят спасатели. Для

упрощения процедуры эвакуации капсулы деревьев внутри зоны приземления быть не должно. Однако при отстреле капсулы из высокого положения, куда ракета поднимается за первые минуты полета, капсула с парашютом может упасть на расстоянии в сотни и даже тысячи километров от стартового стола, особенно при сильном ветре. Если точка падения отклонилась от точки старта на восток, капсула упадет на воду Охотского моря или Тихого океана. Весьма вероятно также штатная (не аварийная) ситуация парашютной посадки на акваторию Тихого океана в удаленной от побережья точке с координатами, точность прогнозирования которых невысока. Поэтому необходим морской спасательный аппарат, способный быстро найти капсулу, поднять ее на борт, открыть и оказать медицинскую помощь экипажу, включая быструю подачу в камеру атмосферного воздуха. Сложилось мнение о целесообразности использования ЭК в качестве такого поисково-спасательного средства. Экраноплан катамаран с массой 1110 т может иметь крейсерскую скорость 550 км/ч и обнаруживать ВКС за 1–2 ч при выборе оптимальной траектории движения при поиске.

Учитывая дороговизну нового большого экраноплана, существует и альтернативное мнение об использовании нескольких водоизмещающих судов или беспилотников для поиска. Но хотя бы один большой ЭК, очевидно, все же потребуются для завершения полета ВКС. Тем более ЭК потребуются для реализации стыковки ВКС с ЭК на заключительном этапе посадки.

Если используется концепция НТНЛ на основе применения ЭК при горизонтальном запуске и посадке ВКС, то космодром не нужен вообще. Это решило бы проблему недостатков космодрома «Восточный», но только на следующем этапе технологического развития космонавтики, когда будут сконструированы и многорежимный двигатель для ВКС, и ЭК с массой 1110 т.

Попытаемся оценить стоимость разработки и постройки одного большого экраноплана (условно – «Орлан») со взлетной массой 1110 т, длиной 105 м и суммарной мощностью двигателей на борту порядка  $9\cdot 10^5$  л. с. [9].

### Метод оценки стоимости ЭК

Стоимостная оценка конструкции и постройки транспортного аппарата на самых ранних стадиях его проектирования является сложной проблемой. Ее приблизительное решение можно найти с помощью формулы Дикса – Риддла [8, 14]. В этой проверенной временем формуле фигу-

пируют только два параметра: масса аппарата  $M$  в тоннах и доступная на борту мощность  $P$  в лошадиных силах. Можно представить эту формулу в виде:

$$C_o = K_1 M + K_2 P, \quad (1)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – известные коэффициенты, первый из которых измеряется в тысячах долларов США за тонну, а второй – в тысячах долларов США за лошадиную силу. Естественно, проектные работы выделяются в отдельную статью стоимости транспортного аппарата только в проектах, финансируемых государством. В коммерческих проектах такие инвестиции покрываются из прибыли, но в любом случае они влияют на цену транспортного аппарата.

Для проверки можно подсчитать оценочную стоимость конкретных изделий и сравнить с известной сейчас стоимостью этих транспортных аппаратов на долларовом рынке, что позволяет проверить справедливость приближенных расчетов по формуле (1). Это было сделано нами для малого экраноплана «Иволга», гидросамолета «Бе-200», гидросамолета «А-40», корабля на воздушной подушке «Зубр». Естественно, реальные стоимости были определены по публикациям в открытой печати о заключенных или готовящихся валютных контрактах. Рассматривалась базовая конструкция ЭК без учета какого-либо специального оборудования или вооружения. С учетом такой проведенной проверки для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  были приняты значения  $K_1 = 2,1$  тыс. долл./т,  $K_2 = 2,6$  тыс. долл./л. с. При этом подстановка в (1) значений  $M = 1,1 \cdot 10^3$  т и  $P = 9 \cdot 10^5$  л. с. позволила получить для стоимости опытного образца «Орлана»  $C_o = \$235M$  (20 млн долларов США, или 18,8 млрд рублей). Заметим, что оцененная стоимость головного образца тяжелого экраноплана «Орлан» с современной системой управления оценена в 2,6 раза дешевле стоимости мощного атомного ледокола «Сибирь» для Арктики, уже поставленного Балтийским заводом за 50 млрд рублей. Всего таких ледоколов заказано пять с вводом их в эксплуатацию до 2026 г. На эти деньги можно было бы построить четыре ледокола и два экспериментальных ЭК с возможностью их всестороннего испытания (космические проекты, Арктические перевозки, МЧС) и последующего тиражирования. Стоимостью строительства космодрома «Восточный» в 180 млрд рублей можно было бы покрыть строительство десяти больших ЭК.

Конечно, в любом проекте возможны форс-мажорные обстоятельства, преодолимые только с увеличением финансирования. Именно комплекс управления связан с наибольшим числом

неопределенных факторов, создающих значительные риски проектирования. Но для создания мощного двигателя PD-35, примененного на больших ЭК, Ростеху уже выделено 180 млрд рублей [13], т. е. в 10 раз больше оценки стоимости «Орлана».

## Эффективность использования ЭК в космическом проекте

Описанный новый подход к построению космической транспортной системы «ВКС + ЭК» принципиально отличается от развитых сейчас систем НТНЛ и должен снизить стоимость космической транспортировки людей и грузов. Описаны и другие направления совершенствования космической техники, в том числе связанные с постепенным введением в строй нового российского космодрома «Восточный». Проанализированы особенности обеспечения безопасности космических аппаратов в штатных и аварийных режимах полета, при взлете и посадке. Показано, что возможность приземления и на море (Тихий океан), и на сушу усложняет поиск и эвакуацию посадочной капсулы или всего ВКС. Исследованы требования к ЭК, который может облегчить запуск и посадку ВКС. Произведено сравнение оценочной стоимости большого ЭК, стоимости постройки космодрома и стоимости постройки атомного ледокола, с которым ЭК может конкурировать при выполнении транспортных и иных операций в Арктике.

Посадка ВКС на экраноплан фактически включает в себя стыковку с летящим экранопланом на завершающем этапе снижения до высоты полета экраноплана – около 10 м со скоростью около 450 км/ч [3]. Важно понимать особенности такой стыковки, требования к системам абсолютной и относительной навигации, методам обеспечения требуемой точности и надежности относительной навигации при погрешности позиционирования 30 см на завершающем этапе сближения и стыковки. Считаем необходимым построить трехуровневую систему взаимного позиционирования: на основе абсолютной навигации ВКС и ЭК, системы относительной навигации ВКС и ЭК и отдельной быстродействующей системы позиционирования элементов стыковки на борту ЭК. Всего должно быть три стыковочных элемента, но только носовая часть должна иметь отдельную высокоточную высокоскоростную систему позиционирования. Для увеличения полезной нагрузки ВКС все атрибуты, необходимые для стыковки, должны быть размещены на борту ЭК.

Анализируются следующие варианты стыковки ВКС с экранопланом:

1) при выполнении космических полетов на орбите все топливо для двигателей ВКС израсходовано и создание управляющих воздействий двигателями ВКС невозможно. ВКС двигается в режиме планирования и может кратковременно сбрасывать вертикальную скорость, управляя закрылками;

2) возможно использование тяги двигателей ВКС для продления сроков стыковки. Этот вариант более надежен в реализации. Он похож на решение проблемы сближения двух самолетов для дозаправки, хотя конструкция стыковочных элементов нужна совсем другая. Однако избыток топлива возможен только за счет снижения полезной нагрузки. В связи с этим преимущества варианта 1) или 2) не очевидны и требуют исследования.

Значительная часть исследования посвящена системе навигации и управления экранопланом [8]. Решаются как частные задачи обеспечения устойчивости и безопасности полета ЭК, так и задача планирования его маршрута для своевременного прибытия в район посадки ВКС. ЭК находится на береговой базе, но должен вовремя прибыть в указанный для посадки ВКС район океана. К моменту стыковки ЭК должен иметь плоскопараллельную с ним траекторию движения. ЭК не должен изменять высоту полета над средним невозмущенным уровнем океана, но может немного контролировать свою путевую скорость, максимально долго выравнивая ее со скоростью ВКС. Это потребует комбинированного управления тягой двигателей экраноплана, закрылков и других органов управления экраноплана. При этом прецизионный контроль системы ВКС происходит при заходе на посадку и в процессе стыковки, что заставляет рассматривать интегрированную систему «ВКС + ЭК» как сложную многоаспектную многоконтурную цифровую систему управления [8, 12]. На завершающем этапе стыковки основным источником информации о взаимном расположении двух крылатых аппаратов является оптико-электронная система, включающая в себя три видеокamеры. Также нужна инерциальная система и спутниковая навигационная система (СНС), особенно на начальном этапе сближения.

Траектория и график движения ЭК после получения первой информации, а также время и место «посадки» ВКС (может быть постепенно уточнено) должны быть оптимизированы с учетом плохой маневренности тяжелого ЭК. Слишком раннее прибытие в заданный район не приветствуется, так как длительное пребывание в штормовом океане может привести к снижению технических возможностей ЭК. Но задержка абсолютно недопустима. Возникает проблема вероятностной

оценки успеха операции «Десант» с учетом всех факторов риска.

## Алгоритм оптимального маневрирования ЭК перед стыковкой с ВКС

Решение задачи посадки ВКС на ЭК следует начинать с расчета графика программной траектории спуска ВКС с низкой орбиты на водную поверхность до встречи с ЭК. В результате такого расчета траектории спуска ВКС определяются ожидаемые координаты подвижной точки встречи ВКС с ЭК, курс этой точки и время стыковки ВКС и ЭК. После определения всех параметров программной траектории назначается момент начала маневра снижения и приземления. При спуске из-за действия возмущений ВКС может отклоняться от программной траектории спуска, и состояние ВРУ ВКС в момент стыковки смещается. Чтобы обеспечить гарантированную посадку, необходимо повторно решать задачу прогнозирования параметров встречи. В результате этого прогноза происходит медленный дрейф момента стыковки и уточняются параметры подвижной точки встречи ВКС с ЭК. Предполагается, что эта информация используется для корректировки требуемого конечного состояния ЭК.

Рассмотрим процесс управления ЭК при спуске ВРУ ВКС. В процессе управления ЭК должен гарантированно прибыть в заданную точку пространства в заданный момент времени и двигаться в этот момент с заданной скоростью и курсом. Отметим, что эта задача аналогична задаче разделения потока самолетов по времени захода на посадку в условиях плотного графика посадки. В принципе, время прибытия можно контролировать, изменяя скорость полета, длину траектории или и то и другое. Вопросы формирования управления ЭК при одновременном изменении скорости и длины пути, а также закономерности управления скоростью по заданной траектории подробно изучались ранее [4]. В то же время при маневрировании ЭК в разрешенной зоне недопустимо изменение скорости и высоты полета в значительных пределах.

Для известного графика изменения скорости полета  $V(t)$  задача нахождения траектории, обеспечивающей необходимое время прибытия  $T$ , сводится к синтезу траектории заданной длины:

$$S = \int_0^T V(t) dt.$$

Определение параметров траектории заданной длины, соединяющей две точки плоскости, вообще говоря, не имеет однозначного решения,

так как таких траекторий много. Это обстоятельство позволяет учесть дополнительные факторы. С точки зрения удобства пилотирования, рационально выбирать траекторию простейшей структуры, например, состоящую из последовательности разворотов и участков с постоянным путевым углом. Структура траектории выбирается произвольно или определяется конфигурацией разрешенной зоны маневрирования. Важнейшим этапом полета является участок непосредственно перед стыковкой ЭК с ВКС. Желательно, чтобы в этой области внимание экипажей и средства автоматики были сосредоточены исключительно на коррекции относительного движения. Этого можно добиться только программным движением, соответствующим полету по прямой. По этой причине последний участок перед стыковкой должен быть максимально длинным и прямым. В этом случае полет по криволинейной траектории осуществляется только на начальном участке траектории и заканчивается за кратчайшее время, затем с подходом к контрольной точке на прямолинейном участке траектории формируются наиболее благоприятные условия, чтобы экипаж следил за ходом полета и готовился к следующему этапу. При решении задачи выявляется ряд других положительных свойств построения траектории по этому принципу. Поскольку полет по криволинейной траектории осуществляется только на начальном участке траектории и заканчивается за кратчайшее время, то с подходом к ЭК на прямолинейном участке траектории для экипажа складываются наиболее благоприятные условия для слежения за ходом полета и подготовки к следующему этапу. При решении задачи выявляется ряд других положительных свойств построения траектории по этому принципу.

Таким образом, задача оптимизации траектории ЭК перед стыковкой с ВКС разбивается на два этапа:

– на *первом этапе* необходимо как можно быстрее вывести ЭК на линию выполнения стыковки;

– на *втором этапе* при прямолинейном полете необходимо добиться максимальной точности прибытия в точку встречи с реальными внешними возмущениями и погрешностями измерений.

Причины отклонения точки посадки ВКС от прогноза могут быть следующими.

1. Отклонение может быть создано искусственно пилотом или системой управления в результате обнаружения в зоне посадки постороннего плавающего или летящего объекта, несмотря на объявление района ожидаемой посадки закрытым для всех видов транспорта. Конечно, объявление о закрытости должно быть подкреплено опреде-

ленными мерами юридического, технического и информационного характера.

2. Отклонение может быть вызвано сильными порывами ветра. Заметим, что порывы ветра будут действовать одновременно на два крыльевых аппарата, что не очень опасно в задаче сближения и стыковки.

3. Системы автоматического управления абсолютным движением ВКС и ЭК могут иметь каждая свои специфические ошибки навигации и управления, несмотря на близкое расположение в пространстве при сближении, что увеличивает смещение фактической точки посадки от спрогнозированной. Этот негативный фактор пропадает при переходе к системам относительной навигации и управления на заключительном этапе стыковки, обеспечивая их тесное сближение.

4. В статье в основном рассматривается первый этап управления траекторией как наиболее сложный. Пусть в начальный момент времени ЭК находится в точке с координатами  $x_0, y_0$  и имеет траекторный угол  $\psi_0$  (рис. 10).

Необходимо выйти на конечную ось (ось  $x$ ) и прийти в начало координат в момент времени  $T$ . Обозначим через  $\Delta S$  разность двух величин  $S$  и  $A_0$ :

$$\Delta S = S - A_0,$$

где  $A_0$  – проекция линии пути на ось  $x$ .

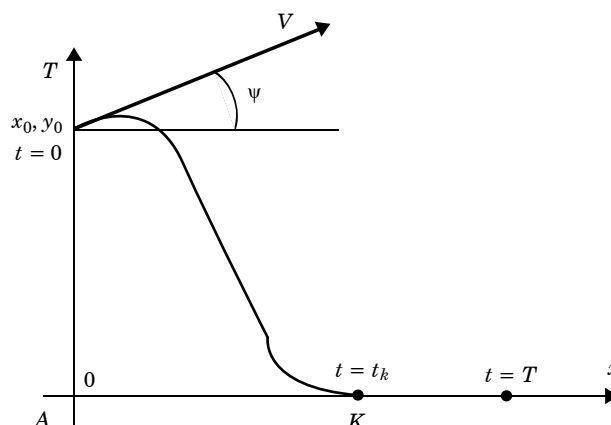
Тогда можно написать:

$$\Delta S = \int_0^T V(t)(1 - \cos \psi),$$

или

$$\Delta S = \int_0^{t_k} V(1 - \cos \psi)dt + \int_{t_k}^T V(1 - \cos \psi)dt, \quad (2)$$

где  $t_k$  – время выхода ЭК на ось  $x$ .



• Рис. 10. К расчету оптимального маневра  
 • Fig. 10. For calculation of optimal maneuver

Для интервала времени от  $t_k$  до  $T$ ,  $\psi = 0$  и  $\cos\psi = 1$ , поэтому второй член в уравнении (2) равен нулю, а само уравнение (2) принимает вид:

$$\Delta S = \int_0^{t_k} V(t)(1 - \cos\psi)dt. \quad (3)$$

Кинематические уравнения движения ЭК в горизонтальной плоскости записываются следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = V \cos\psi; \quad \frac{dz}{dt} = V \sin\psi; \quad \frac{d\psi}{dt} = \frac{g}{v}tg\gamma, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – эквивалентный угол крена, изменение которого управляет разворотом ЭК;  $g$  – ускорение свободного падения.

При маневрировании эквивалентный угол крена и, следовательно, радиус поворота ограничены, т. е.

$$|\gamma(t)| \leq \gamma_{\max}. \quad (5)$$

Требование выхода ЭК на конечную прямую за кратчайшее время математически формулируется в виде функционала:

$$J = \int_0^{t_k} dt. \quad (6)$$

Таким образом, эта задача формулируется в виде максимизации скорости с изопериметрическим ограничением (3) и ограничением (5). Воспользуемся известной методикой [7, 8] для решения задачи максимизации скорости без дополнительных ограничений. Поскольку  $x(t_k)$  свободен, опускаем первое уравнение системы (4), обозначая интеграл  $\int_0^{t_k} V(t)(1 - \cos\psi)dt$  через  $(\Delta S + x_1)$ , и введем дополнительное уравнение:

$$\frac{dx_1}{dt} = V(1 - \cos\psi). \quad (7)$$

При граничных условиях  $x_1(0) = -\Delta S$ ,  $x_1(t_k) = 0$ .

Для сокращения записи используем безразмерные значения:

$$\tau = \frac{t}{T_1}, \quad u = -\frac{tg\gamma}{\gamma_{\max}}, \quad \bar{x} = \frac{1}{T_1 V} x_1, \quad \bar{z} = \frac{1}{T_1 V} z_1.$$

Тогда уравнение (7) и два последних уравнения системы (4) перепишем так:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}_1(t)}{d\tau} &= (1 - \cos\psi(t)); \\ \frac{d\bar{z}(t)}{d\tau} &= \sin\psi(t); \quad \frac{d\psi(t)}{d\tau} = u(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда  $u(t)$  должно удовлетворять ограничению

$$|u(t)| \leq 1. \quad (9)$$

Начальные и конечные условия определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1(0) &= -\frac{\Delta S}{T_1 V}, \quad \bar{z}(0) = -\frac{z_0}{T_1 V}, \\ \psi(0) &= \psi_0 (-\pi < \psi_0 \leq \pi), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\bar{x}_1(T) = \bar{z}(T) = 0$ ;  $\psi(T) = 2\pi n$ ;  $n$  – целое число.

С учетом введенных обозначений задачу можно сформулировать следующим образом: по заданной системе дифференциальных уравнений (8) при начальных и конечных условиях (10) с допустимым управлением, удовлетворяющим неравенству (9), получить оптимальный закон управления, обеспечивающий минимизацию функционала качества (6). Используя принцип максимума Понтрягина, получаем, что оптимальное управление  $u_{\text{opt}}(t)$  должно удовлетворять равенствам

$$u_{\text{opt}}(t) = -\text{sign}(\lambda_3) \quad (11)$$

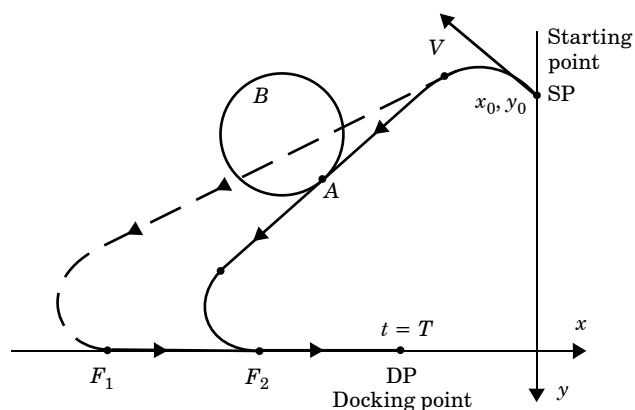
и  $1 + \lambda_1 - \lambda_1 \cos(\psi) + \lambda_2 \sin(\psi) + \lambda_3 u_{\text{opt}} = 0$ , здесь  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  являются решениями дифференциальных уравнений

$$\dot{\lambda}_1 = 0; \quad \dot{\lambda}_2 = 0; \quad \dot{\lambda}_3 = -\lambda_1 \sin(\psi) - \lambda_2 \cos(\psi), \quad (12)$$

которые являются неявными функциями начальных условий. Управляющее воздействие  $u_{\text{opt}}(t)$  определяется выражением (12). Если  $\lambda_3 \equiv 0$  в течение некоторого времени, то задача становится вырожденной и принцип максимума не дает информации об экстремальном управлении.

На участке траектории, где  $\lambda_3 = 0$ , согласно уравнениям (12), имеем:  $tg\psi = -\lambda_1 / \lambda_2$ . Значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  постоянные для этих начальных условий, поэтому  $\psi$  – величина постоянная, и, в силу уравнений (8), экстремальное управление на вырожденном интервале тождественно равно нулю. Следовательно,  $u_{\text{opt}}$  может принимать значения  $+1; 0; -1$ , которые соответствуют дугам окружностей и отрезкам прямых в плоскости  $xOz$ .

Для полной характеристики оптимальной структуры управления необходимо определить экстремальные траектории, количество необходимых управляющих переключений и суммарный угол поворотов для каждой траектории. Из экстремальных траекторий выбирается единственная оптимальная траектория с простейшей структурой. Она начинается с разворота от точки



• *Рис. 11. Сравнение оптимальной и одной из экстремальных траекторий*  
 • *Fig. 11. Comparison of the optimal and one of the extreme trajectories*

старта SP, второго разворота с выходом на конечную прямую до точки  $F_1$ .

На рис. 11 показана такая траектория SP  $F_1$  DP. Видно, что любые дополнительные повороты сокращают время конечного прямолинейного участка до выхода на конечную прямую (см. траекторию SP AB), а значит, функционал (6) будет увеличиваться. Минимизация времени выхода ЭК на конечную прямую обеспечивает максимальный запас полетного времени по прямолинейному участку от точки  $F_1$  до точки стыковки DP.

После определения структуры оптимального маневра, координат и курса, координат начальной и конечной точек, можно рассчитать промежуточные точки места (ПМ) для занесения их в бортовой компьютер.

### Управление относительным движением во время стыковки

Система относительной навигации принимает последовательность входных изображений с разрешением  $640 \times 480$  пикселей и выше, с глубиной цвета 8 бит (265 цветов). Необходимо не только конструктивно предотвратить выход из строя видеокамер из-за высокой температуры при аэродинамическом торможении, но и обеспечить многозапамятность их использования [6].

Эффективным средством измерения параметров относительного движения и расстояний является также технология РМД, заключающаяся в измерении времени прохождения световым сигналом расстояния между камерой и отражающей свет поверхностью, находящейся в поле зрения прибора. Для этого камеры освещают сцену модулированным инфракрасным светом, который

излучается с определенной частотой модуляции. Инфракрасный свет отражается от объектов сцены и измеряется светочувствительной матрицей камеры РМД. Должны быть задействованы и системы ближней радионавигации.

Система управления абсолютным движением ЭК должна обеспечивать его заданную траекторию и улучшать динамические свойства ЭК как объекта управления, особенно в отношении продольной устойчивости [9]. Нелинейный характер связей между отдельными каналами этой системы, интенсивные ветроволновые возмущения, необходимость особого режима дивергенции с надводными препятствиями и многие другие особенности придают специфику задаче оптимизации системы и повышают роль компьютерного моделирования в ее решении. Большая инерционность тяжелого катамарана ЭК при маневрировании по ходу заставляет заблаговременно выводить его на заданную линию прямолинейного движения и активно управлять только продольной скоростью. Высота полета ЭК при посадке ВКС должна быть жестко стабилизирована. Тогда сближение ЭК и ВКС по высоте и компенсация бокового смещения будут происходить при активной роли ВКС, а их сближение в продольной плоскости можно обеспечить маневрированием скорости ЭК. При сближении необходимо совмещать управление по отклонению с управлением возмущению [7, 12, 14].

Чтобы запустить ВКС, ЭК должен выполнить следующее:

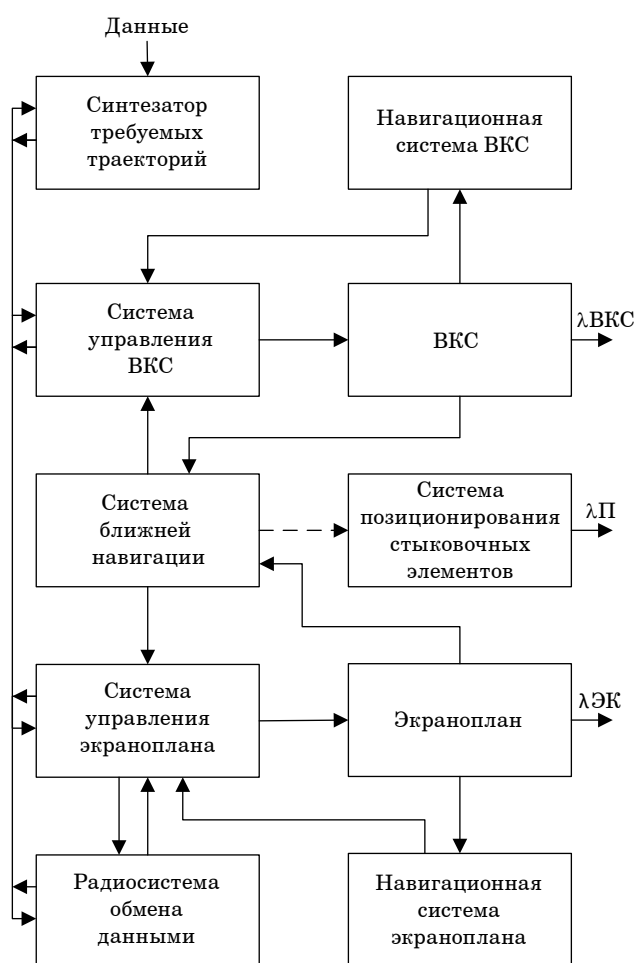
1) доставить ЭК в выбранную точку пуска, для чего совершить с ним перелет длиной в сотни километров и даже иногда в несколько тысяч километров;

2) заправить ВКС топливными компонентами с использованием его криогенной техники непосредственно перед запуском;

3) придать ВКС начальную скорость порядка  $M = 0,5-0,6$  на высоте около 10 м;

4) открыть три стыковочных элемента (носовой – последний) и отправить ВКС в самостоятельный полет.

Обобщенная схема многомерной системы автоматического управления взаимным движением при стыковке показана на рис. 12. Процесс стыковки должен осуществляться в комплексе управления движением, включающем в себя замкнутые схемы управления абсолютным движением ВКС и ЭК с матрицами контролируемых значений  $D_{ВКС}$  и  $D_{ЭК}$ , поэтому замкнутая схема управления относительным движением с матрицами контролируемых значений  $D_{ВКС}-D_{ЭК}$  и дополнительный разомкнутый канал локального перемещения стыковочного элемента вдоль и поперек должен быть очень точным и уменьшать погрешность до 20 см.



• Рис. 12. Обобщенная блок-схема комплекса управления  
 • Fig. 12. Generalised block-diagram of control complex

Траектория ВКС априори определяется синтезатором и описывается заданной функциональной матрицей данных  $D(t)$ . Навигационная система ВКС генерирует оценку фактической траектории  $D_{ВКС}(t)$ . Матрица  $D_{ВКС}(t)$  используется в законе управления. Оптимизация позволяет снизить норму матрицы  $D(t) - D_{ВКС}(t)$  и обеспечить высокую точность выдерживания траектории движения посадки посадочной палубы с матрицей выходных координат  $Dd$ . Этот канал местного позиционирования стыковочного элемента должен на завершающем этапе взаимного позиционирования обеспечивать ошибки лишь в пределах 2–3 м, а локальное позиционирование стыковочных элементов (особенно носового элемента) позволяет уменьшить ошибки до 20 см.

### Заключение

В статье проанализированы мировые достижения и перспективы дальнейшего развития

средств космического низкоорбитального запуска и посадки при учете, прежде всего, стоимостных показателей. Показано, что основным способом удешевления космических операций является обеспечение многозаказности большинства элементов космических систем запуска и посадки. Рассмотрены удачные, проверенные временем системы вертикального пуска ракет и различные системы вертикальной и горизонтальной посадки. Отмечено, что, несмотря на интенсивные исследования и разработки в разных странах по снижению удельной стоимости перевозки «Земля – околоземная орбита – Земля (или океан)», ее удалось снизить на десятки процентов, но не в разы, что позволило бы осуществить экономически выгодное освоение ближнего космоса, в том числе развитие там нанопроизводства для Земных нужд. Предпочтение при выборе проектов по-прежнему отдается не столько новизне, сколько надежности, безопасности и более быстрой экспериментальной отработке. Ни одна из существующих проверенных временем систем запуска и горизонтальной посадки не имеет явных преимуществ – все доказали свою надежность, но не подходят по стоимости. Крыльевые системы горизонтального запуска и мягкой посадки гарантируют многозаказность всех ступеней и элементов, поскольку возможна управляемая мягкая посадка на нескольких крыльях.

Центральной задачей в конкурентной борьбе за рынок космических запусков является создание многорежимного воздушно-реактивного двигателя для малозатратного прохождения земной атмосферы с использованием «свободного» кислорода при разгоне от малых до гиперзвуковых скоростей. Это позволило бы системе горизонтального запуска получить максимальные шансы стать самой перспективной, приблизившись к заманчивой концепции одноступенчатого воздушно-космического самолета. Стремительное совершенствование двигателей для гиперзвуковых истребителей позволяет надеяться на скорое создание такого одноступенчатого аппарата многократного использования. Существенный промежуточный прогресс в совершенствовании средств горизонтального спуска и посадки может быть достигнут при использовании тяжелого экраноплана в качестве бустерной и подвижной посадочной платформы для космического самолета. Сложность реализации этой прогрессивной идеи добавления полезной ступени в месте приземления космического аппарата (а также при его начальном разгоне) заключается в отработке надежной и безопасной стыковки двух крыльевых аппаратов после их сближения и выравнивания скоростей. Результаты моделирования процесса



сближения и стыковки продемонстрировали высокую точность систем автоматического управления обоих аппаратов и еще более высокую точность систем управления их относительным дви-

жением. Представлены постановка задачи синтеза и описание особенностей ее решения, а также обоснование требований к системам управления полетом.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tomita N., Nebylov A. V. et al. Performance and Technological Feasibility of Rocket Powered HTHL-STO with Take-off Assist // *Acta Astronautica*. 1999. Vol. 45, № 10. P. 629–637.
2. Nebylov A. V., Tomita N. Control Aspects of Aerospace Plane Docking with Ekranoplane for Water Landing // 14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Seoul, 1998. P. 389–395.
3. Nebylov A. V. WIG-Flight Automatic Control Principles, Systems and Application Advantages // 15<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Forli, Italy, 2001. P. 542–547.
4. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-Craft Marine Landing Control at Rough Sea // Proceedings of the 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul, Korea, 2008. P. 1070–1075.
5. Nebylov A. V., Wilson P. Ekranoplane – Controlled Flight close to Surface: monograph. UK: WIT-Press, 2002. 320 p.
6. Aerospace Sensors / eds by A. V. Nebylov. N.-Y.: Momentum Press, 2013. 350 p.
7. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-Craft Marine Landing Control at Rough Sea // Proceedings of the 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul, Korea, 2008. P. 1070–1075.
8. Aerospace Navigation Systems / eds by A. V. Nebylov, J. Watson. UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 420 p.
9. Nebylov A. V., Sharan S., Arifuddin F. Smart Control Systems for Next-Generation Autonomous Wing-In-Ground Effect Vehicles // IFAC Proceedings Volumes. 2010. Vol. 43, Is. 15. P. 112–117.
10. Небылов А. В., Небылов В. А. Российские экранопланы: новые перспективы международного сотрудничества // *Русский инженер*. 2013. № 4. С. 33–36.
11. Yum L., Bliault A., Doo J. WIG-craft and Ekranoplane. Springer-Verlag, 2010. 468 p.
12. Nebylov A. V. Ensuring Control Accuracy. Berlin: Springer, 2004. 244 p.
13. Nebylov A. V., Knyazhsky A. Y., Nebylov V. A. Optimization of 3D trajectory of the vehicle with dynamic principle of maintaining according to the criterion of minimum average true geometric altitude // *Advances in Theoretical & Computational Physics*. 2020. Vol. 3, Is. 3. P. 78–85.
14. Kornev N. On Unsteady Effects in WIG Craft Aerodynamics // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2019. Article ID: 8351293. Doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8351293>.

## REFERENCES

1. Tomita N., Nebylov A. V. et al. Performance and Technological Feasibility of Rocket Powered HTHL-STO with Take-off Assist. *Acta Astronautica*. 1999;45(10): 629–637.
2. Nebylov A. V., Tomita N. Control Aspects of Aerospace Plane Docking with Ekranoplane for Water Landing. 14<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Seoul, 1998, pp. 389–395.
3. Nebylov A. V. WIG-Flight Automatic Control Principles, Systems and Application Advantages. 15<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Forli, Italy, 2001, pp. 542–547.
4. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-Craft Marine Landing Control at Rough Sea. Proceedings of the 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul, Korea, 2008, pp. 1070–1075.
5. Nebylov A. V., Wilson P. Ekranoplane – Controlled Flight close to Surface: monograph. UK: WIT-Press; 2002. 320 p.
6. Aerospace Sensors; eds by A. V. Nebylov. N.-Y.: Momentum Press; 2013. 350 p.
7. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-Craft Marine Landing Control at Rough Sea. Proceedings of the 17<sup>th</sup> IFAC World Congress. Seoul, Korea, 2008. P. 1070–1075.
8. Aerospace Navigation Systems; eds by A. V. Nebylov, J. Watson. UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2016. 420 p.
9. Nebylov A. V., Sharan S., Arifuddin F. Smart Control Systems for Next-Generation Autonomous Wing-In-Ground Effect Vehicles. IFAC Proceedings Volumes. 2010; vol. 43, is. 15, pp. 112–117.
10. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Russian ekranoplanes: new perspectives in international cooperation. *Russian engineer*. 2013;(4):33–36. (In Russ.).
11. Yum L., Bliault A., Doo J. WIG-craft and Ekranoplane. Springer-Verlag; 2010. 468 p.
12. Nebylov A. V. Ensuring Control Accuracy. Berlin: Springer; 2004. 244 p.

13. Nebylov A. V., Knyazhsky A. Y., Nebylov V. A. Optimization of 3D trajectory of the vehicle with dynamic principle of maintaining according to the criterion of minimum average true geometric altitude. *Advances in Theoretical & Computational Physics*. 2020;3(3):78–85.
14. Kornev N. On Unsteady Effects in WIG Craft Aerodynamics. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2019. Article ID: 8351293. Doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8351293>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Небылов Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, член президиума Международной академии навигации и управления движением, член руководства Международного технического комитета IFAC Aerospace, член Генеральной ассамблеи Европейской конференции по аэрокосмическим наукам EUCASS, член Российского национального комитета по автоматическому управлению, директор Международного института передовых аэрокосмических технологий, профессор кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – навигация и управление движением.

**Небылов Владимир Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, генеральный директор Научно-инновационного центра «Аэрокос» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – навигация и управление движением, математическое моделирование.

**Панферов Александр Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – навигация и управление движением, гироскопия, инерциальные средства.

Поступила в редакцию 28.08.2022

Поступила после рецензирования 12.09.2022

Принята к публикации 15.09.2022

**Nebylov Alexander V.**, D. Sc. in Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Member of the Presidium of the International Academy of Navigation and Motion Control, Member of the Management Board of the International Technical Committee IFAC Aerospace, Member of the General Assembly of the European Conference on Aerospace Sciences EUCASS, Member of the Russian National Committee on Automatic Control, Director of the International Institute for Advanced Aerospace Technologies, Professor of the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – navigation and motion control.

**Nebylov Vladimir A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes, Director of the Aerokos Research and Innovation Center, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – navigation and motion control, mathematical modeling and simulation.

**Panferov Alexander I.**, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, Department of Operation and Control of Aerospace Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – navigation and motion control, gyroscope, inertial means.

Received 28.08.2022

Revised 12.09.2022

Accepted 15.09.2022

Научная статья  
УДК 681.1.003

## Поддержка принятия решений по построению систем эксплуатации авиатехники на базе интерактивных электронных технических руководств и методов компьютерного моделирования

Ян Альбертович Ивакин<sup>1-3</sup>

yan\_a\_ivakin@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1297-7404

Елена Александровна Фролова<sup>1</sup>

✉ frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Концерн «ОКЕАНПРИБОР», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Эффективность применения, развертывания, построения систем эксплуатации авиационной техники (СЭАТ) в значительной степени зависит от компетентности и своевременности решений, принимаемых техническим персоналом баз наземного обслуживания. Именно поэтому в исторической ретроспективе развитие соответствующих комплексов, средств наземного обслуживания сопровождалось разработкой адекватного инструментария поддержки принятия решений по их применению, оптимальному (рациональному) построению систем эксплуатации авиатехники на базе таких средств. Анализ опыта совершенствования такого инструментария, представлению роли интерактивных электронных технических руководств, методов компьютерного моделирования в современном процессе обоснования решений по построению указанных систем и определению путей развития методов компьютерного моделирования в интересах СЭАТ посвящена данная статья.

**Ключевые слова:** системы эксплуатации авиационной техники, интерактивные электронные технические руководства, построение системы, поддержка принятия решений, компьютерное моделирование, имитационное моделирование

**Благодарности.** Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке госбюджетной темы FFZF-2022-0004.

**Для цитирования:** Ивакин Я. А., Фролова Е. А. Поддержка принятия решений по построению систем эксплуатации авиатехники на базе интерактивных электронных технических руководств и методов компьютерного моделирования // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 1. С. 82–89.

Original article

## Decision support for building systems of aircraft operation based on interactive electronic technical manuals and computer modeling methods

Yan A. Ivakin<sup>1-3</sup>

yan\_a\_ivakin@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1297-7404

Elena A. Frolova<sup>1</sup>

✉ frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Concern «Oceanpribor» JSC, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> Saint Petersburg Federal Research Center Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The efficiency of application, deployment, and construction of aircraft equipment operation systems (AEOS) largely depends on the competence and timeliness of decisions made by the technical personnel of ground maintenance bases. That is why, in a historical retrospective, the development of appropriate complexes, ground handling facilities was accompanied by the development of adequate decision support tools for their application, for optimal (rational) construction of aircraft maintenance systems on the basis of such facilities. This article analyzes the experience of improving such tools, presents the role of interactive electronic technical manuals, computer modeling methods in the modern process of justifying decisions on the construction of these systems and identifies ways of developing computer modeling methods in the interests of AEOS.

**Keywords:** aircraft operation systems, interactive electronic technical manuals, system construction, decision support, computer modeling, simulation modeling

**Acknowledgements.** The research performed on this subject was supported by the state budget theme FFZF-2022-0004.

**For citation:** Ivakin Y. A., Frolova E. A. Decision support for building systems of aircraft equipment operation on the basis of interactive electronic technical manuals and computer modeling methods. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2022;1(1):82–89. (In Russ.).

## Введение

Оценка возможностей и выбор параметров функционирования средств авиационной техники и технического обслуживания аэрокосмического приборостроения, обеспечивающих наилучшие значения показателей их эффективности в конкретных условиях обстановки, – основа оптимизации построения и применения систем эксплуатации авиационной техники (СЭАТ).

Разработка и применение одиночных средств эксплуатации авиационной техники, функционирование которых основано на различных физических принципах, исторически всегда опиралось на предварительный анализ возможностей указанных средств в текущих или прогнозируемых условиях наземных баз планируемого применения. Для этого используется разнообразный инструментарий поддержки принятия решений по выбору параметров функционирования указанных средств, комплексов – от изготовленных печатным способом технических описаний-атласов, справочников операторов до современных систем поддержки принятия решений операторов на базе интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) пятого класса сложности, интегрированных в эксплуатационно-технические комплексы обслуживания самолетов и беспилотных летательных аппаратов.

Современный этап развития средств технического обслуживания авиационной техники, характеризующийся переходом в процессе их применения от использования отдельных средств, комплексов к построению пространственно-распределенных, динамически изменяемых систем комплексного обслуживания авиасудов различного масштаба и уровня, предъявляет качественно новые требования к соответствующим средствам поддержки принятия решений при проектировании и применении таких систем. В частности, значительно возрастают требования к наукоемкости применяемого методического аппарата обоснования решений, учету всей гаммы гетерогенных факторов логистической обстановки, а также к оперативности выработки рекомендаций [1, 2]. В свою очередь, компьютерное моделирование процессов, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом авиатехники, предусматривает реализацию не только классических методов математического (аналитического, статистического (имитационного, стохастического)) [3–5],

логики-инкрементального и пространственного моделирования [6], но и методов пространственного моделирования с использованием цифровых наборов данных складского учета, методов интеграции и слияния гетерогенных данных, методов работы с большими данными, методов интеллектуализации [7–9].

В условиях сетецентрического характера построения и применения СЭАТ, ориентации всей индустрии аэрокосмического приборостроения на достижение инфокоммуникационного единства в рассматриваемой предметной области, становится возможным определить основные направления развития методов компьютерного моделирования, специфичных для оценки и оптимизации возможностей указанных систем. Также необходимо наметить пути более полного внедрения ИЭТР и методов компьютерного моделирования, средств поддержки принятия решений на их базе, в состав перспективных комплексов – базовых элементов быстрого построения СЭАТ в различных условиях обстановки.

Детализация описания основных направлений развития специфичных для рассматриваемой предметной области ИЭТР и методов компьютерного моделирования как основы соответствующих средств поддержки принятия решения по построению вышеуказанных систем, а также путей их дальнейшего практического внедрения позволяет представить перспективу использования этих методов на стадии разработки и эксплуатации средств и систем технического обслуживания, ремонта авиационной техники.

## Эволюция методов и средств поддержки принятия решений по построению СЭАТ

Возможности средств технического обслуживания и ремонта авиатехники в значительной мере зависят от компетентностной и практической подготовленности специалистов, применяющих указанные средства. Именно поэтому развитие средств эксплуатации, диагностики и ремонта авиатехники (ЭДРА), в исторической ретроспективе, всегда сопровождалось эволюцией соответствующих средств (методов) поддержки принятия решений по их применению (оценке, выбору оптимальных режимов функционирования в текущих или прогнозируемых логистических условиях). При этом если предметное

содержание указанных средств (методов) поддержки принятия решений поступательно, экстенсивно увеличивалось и совершенствовалось, то формы видоизменялись от таблиц-справочников, схемотехнологических атласов до автоматизированных средств поддержки принятия решений операторов, в состав которых входят разнообразные базы данных по объекту ремонта (технического обслуживания), системы конструкторских расчетов и модели оптимизации, объединенные со специализированным интерфейсом. По существу, различным поколениям средств и комплексов ЭДРА соответствовали свои методы и инструментарий поддержки принятия указанных решений. В обобщенном виде это иллюстрируется данными таблицы. Форма же реализации указанной поддержки определяется базовыми технологиями работы с данными, формализованной информацией, которые доминируют на том или ином этапе в сфере самолетостроения и авиационного приборостроения.

Очевидно, что сегодня методы компьютерного моделирования впитали в себя весь опыт и логико-математический аппарат анализа и оценки возможностей средств ЭДРА, разработанные на предшествующих этапах совершенствования инструментария поддержки рассматриваемого класса решений. А современные интеллектуальные ИЭТР представляют собой мощные, формализованные базы компетенций, которые могут быть оперативно использованы в процессе эксплуатации (технического обслуживания и ремонта) авиатехники. Это делает совокупность ИЭТР и компьютерного моделирования высокоэффективной методологической основой для оперативного обоснования структур современных и перспективных СЭАТ.

Именно междисциплинарный характер технологии ИЭТР и компьютерного моделирования обеспечивает новое качество оценки текущих и прогнозируемых возможностей средств технического обслуживания, ремонта при поддержке принятия решений по построению СЭАТ. Сегодня технологические возможности компьютерного моделирования позволяют не только добиться автоматизации вычислений по соответствующим алгоритмам оценки эффективности действия средств ЭДРА, отдельных детерминированных и стохастических параметров СЭАТ и их элементов, но и добиться качественно новых возможностей в поддержке принятия решений по построению указанных систем. В частности, именно компьютерное моделирование, как программная реализация интеграции аналитических методов в логистике, методов информатики и технологий работы с цифровыми наборами пространствен-

ных данных, позволяет добиться визуального (наглядного) представления анализируемых зон контроля средств, узлов, агрегатов и приборов, а также оперативно осуществить оценку количественных характеристик таких зон.

Таким образом, совокупность технологий ИЭТР и компьютерного моделирования как программно-информационная интеграция ранее разработанных логико-математических и пространственных методов моделирования различных процессов на сегодняшний день представляет собой высокоэффективное научно-методическое средство для создания прикладного инструментария поддержки принятия решений по построению СЭАТ. Оно позволяет добиться сочетания высокой наукоемкости (сложности, многоаспектности) реализуемых расчетно-аналитических методик оценки возможностей СЭАТ с оперативностью принятия рассматриваемых решений. Данный вывод вытекает из ретроспективного анализа всего хода развития инструментария поддержки решений по применению средств ЭДРА.

### **Компьютерное моделирование при оценке и оптимизации возможностей СЭАТ**

Построение современных СЭАТ, которые включают в себя мобильную (в том числе и роботизированные средства) и стационарную (позиционную) составляющие, а также имеют возможность инфокоммуникационного взаимодействия с внешними гетерогенными источниками данных и глобальными системами, представляет собой многоступенчатый и итерационный процесс. Реализация такого процесса объективно требует многоуровневой поддержки принятия управленческих решений по формированию и оптимизации возможностей такой СЭАТ. Условно можно выделить следующие уровни принимаемых решений по формированию и оптимизации СЭАТ:

- 1) оценка возможностей и оптимизации параметров средств ЭДРА;
- 2) анализ возможностей комплексов (совокупностей) средств ЭДРА, как связанных с единым носителем (производственно-ремонтной единицей), так и в пространственно-распределенных подсистемах СЭАТ;
- 3) оценка и оптимизация (рационализация) возможностей СЭАТ в конкретных условиях логистической обстановки при проведении технических диагностико-поисковых, поисково-ремонтных и обслуживающих операций (действий).

- Соответствие поколений в развитии средств ЭДРА и методов (инструментария) поддержки принятия решений по применению указанных средств
- Correspondence of generations in the development of ODRR tools and decision support methods (tools) for the use of these tools

Условный номер поколения средств	Идентификатор класса средств ЭДРА	Обобщенная характеристика возможностей средств ЭДРА	Реализуемые методы (в том числе модели, методики) поддержки принятия решений по применению средств ЭДРА	Реализуемая форма исполнения инструментария поддержки принятия решений по применению средств ЭДРА
I	Станции диагностики и поиска неисправностей (СДГ АС)	Отдельные технические устройства, позволяющие проводить обслуживание, диагностику и ремонт узлов и агрегатов самолетов	Методики оценки технического состояния отдельных узлов, приборов и агрегатов самолетов, организации типизированных вариантов поиска, предупреждения и устранения неисправностей	Чертежно-технологические атласы по устройству узлов и приборов самолета. Справочники оператора-техника и формализованные бланки контроля проведения технических работ
II	Комплексы технического обслуживания и ремонта авиационных судов (КТО АС)	Приборные комплексы, использующие различные устройства, режимы, каналы различных типов, а также средства измерения характеристик приборов воздушного судна в текущих, назначенный и прочие моменты времени	Алгоритмизированные методы прикладных расчетов, обеспечивающие оптимизацию различных действий при поиске неисправностей, классификации и локализации местоположения отказа, при которых обеспечиваются наилучшие параметры скорости обнаружения; алгоритмизированные методики решения прямой и обратной задач диагностики, поисковых задач	Специализированные аппаратно-программные средства – системы диагностических расчетов. Индикаторы технического состояния и фактов наличия неисправностей
III	Интегрированные системы поддержки эксплуатации летательных аппаратов	Системы, создаваемые на базах межполетного ремонта и обслуживания, за счет интеграции средств (приборных компонент), функционирование которых основано на различных физических принципах, вычислительных средств диагностики и других средств эксплуатации	Методы и модели комплексирования данных от различных бортовых средств контроля технического состояния; методы третичной (интерпретация) обработки информации, поступающей от различных источников; методы учета схемотехнической неоднородности приборно-аппаратной среды	Интегрированные в состав производственно-ремонтных систем программно-информационные средства поддержки принятия решений по оптимизации параметров обслуживания и ремонта летательных аппаратов
IV	Компоненты интегрированных систем аэродромного обслуживания и поддержания летной годности	Подсистема технической диагностики, поиска неисправностей, технического обслуживания и ремонта летательных аппаратов, в составе интегрированных систем аэродромного обслуживания и поддержания летной годности	Методы и модели оптимизации применения средств диагностики и ремонта с учетом ретроспективы жизненного цикла летательного аппарата. Методы гармонизации, интеграции и слияния данных от гетерогенных источников информации; методы визуального представления и привязки данных; методы анализа угроз и оценки рисков	Интегрированные программно-информационные средства поддержки принятия решений по оптимизации параметров применения средств ЭДРА в складывающейся производственно-технической ситуации
V	Системы эксплуатации летательных аппаратов	СЭАТ, формируемая как средствами самого летательного аппарата, так и средствами баз технического обслуживания	Методы сетцентрической обработки данных СЭАТ; методы интеллектуализации при интерпретации результатов диагностики; методы компьютерного моделирования всех аспектов предметной области ЭДРА	Специализированные программные комплексы с элементами искусственного интеллекта, интегрированные в состав прикладного программного обеспечения ИЭТР, в том числе его роботизированных средств контроля и ремонта летательного аппарата

Необходимо раскрыть существо реализуемых моделей и методов вышеуказанной поддержки принятия решений на каждом из продекларированных уровней.

На первом уровне принимаются, по существу, проектные решения по созданию конструктива и других элементов конкретных средств ЭДРА. Целями поддержки таких решений являются поиск и обоснованный выбор технических схем, конструктива для проектируемых, создаваемых и (или) модернизируемых средств. Основными методами компьютерного моделирования, нашедшими свое применение при поддержке указанных решений первого уровня, являются:

- информационно-программные технологии создания и интеллектуализации ИЭТР пятого класса сложности;

- аналитические методы расчета технических параметров элементов, узлов, блоков, составных частей для средств ЭДРА, реализованные на практике в виде специализированных пакетов прикладных программ, либо в качестве динамически-подгружаемых библиотек для универсальных сред математического (MathCad, Maple или MatLab), логико-инкрементального (ANSYS, SolidWorks, Autodesk Inventor) или имитационного (JPSS, AnyLogic) моделирования;

- методики конструктивного проектирования узлов, агрегатов, приборов для средств ЭДРА из конечных элементов, реализованные как соответствующие элементы той или иной информационной CALS-технологии в соответствующих программных CAD-средах проектирования и разработки (SolidWorks или «КОМПАС»), CAE-средах инженерного анализа (ABAQUS) и (или) САМ-средах технологической подготовки производства;

- модели аналитической оценки эффективности проектируемых конструктивных решений для приведенных внешних условий, реализуемые как соответствующие программные утилиты для сред разработки.

Сегодня широкое распространение при поддержке решений первого уровня получила концепция цифровых двойников создаваемых и исследуемых средств ЭДРА. Под «цифровым двойником средств ЭДРА» понимается информационно-аналитическая (цифровая) модель-копия проектируемого объекта из состава СЭАТ или соответствующего процесса, помогающая наглядно представить и оптимизировать функционирование этого объекта (процесса) в СЭАТ. Цифровые двойники конкретных средств ЭДРА, как правило, очень детально представляют в цифровом и аналитическом виде конструктив и особенности функционирования исходного («копируемого»

реального объекта. Это позволяет сегодня говорить о том, что при современном уровне автоматизации процессов проектирования первоначально разрабатывается и оптимизируется цифровой двойник (первоначальная модель) создаваемого средства ЭДРА, а уже в дальнейшем по нему изготавливается реальное техническое средство.

При принятии решений по формированию и оптимизации СЭАТ второго уровня вырабатываются наиболее эффективные результаты комплексирования средств с различными параметрами и физическими принципами информационно-компетентностной поддержки, диагностики и неразрушающего контроля в рамках единой СЭАТ. Целью поддержки таких решений является предоставление аналитического и имитационного инструментария анализа и синтеза различных вариантов вышеуказанного комплексирования, с возможностью быстрой оценки достигаемых параметров прикладной эффективности.

В отличие от решений по формированию и оптимизации СЭАТ первого уровня, ориентированных в большей степени на процессы проектирования и разработки элементов указанных систем – средств ЭДРА, решения и инструментарий поддержки второго уровня ориентированы на процессы практического применения этих систем.

Высший уровень в поддержке принятия решений по формированию и оптимизации СЭАТ – оценка и оптимизация (рационализация) возможностей СЭАТ в конкретных условиях логистической обстановки при проведении технических диагностико-поисковых, поисково-ремонтных и обслуживающих операций (действий). Целями поддержки принятия решений на этом уровне являются обеспечение оперативного конфигурирования СЭАТ в зависимости от меняющихся условий логистической обстановки, анализ угроз и оптимизация функционирования этой системы при решении практических, прикладных задач.

Основными методами синтеза ИЭТР и компьютерного моделирования, нашедшими свое применение при поддержке указанных решений третьего уровня, являются:

- аналитические методы расчета обеспечиваемых технических параметров комплексных систем технического обслуживания, ремонта и значений соответствующих показателей эффективности;

- имитационные модели и методики оценки вероятностных показателей эффективности СЭАТ в зависимости от гаммы учитываемых случайных событий и процессов;

- методы, информационные технологии глубокой интеграции гетерогенной информации

и пространственного моделирования с использованием цифровых наборов пространственных данных;

– методы визуально-пространственного представления и координирования.

На практике вышеуказанные методы ИЭТР и компьютерного моделирования реализуются в виде специального прикладного программного обеспечения, интегрирующего в себе всю гамму вышеописанных методов и технологий. Столь высокий и глубокий уровень интеграции позволяет моделировать многоаспектные технические диагностико-поисковые, поисково-ремонтные и обслуживающие операции (действия) с учетом всего многообразия факторов, влияющих на возможности СЭАТ, с целью не только получения оценки их характеристик, но и оптимизации приемов их применения.

Таким образом, современные методы и информационные технологии ИЭТР, компьютерного моделирования являются методологически упорядоченным и практико-ориентированным инструментарием, позволяющим генерализовать всю совокупность количественных методов анализа показателей эффективности и оценки возможностей средств ЭДРА для поддержки принятия решений по формированию и оптимизации соответствующих СЭАТ. При этом учитывается широкая гамма средств ЭДРА, их комплексов и многофакторность логистической среды.

### **Пути развития методов ИЭТР и компьютерного моделирования в интересах СЭАТ**

Во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 20 июля 2016 № 347 в 2019 г. в стране сформирован ряд приоритетных технологических направлений, которые ставят своей целью развитие как технологий аэрокосмического сектора, так и системного моделирования. При этом под приоритетным технологическим направлением понимается комплекс взаимосвязанных технологий (технологических проектов, программ), которые могут быть использованы для разработки новых (перспективных) образцов (комплексов, систем) специализированной техники. В рамках работ этих приоритетных технологических направлений развивается ряд проектов по совершенствованию и специализации методов, средств и информационных технологий компьютерного моделирования в интересах СЭАТ на базе возможностей современных ИЭТР пятого класса сложности. Полноценная реализация этого проекта позволит создать эффективную

систему поддержки принятия решений в рамках указанных технологических направлений, разработчиков и конструкторов образцов соответствующей техники как стенда для многоуровневого компьютерного моделирования различных версий СЭАТ – от отдельных элементов средств ЭДРА до полноценных систем для разрешения многоэтапных, многокомпонентных логистически-производственных ситуаций ремонта сложной авиатехники.

Программно-техническое исполнение указанного стенда объективно предполагает исполнение, с учетом классификации, всех предусматриваемых моделей по формированию и оптимизации СЭАТ. Это позволяет добиться широкой его применимости как для процессов проектирования средств ЭДРА, их компонентов и составных частей, так и для автоматизации предметной области формирования и применения СЭАТ в условиях реальной обстановки.

Очевидно, что воплощение в жизнь указанного стенда компьютерного моделирования придаст импульс развитию бортовых систем поддержки принятия решений по применению конкретных средств ЭДРА. Основными направлениями такого развития являются:

– дальнейшая интеграция указанных систем с датчиковой аппаратурой бортовых средств контроля;

– совершенствование их программного и информационного обеспечения с учетом возможностей развития информационной технологии представления и обработки диагностико-пространственных данных;

– учет сетецентрического характера обмена и обработки информации по логистической обстановке в условиях современного понимания межполетного и аэродромного обслуживания летательных аппаратов и др.

Стремительное развитие методов и средств совершенствования авиационных технологий и технологий аэрокосмического приборостроения, в условиях набирающей обороты цифровизации всех аспектов современного производства, предъявляет качественно новые требования к развитию самих методов моделирования процессов этой предметной области. В частности, перспективные тренды развития глобальной информационной технологии объективно задают новые горизонты в определении требуемых возможностей ИЭТР и компьютерного моделирования в интересах СЭАТ. К таковым трендам следует отнести следующие:

– всесторонняя интеллектуализация, т. е. широкое внедрение адаптивных методов и средств искусственного интеллекта (ИИ), прежде всего,



методов и технологий ИИ на основе глубоких сверточных нейросетей. Указанное внедрение в ИЭТР и системы компьютерного моделирования позволит не только получать количественные и качественные оценки проектов сложных технических и тактических решений, но и быстро распознавать складывающиеся при эксплуатации авиатехники логистические ситуации в реальном масштабе времени, эффективно интерпретировать результаты моделирования в СЭАТ;

– применение моделей и методов моделирования, оценки количественных возможностей на базе «мягких вычислений». Гетерогенность источников информации, данные от которых все в большей степени используются для обеспечения адекватности компьютерного моделирования реальным процессам в предметной области СЭАТ, диктует необходимость обработки нечисловой, неточной, неполной и нечеткой информации. Обработка такой информации основывается на использовании математического аппарата нечетких множеств, теории возможностей, лингвистических переменных и пр. Дальнейшее применение такого математического аппарата приведет к созданию принципиально нового класса компьютерных моделей предметной области СЭАТ и, соответственно, новых возможностей в поддержке решений по применению этих систем;

– расширение возможностей по высокоточному пространственному (в том числе 3D-визуальному) моделированию процессов и явлений предметной области СЭАТ на основе более широкого применения разнотематических наборов пространственных данных;

– учет новейших тенденций в развитии мировой софтверной индустрии: совершенствование парадигмы объектно-ориентированного программирования, выработка методологии работы с большими данными (Big Data); развитие концепции сетевидности на принципах многопоточковой обработки информации; становление технологий обработки неопределенно структурированных массивов данных, реализуемых так называемыми горизонтально масштабируемыми программными средствами; внедрение предконфигурированных решений на базе сервер-кластеров для массово-параллельной обработки

данных; эволюция методов параллельного программирования для мультипроцессорных систем в интегральных информационных сетях массового обслуживания и др.

Развитие методов ИЭТР и программно-информационных технологий моделирования предметной области СЭАТ также даст толчок для развития таких смежных исследовательских областей, как моделирование задач применения средств информационно-компетентной поддержки эксплуатантов, задач оценки и обеспечения эффективности мероприятий технического обслуживания, вопросов оптимизации усилий поиска и устранения неисправностей при проведении ремонтных, модернизационных операций на объектах авиационной техники.

## Заключение

Совершенствование методов ИЭТР и компьютерного моделирования СЭАТ по вышеописанным направлениям, как основы соответствующих средств поддержки принятия решения по построению вышеуказанных систем, обеспечивает новое качество проектирования, оперативной оценки и оптимизации возможностей средств поддержания эксплуатационной готовности авиационной техники. Это качество создает условия для реализации эффективных средств и систем ЭДРА в практической деятельности воздушного флота страны.

Дальнейшее совершенствование описанных направлений ИЭТР и методов компьютерного моделирования предметной области СЭАТ есть одна из сфер деятельности соответствующего приоритетного технологического направления. Реализация поддержки принятия решений по построению систем эксплуатации авиационной техники на базе ИЭТР и методов компьютерного моделирования является актуальной и разрешаемой задачей, стоящей на повестке дня отечественной отрасли аэрокосмического приборостроения. Ее решение открывает новые перспективы для совершенствования методов и форм проектирования, создания, применения перспективных средств ЭДРА, оперативного формирования соответствующих систем на их базе.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Qualimetric model for assessing the impact of the level of development of corporate information systems on the quality of aerospace instrumentation / A. Ovodenko, Y. Ivakin, E. Frolova, M. Smirnova // E3S Web of Conferences 220. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. SES 2020. 2020. С. 01017.
2. *Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.

3. *Советов Б. Я., Яковлев С. А.* Моделирование систем. М.: Радио и связь, 1985. 238 с.
4. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем. М.: Мир, 1978. 254 с.
5. *Goodfellow I., Bengia Y., Courville A.* Deep Learning. London; Cambridge: MIT Press, 2016. 800 p.
6. Аппаратное ускорение глубоких нейросетей: GPU, FPGA, ASIC, TPU, VPU, IPU, DPU, NPU, RPU, NNP и другие буквы. URL: <https://habr.com/ru/post/455353/> (дата обращения: 21.05.2022).
7. *Нилсен М.* Нейросети и глубокое обучение. Гл. 3, ч. 1: Улучшение способа обучения нейросетей. URL: <https://habr.com/ru/post/458724/> (дата обращения: 22.05.2022)
8. *McConnel S.* Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices). N.-Y.: MicrosoftPress, 2006. 610 p.
9. *McConnel S.* Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction. N.-Y.: MicrosoftPress, 2014. 889 p.

## REFERENCES

1. Ovodenko A., Ivakin Y., Frolova E., Smirnova M. Qualimetric model for assessing the impact of the level of development of corporate information systems on the quality of aerospace instrumentation. E3S Web of Conferences 220. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. SES 2020. 2020, pp. 01017.
2. Nikolenko S., Kadurin A., Arhangel'skaya E. In-depth training. SPb.: Piter; 2018, 480 p. (In Russ.).
3. Sovetov B., Yakovlev S. Systems Modeling. Moscow: Radio and Communications; 1985; 238 p. (In Russ.).
4. Shannon R. Simulation modeling of systems. Moscow: Mir; 1978, 254 p. (In Russ.).
5. Goodfellow I., Bengia Y., Courville A. Deep Learning. London, Cambridge, MIT Press; 2016, 800 p.
6. Hardware acceleration of deep neural networks: GPU, FPGA, ASIC, TPU, VPU, IPU, DPU, NPU, RPU, NNP and other letters. Available from: <https://habr.com/ru/post/455353/> [Accessed 21 May 2022].
7. Nilsen M. Neural Networks and Deep Learning, Chapter 3, Part 1: Improving the Way Neural Networks Learn. Available from: <https://habr.com/ru/post/458724/> [Accessed 22 May 2022].
8. McConnel S. Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices). New-York, MicrosoftPress; 2006, 610 p.
9. McConnel S. Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction. New-York: MicrosoftPress; 2014, 889 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ивакин Ян Альбертович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы и модели сбора, получения и представления пространственных данных о состоянии и функционировании транспортных систем.

**Фролова Елена Александровна**, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы управления качеством сложных технических систем.

Поступила в редакцию 09.07.2022

Поступила после рецензирования 19.08.2022

Принята к публикации 15.09.2022

**Ivakin Yan A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Professor, Professor, the Chair of Innovatics and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods and models for collecting, obtaining and presenting spatial data on the state and functioning of transport systems.

**Frolova Elena A.**, D. Sc. in Technical Sciences, Assistant Professor, Professor, Head of the Department, the Chair of Innovatics and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods of quality management of complex technical systems.

Received 09.07.2022

Revised 19.08.2022

Accepted 15.09.2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

**Окрепилов В. В.** Развитие цифровой метрологии – путь в новое качество экономики ... 7

**Пронин А. Н., Сапожникова К. В., Тайманов Р. Е.** Революция в метрологии как отражение цифровизации в приборостроении ..... 17

**Кузин А. Ю., Крошкин А. Н.** Искусственный интеллект как один из элементов цифровой трансформации в метрологии ..... 27

**Денисенко С. А., Кузин А. Ю., Красавин И. В., Фролова Ю. Л.** Цифровая трансформация информационной составляющей метрологии ..... 36

**Назаревич С. А., Тушавин В. А., Фролова Е. А.** Бережливая цифровизация организационных систем ..... 44

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Соломичев Р. И., Соломичева С. В.** Исследование метрологических характеристик инновационного ультразвукового плотномера газа Turbo Flow UDM ..... 54

**Небылов А. В., Небылов В. А., Панферов А. И.** Концепция морской горизонтальной посадки крыльевого космического аппарата путем стыковки с экранопланом ..... 65

**Ивакин Я. А., Фролова Е. А.** Поддержка принятия решений по построению систем эксплуатации авиатехники на базе интерактивных электронных технических руководств и методов компьютерного моделирования ..... 82

## CONTENTS

### INSTRUMENTATION, METROLOGY, STANDARDIZATION AND QUALITY MANAGEMENT

**Okrepilov V. V.** The development of digital metrology is the way to a new quality of the economy ..... 7

**Pronin A. N., Sapozhnikova K. V., Taymanov R. E.** The metrology revolution as a reflection of digitalisation in instrumentation ..... 17

**Kuzin A. Yu., Kroshkin A. N.** Artificial intelligence as one of the elements of digital transformation in metrology ..... 27

**Denisenko S. A., Kuzin A. Yu., Krasavin I. V., Frolova Ju. L.** Digital transformation of the information component of metrology ..... 36

**Nazarevich S. A., Tushavin V. A., Frolova E. A.** Lean digitalization of organizational systems ..... 44

### FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLIED RESEARCH

**Solomichev R. I., Solomicheva S. V.** Metrological characteristics investigation of innovative ultrasonic gas density meter Turbo Flow UDM ..... 54

**Nebylov A. V., Nebylov V. A., Panferov A. I.** The concept of winged space vehicle marine horizontal landing by docking with ekranoplane ..... 65

**Ivakin Y. A., Frolova E. A.** Decision support for building systems of aircraft operation based on interactive electronic technical manuals and computer modeling methods ..... 82

## Требования к порядку представления рукописей для публикации в научном журнале «Инновационное приборостроение»

1. Для публикации в журнале принимаются оригинальные научные материалы, не публиковавшиеся ранее и соответствующие тематической направленности журнала и критериям научного качества, представляющие интерес для научного сообщества. Авторы представляют в редакцию бумажную и электронную версии статьи в формате Microsoft Word (файл «Структура статьи и образец ее оформления» находится на сайте: <https://fs.guar.ru/inps/obr.pdf>). Заключение пишется в повествовательном стиле, не разбивается на пункты. Выводы должны быть лаконичными и точными, состоять из нескольких пронумерованных пунктов. Обычно количество пунктов соответствует количеству поставленных задач.

2. Объем статьи не должен быть менее 12 000 знаков с пробелами (7–8 машинописных страниц) и не должен превышать 40 000 знаков с пробелами (22–23 машинописные страницы).

Распечатка статьи должна быть подписана всеми авторами с указанием даты ее отправки.

3. К рукописи статьи должны прилагаться две рецензии (внутренняя и внешняя), заключения экспертной комиссии и комиссии экспортного контроля, отчет о проверке на наличие заимствований (процент оригинальности статьи должен составлять не менее 80).

4. При оформлении статьи необходимо придерживаться следующей структуры информации, представленной **на русском и английском языках**:

– фамилия, имя и отчество автора(-ов) полностью; ученая степень, ученое звание, почетное звание (если имеются); должность, название учреждения(-ий), в котором выполнена работа; город, где находится учреждение(-ия), страна. Если рукопись подается от нескольких учреждений, их следует пронумеровать надстрочно и так же пронумеровать авторов статьи. Необходимо указать телефоны, адреса электронной почты, ORCID авторов (при наличии); одного из авторов следует указать в качестве ответственного за переписку;

– индекс УДК. Помещают в начале статьи на отдельной строке слева;

– заглавие статьи;

– аннотация / Abstract. Объем ограничен 250 словами, использование ссылок и аббревиатур не допускается;

– ключевые слова / Keywords. У статьи может быть от 3 до 15 ключевых слов. Термины-словосочетания считаются одним ключевым словом.

5. В конце статьи размещается список источников / Referenses на русском и английском языках. Список источников и ссылки на них оформляют по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографические записи в перечне нумеруют и располагают в порядке цитирования источников в тексте статьи. Referenses оформляют согласно стилю Vancouver (файл «Основные правила оформления Referenses в стиле Vancouver» расположен на сайте: <https://fs.guar.ru/inps/vancouver.pdf>).

### **Краткие технические требования к оформлению статьи**

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и список источников) не должен превышать 22–23 страниц машинописного текста формата А4, набранных на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 14, поля не менее 2 см.

Простые **формулы** следует набирать в Word, сложные – с помощью редактора MathType или Equation. В десятичных дробях ставятся запятые. Для набора одной формулы не используйте два редактора одновременно. При наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой. Номер формулы (если он есть) набирается в тексте справа от формулы в скобках, не в формульном редакторе, не в таблице. Нумеруются те формулы, на которые в тексте имеются ссылки. При нумерации формул рекомендуется пользоваться десятичной системой.

При наборе формулы используйте только настройки по умолчанию; никогда не пользуйтесь вкладкой Size, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = – ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» – «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что латинские набираются светлым курсивом, русские и греческие – светлым прямым, векторы и матрицы – прямым полужирным шрифтом.

#### **Иллюстрации:**

– рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, они должны быть выполнены в векторных программах: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Adobe Illustrator (\*.ai); Coreldraw (\*.cdr, версия не выше 15); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

– фотографии и скриншоты – в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Графические материалы (рисунки, схемы, иллюстрации) должны иметь последовательные порядковые номера, подписанные на русском и английском языках (Рис. 1 / Fig. 1), обязательные ссылки в тексте. Условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном тексте статьи или подрисуночной подписи.

**Таблицы** должны иметь последовательные порядковые номера, названия на русском и английском языках (Таблица 1 / Table 1), ссылки в тексте. Для всех показателей в таблице необходимо указать единицы измерений по СИ, ГОСТ 8.417-2002.

Полный перечень технических требований расположен на сайте: [https://fs.guar.ru/inps/tech\\_tr.pdf](https://fs.guar.ru/inps/tech_tr.pdf).

**Рукописи, не соответствующие указанным требованиям,  
не рассматриваются**

**Автор несет полную ответственность за точность и достоверность данных, приведенных в рукописи статьи,  
присылаемой в редакцию журнала**