

ВЕСТНИК
ЮГОРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ВЫПУСК 3(62)/2021

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-73606 от 31 августа 2018 г.

г. Ханты-Мансийск
2021 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА»

Лапшин Валерий Федорович – главный редактор, доктор юридических наук, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», v_lapshin@ugrasu.ru, +7 (3467) 377-000 (доб. 559);

Шарова Полина Сергеевна – ответственный секретарь редакционной коллегии, заведующий единой редакцией научных журналов ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», p_sharova@ugrasu.ru, +7 (3467) 377-000 (доб. 421).

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки):

Пятков Сергей Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», ответственный редактор по научной отрасли/специальности;

Быстров Виталий Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института информатики и математического моделирования – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» (по согласованию);

Вохминцев Александр Владимирович – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интеллектуальные информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» совместно с ФИЦ «Информатика и управление Российской академии наук Института системного анализа» (по согласованию);

Попков Юрий Соломонович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор Института системного анализа Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук»; ведущий научный сотрудник кафедры систем обработки информации, моделирования и управления ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Мельников Андрей Витальевич – доктор технических наук, профессор базовой кафедры ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет» на базе АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий», директор АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»;

Полищук Юрий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий» (по согласованию);

Кожанов Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор ФГБУН «Институт математики имени С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук»;

Халиуллина Дарья Николаевна – кандидат технических наук, научный сотрудник Института информатики и математического моделирования – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» (по согласованию).

05.16.00 Metallurgy and materials science by specialty 05.16.09 Materials science (by industry) (technical sciences):

Гуляев Павел Юрьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», ответственный редактор по научной отрасли/специальности;

Баев Владимир Константинович – доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук» (по согласованию);

Бороненко Марина Петровна – кандидат технических наук, доцент Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Долматов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент Института цифровой экономики ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Иордан Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент Института цифровых технологий, электроники и физики ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет» (по согласованию);

Алымов Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Директор ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН) РАН»;

Котванова Маргарита Кондратьевна – кандидат химических наук, доцент Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Милюкова Ирина Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент Института нефти и газа ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

12.00.00 Юридические науки по специальности 12.00.08 Уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное (юридические науки):

Розенко Станислав Васильевич – кандидат юридических наук, директор Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», ответственный редактор по научной отрасли/специальности;

Авдеев Вадим Авдеевич – доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного права и уголовного процесса Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»;

Козаченко Иван Яковлевич – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовного права ФГБОУ ВО «Уральский государственный юридический университет» (по согласованию);

Рарог Алексей Иванович – доктор юридических наук, профессор научный руководитель кафедры уголовного права ФГБОУ ВО «Московский государственный Юридический университет имени О. Е. Кутафина» (по согласованию);

Кибальник Алексей Григорьевич – доктор юридических наук, профессор заведующий кафедрой уголовного права и процесса ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (по согласованию);

Шеслер Александр Викторович – доктор юридических наук, профессор кафедры уголовного права ФКОУ ВО «Кузбасский институт Федеральной службы исполнения наказаний», профессор кафедры уголовного права ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»;

Наваан Гантулга – кандидат юридических наук, профессор, начальник Института исполнения судебных решений МНР (по согласованию);

Сергеев Владимир Анатольевич – доктор юридических наук, профессор, директор Центра прикладного уголовного правосудия, профессор Школы правоохранения и управления юстицией Западного Иллинойского университета (по согласованию);

Понятовская Татьяна Григорьевна – доктор юридических наук, профессор, профессор кафедры уголовного права ФГБОУ ВО «Московский государственный юридический университет имени О. Е. Кутафина» (по согласованию);

Анисимов Валерий Филиппович – доктор юридических наук, профессор кафедры правоохранительной деятельности и адвокатуры Юридического института ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

ISSN 1816-9228 (печатная версия)

ISSN 2078-9114 (электронная версия)

Журнал издается с 2005 года

Журнал включен в РИНЦ

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
Science Index 

© ФГБОУ ВО «Югорский
государственный университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Колонка главного редактора	7
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	9
Гимранов И. Р., Федяев В. Л., Галимов Э. Р. Оценка ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий.....	11
Гимранов И. Р., Федяев В. Л. Методологический подход к оценке влияния пористости на эксплуатационные свойства функциональных полимерных порошковых покрытий	19
Морозов М. И., Долматов А. В. Сетевая мехатронная система позиционирования установки плазменного напыления покрытий.....	25
Нефедьев С. П., Емелюшин А. Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5	33
Снитовский Ю. П. Особенности плазменной обработки поверхности кремния в газовой смеси $VF_3 + H_2$ и $VF_3 + H_2 + CF_4$	46
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ	57
Исаева О. Л., Бороненко М. П. Экспериментальные методы пупиллографического анализа на основе приборов высокоскоростной видеосъемки	59
Исаева О. Л., Ключникова Р. Р. Метод определения стрессового состояния человека для систем видеонаблюдения.....	68
Корнеев Д. С., Котванова М. К. Компьютерный анализ и прогнозирование процессов нефте- и газопереработки.....	76
УГОЛОВНО-ПРАВОВЫЕ И КРИМИНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ПРЕСТУПНОСТИ	83
Звонов А. В., Цапанова С. С. Политические и правовые факторы, оказывающие влияние на формирование системы уголовных наказаний в условиях введения режима военного положения	85

Корнеев С. А. Социально-правовая природа принудительных мер медицинского характера в соответствии с уголовным законодательством России и Монголии.....	91
Лапшин В. Ф. Судебный штраф как уголовно-правовая мера государственного принуждения.....	99
Наши авторы.....	105

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА АВТОНОМОВИЧА НОВИКОВА



Александр Автономович Новиков родился 12 августа 1954 года в семье учёных-химиков. Его отец, Автономий Николаевич Новиков, доктор наук, в течение двадцати лет возглавлял кафедру органической химии Томского политехнического института. На той же кафедре доцентом работала и его мама, Новикова Евгения Сергеевна.

С детства Александр Автономович проявлял интерес к химии, чему способствовало всё его окружение. Выбор профессиональной деятельности в таких условиях был предсказуем: в 1977 году Александр Автономович

заканчивает химико-технологический факультет Томского политехнического института. Здесь же он начинает свою трудовую деятельность в должности младшего научного сотрудника. Защитив докторскую диссертацию, Александр Автономович назначается профессором кафедры химической технологии топлива.

В 2003 году по приглашению руководства Югорского государственного университета он переезжает в г. Ханты-Мансийск и работает в должности профессора кафедры химии. Впоследствии Александр Автономович занимал различные должности, успешно сочетая педагогическую, научно-исследовательскую и организационно-управленческую деятельность в университете.

Результаты научной деятельности Александра Автономовича значительно обогатили область знаний о физической и инженерной химии и до настоящего времени применяются на практике. Он является одним из создателей общей методологии комплексного компьютерного анализа промышленных процессов нефте- и газопереработки, которая используется в научно-прикладных работах по повышению эффективности действующих химических производств в таких компаниях, как: ООО «Томскнефтехим» (ПАО «СИБУР»), ООО «Сибирская метанольная химическая компания» (АО «Востокгазпром») и др.

Александр Автономович подготовил более 80 научных работ. За заслуги в области профессиональной деятельности становился лауреатом государственных наград, а также удостоен званий «Почётный нефтехимик» и «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Александр Автономович в Югорском государственном университете сформировал достойный коллектив единомышленников – опытных преподавателей и талантливых учёных. Представители профессорско-преподавательского состава его кафедры в настоящее время являются ведущими специалистами Института нефти и газа.

Все, кто работал с Александром Автономовичем, отмечают, что это был талантливый учёный и одарённый педагог. Его занятия всегда отличались незаурядным подходом к решению изучаемых вопросов, в связи с чем студенческая аудитория не оставалась равнодушной к исследовательской проблематике.

Александр Автономович оставил значительный научный задел: в течение нескольких десятков лет он собирал материалы по свойствам нефтей различных сибирских месторождений с целью последующей систематизации и составления полного Справочника по нефтям Сибири. В настоящее время данная деятельность продолжается уже учениками и последователями Александра Автономовича.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ТЕХНОЛОГИИ

И. Р. Гимранов, В. Л. Федяев, Э. Р. Галимов

ОЦЕНКА РЕСУРСА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассматриваются вопросы оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий. Отмечаются преимущества и недостатки этих покрытий по отношению к традиционным лакокрасочным покрытиям, необходимость определения ресурса при выборе рациональных вариантов их применения. Выделяется контрольный объем покрытия, ограниченный внешней поверхностью, на которую воздействует окружающая среда, и внутренней, контактирующей с подложкой. Называются основные факторы, действующие на эти поверхности. С целью упрощения последующего анализа изменений свойств покрытий при условии, что поперечные размеры их существенно меньше продольных, внешние и внутренние нагрузки заменяются на средние, действующие на внутренний слой материала покрытия. Обсуждаются особенности поведения совокупности свойств материала с течением времени эксплуатации его. В качестве основных показателей функциональности покрытий выбирается средняя толщина, параметр, характеризующие отдельные механические и физико-химические свойства, адгезионная прочность слоя покрытия к материалу подложки. Предполагается, что данные показатели зависят от времени, в частности, степенным образом, при этом коэффициенты соответствующих соотношений определяются с учетом действующих на материал эксплуатационных нагрузок, внутренних факторов, таких как микротрещины, поры, внутренние напряжения и т. д. В силу того, что значимость названных показателей может быть разной, стремясь, тем не менее, учесть все, для получения количественной оценки ресурса рассматриваемых покрытий предполагается ввести комплексный (интегральный) критерий – сумму показателей с весовыми множителями. Пределы изменения этих множителей от 0 до 1, в каждом конкретном случае величина их определяется экспертно. При известных критических значениях показателей получено относительно времени уравнение, решение которого является количественной оценкой ресурса покрытий. Следует отметить, что при необходимости предложенная методика может быть представлена в виде компьютерной программы, которая позволит существенно упростить оценку ресурса полимерных порошковых покрытий с учетом особенностей материала покрытий, технологий их нанесения, действия на покрытия эксплуатационных факторов, требований к их функциональности.

Ключевые слова: ресурс; полимерные порошковые покрытия; эксплуатационные факторы; показатели функциональности покрытий; комплексный критерий.

I. R. Gimranov, V. L. Fedyayev, E. R. Galimov

EVALUATION OF RESOURCE OF FUNCTIONAL POLYMER POWDER COATINGS

The issues of estimating the resource of polymer powder coatings are considered. The control volume of the coating is allocated, limited by the external surface on which the environment acts, and the internal surface in contact with the substrate. The main factors acting on these surfaces are called. Provided that the transverse dimensions of the coatings are significantly smaller than the longitudinal ones, external and internal loads are replaced by average loads acting on the inner layer of the coating material. As the main indicators of the functionality of the coatings, the following are selected: average thickness; parameters that characterize the mechanical and physico-chemical properties of the coating material; adhesive strength. It is assumed that these indicators depend on time, in particular, in a power-law way. In this case, the coefficients of the correspond-

ing ratios are determined taking into account the operating loads acting on the material, as well as internal factors (microcracks, pores, internal stresses). To obtain a quantitative assessment of the resource of coatings, a complex (integral) criterion is proposed – the sum of indicators with weight multipliers, the limits of change of which are from 0 to 1. In each specific case, the values of the indicators are determined by experts. For known critical values of the indicators, a ratio is obtained that allows us to quantify the resource of coatings.

Keywords: resource; polymer powder coatings; operational factors; indicators of the functionality of coatings; complex criterion.

Введение

Функциональные покрытия, которые применяются в современном производстве, весьма разнообразны, отличаются используемыми материалами, технологиями их нанесения на подложку. Поверхность данных покрытий обладает необходимыми физико-механическими, химическими, другими свойствами, такими как требуемая твердость, износостойкость, стойкость к коррозии, температурным нагрузкам, высокая отражательная способность и т. д.

Одними из перспективных материалами функциональных покрытий являются порошки полимеров, полимерные порошковые композиции (ППК) [1–3]. По сравнению с традиционными лакокрасочными материалами при использовании ППК может быть уменьшена площадь покрасочных цехов, упрощено хранение и транспортировка этих материалов, повышена производительность труда, степень механизации и автоматизации производственных процессов, уменьшена техногенная нагрузка на окружающую среду, пожарная опасность производства. Вместе с тем, при использовании ППК необходимо применять более сложное технологическое оборудование, в первую очередь, теплотехническое: сушильные и нагревательные печи с соответствующими системами, а также дозаторы, другие устройства.

Кроме того, зачастую ужесточаются требования к качеству подготовки рабочих поверхностей изделий перед нанесением покрытий. Для обеспечения высоких эксплуатационных показателей этих покрытий, например, адгезионной прочности, следует грунтовать данные поверхности, использовать ступенчатые режимы формирования покрытий, добавлять в порошки специальные присадки.

В силу того, что имеется большое количество порошковых материалов, технологий их нанесения в каждом конкретном случае применения полимерных порошковых покрытий стоит задача рационального выбора наиболее эффективного покрытия. При этом необходимо принять во внимание, прежде всего, назначение покрытия, способность выполнять свои функции. Во-вторых, несомненно, важны также условия эксплуатации изделий с соответствующими покрытиями, внешние факторы, действующие на них, причем не только по отдельности, но и в совокупности. Известно, что при одновременном воздействии разных факторов в материале покрытия могут протекать качественно иные процессы. В-третьих, следует учесть ресурс покрытия – время, в течение которого эксплуатируемое покрытие обеспечивает выполнение требуемых функций.

Сложность оценки ресурса покрытия состоит в том, что на величину его влияют два основных обстоятельства: старение материала покрытия [4–6] и изменение с течением эксплуатации адгезии, адгезионной прочности [7–9].

Цель исследования – разработка методики оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий с учетом названных обстоятельств.

Методика проведения исследований

Настоящая работа базируется, в основном, на методах математического моделирования. Согласно данным методам изменение свойств полимерных порошковых покрытий в течение эксплуатации рассматривается как процесс, в определенной степени, аналогичный техноло-

гическому. При этом выделяются наиболее значимые величины, параметры, характеризующие воздействие внешних факторов на покрытия. Предполагается, что связь между показателями механических, физико-химических, других свойств покрытий и этими параметрами представляется математически, в виде формул. Соответствующие соотношения получаются в результате анализа данных, приведенных в научно-технической литературе. При необходимости уточнения, конкретизации либо, наоборот, обобщения их проводятся физические, вычислительные эксперименты, дополнительные исследования.

Далее рассматриваются наиболее важные эксплуатационные показатели, например, толщина покрытия, прочность адгезии, изменение их с течением времени. Устанавливается в виде определенных формул зависимость этих показателей от времени, величин, характеризующих свойства материала покрытий, интенсивность воздействия на покрытия внешних факторов.

В производственных условиях, когда целесообразен одновременный учет нескольких эксплуатационных показателей, в работе используются методы, характерные для задач производственной оптимизации. Вводится комплексный критерий, включающий в себя выделенные показатели и множители их значимости. Этот критерий приравнивается выражению, включающему в себя названные множители и значения эксплуатационных показателей, определенных в соответствии с функциональными требованиями к покрытиям. Получается уравнение, в результате решения которого находится ресурс покрытия.

Результаты исследований

В общем случае полимерные покрытия, находящиеся на рабочих поверхностях изделий, характеризуются тем, что поперечные размеры (толщина) сравнительно малы, материал покрытия может быть пористым либо вследствие издержек технологий [10–12] либо в результате специально принятых мер. Например, теплоизолирующие или антифрикционные покрытия. Основное же отличие их от изделий из полимерных материалов состоит в том, что на разные, находящиеся близко друг к другу поверхности покрытия: внешнюю, контактирующую с окружающей средой, и внутреннюю, на которой материал покрытия примыкает к материалу подложки, действуют разные факторы [13]. При эксплуатации покрытий в земных условиях к первым относятся механические нагрузки в виде давления, сил трения, ударов; температурные факторы, воздействие химически агрессивных компонентов, в том числе воды, биологических составляющих, излучения и т. д. На внутреннюю поверхность слоя материала со стороны подложки действуют нормальные и касательные силы реакции, тепло (холод), температурные градиенты, термонапряжения, электростатические силы, химические, электрохимические факторы.

Таким образом, если в слое покрытия выделить контрольный объём, средняя поверхность которой обладает определенной кривизной, то среднюю толщину, части внешней, внутренней поверхностей этого объёма можно обозначить через H_c , S_0 , S_i соответственно. Именно на данные поверхности действуют названные выше факторы. Естественно предположить, что какое – либо воздействие через боковые поверхности на материал рассматриваемого объёма отсутствует.

Введем далее обозначения интенсивности (величины) воздействия на внешнюю поверхность S_0 контрольного объёма давления (σ_0), трения (ϵ_0), удара (σ_{0s} , ϵ_{0s}); температуры (t_0 , q_0), химических компонентов (x_0), биологических факторов (x_{0b}), излучения (x_{0r}). Применительно к внутренней поверхности обозначим S_i аналогичным образом через σ_i , ϵ_i напряжения, обусловленные силами реакции со стороны подложки; t_i , q_i – температуру, тепловой поток; ϵ_{it} – касательные термонапряжения, σ_e – напряжения, вызванные разницей зарядов частиц материала покрытия и подложки, x_i – величину, характеризующую интенсивность химических, электрохимических реакций.

Следует заметить, что в зависимости от условий эксплуатации покрытий названные величины могут быть стационарными (квазистационарными), не меняющимися с течением времени, либо нестационарными, переменными во времени. В общем, они могут меняться по площади поверхности S_0, S_i , однако целесообразно рассматривать их средние по соответствующей площади значения.

Детальный учет влияния на эксплуатационные свойства покрытий выделенных факторов представляет большие трудности. Поэтому, учитывая малую толщину слоя покрытия H_c , предположим, что на материал его действуют средние по толщине слоя механические нагрузки $\bar{\sigma} = 0.5(\sigma_0 + \sigma_i) + \bar{\sigma}_{0s} + 0.5\sigma_e$, $\bar{\varepsilon} = 0.5(\varepsilon_0 + \varepsilon_i) + \bar{\varepsilon}_{0s} + 0.5\varepsilon_{it}$; температурные нагрузки $\bar{t} = 0.5(t_0 + t_i)$; $\bar{q} = 0.5(q_0 + q_i)$, химические $\bar{x} = 0.5(x_0 + x_i)$, биологические $\bar{x}_g = 0.5x_{0g}$, радиационные $\bar{x}_r = 0.5x_{0r}$ факторы. Здесь $\bar{\sigma}_{0s}, \bar{\varepsilon}_{0s}$ – приведенные (усредненные по конкретному объёму и времени) ударные нагрузки.

Помимо описанных внешних факторов, действующих на материал покрытия, поведение его с течением времени эксплуатации зависит также от вида этого материала, наличия слабых связей в макромолекулах, микротрещин и пор, внутренних напряжений и пр. Соответственно, параметры, характеризующие величину этих внутренних факторов, обозначим следующим образом: k_m, c_m, g_m и s_m .

В присутствии внутренних факторов, при воздействии на покрытие отдельных либо совокупности внешних нагрузок в материале покрытия могут протекать следующие процессы [14]:

1. При механическом воздействии на покрытие со стороны как внешней, так и внутренней поверхностей ($\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$) возможно механическое разрушение материала покрытия, утончение толщины H_c , отслаивание пленки от подложки, изменение механических, физико-химических, теплофизических свойств материала.

2. Повышенная температура (\bar{t}, \bar{q}), действие механических нагрузок на покрытие, неуравновешенность исходной структуры материала может привести к образованию более сложных структур (структурированию), как следствие, к ухудшению адгезии.

3. Вместе с тем, при действии данных, а также ряда других внешних факторов, например, излучения (\bar{x}_r) наблюдается деструкция (деградация) полимеров – разрушение макромолекул материала, деполимеризация его, когда мономерные звенья отрываются от полимерных цепей либо образуются осколки макромолекул (статистическая деструкция).

4. При контакте покрытия с агрессивной средой (вода, водные растворы солей, кислот, щелочей; спирты, растворители, кислород, озон и другие агрессивные газы), характеризуемой параметром \bar{x} , а также с микроорганизмами (бактерии, микробы), продуктами их жизнедеятельности (\bar{x}_g), в том числе, при наличии высоких температур (\bar{t}, \bar{q}), излучения (\bar{x}_r) может происходить активное изменение свойств полимеров, разрушение компонентов материала покрытий.

5. В силу особенностей состава, структуры полимерных материалов, содержания в них жидких, летучих, химически не связанных с пленкообразователем компонентов, последние могут испаряться, выпотевать на внешней поверхности покрытия, вымываться из его объёма, что приводит с течением времени к изменению состава материала, отдельных эксплуатационных показателей.

В целом, при эксплуатации рассматриваемых покрытий, действии на них совокупности факторов с течением времени происходит, во-первых, поверхностный износ, материала покрытия, уменьшение его толщины H_c как вследствие эрозии, коррозии, так и разрушения материала покрытия. В последнем случае в начале в нем возникают, растут первичные трещины, затем трещины быстро развиваются, часть материала покрытия разрушается.

Во-вторых, изменяются механические и физико-химические свойства материала покрытия. Основные механические свойства полимеров: упругость, пластичность, текучесть, прочность, характеризуемые модулем Юнга, модулем сдвига, коэффициентом Пуассона, пределом прочности при растяжении, сжатии, изгибе, ударе, другими показателями. К физико-

химическим относятся твердость, износостойкость, водостойкость, влагостойкость, газопроницаемость, теплостойкость и термостойкость, жаро- и морозостойкость, стойкость по отношению к агрессивным средам. Соответственно, выделяются следующие показатели: плотность, пористость, проницаемость, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент теплового расширения материала и т. д.

В-третьих, изменяется адгезия, прочность адгезии F_a , характеризующая связь, прилипание покрытия к материалу подложки либо дополнительного слоя (грунтовки). Применительно к покрытиям различают собственно адгезию, когда адгезив (покрытие) сцепляется с субстратом (подложкой), и механическую адгезию, обусловленную проникновением адгезива в трещины, поры субстрата. На практике чаще всего действуют оба этих механизма. Адгезия зависит от физико-химических свойств материала покрытия и подложки, шероховатости поверхности последней, степени ее чистоты, а также размеров частиц наносимого полимерного порошка, температуры адгезива, поверхности субстрата, пористости покрытия, других факторов. В соответствии с [15] текущая прочность адгезии определяется напряженно-деформированным состоянием материала адгезива и субстрата вблизи поверхности их контакта; наличием жидких, газообразных компонентов в адгезиве; величиной модуля Юнга и модуля сдвига обоих материалов, действием на покрытие нормальных и касательных нагрузок, температурой материалов.

Ресурс покрытий зависит от условий эксплуатации, воздействия на покрытия совокупности факторов, достаточно подробно рассмотренных выше, а также от требований, предъявляемых к их свойствам, функциональности [16–18]. Выбор соответствующих свойств, требований к ним обусловлен техническими задачами, которые призвано решать конкретное покрытие. Например, в качестве таких требований могут быть условия уменьшения средней толщины слоя покрытия до $H_{ск}$ при сохранении его прочности, водостойкости, снижения прочности адгезии до $F_{ак}$.

Принимая во внимание сказанное, выделим в качестве основных показателей эксплуатационной пригодности рассматриваемых функциональных покрытий среднюю толщину слоя покрытия H_c , величину G_c , характеризующую сплошность, прочность, коррозионную стойкость, другие свойства покрытий (по выбору), и прочность адгезии покрытий F_a . Далее предположим, что показатели H_c , G_c , F_a зависят от времени τ , в течение которого эксплуатируется покрытие:

$$H_c = H_c(\tau), \quad G_c = G_c(\tau), \quad F_a = F_a(\tau).$$

Очевидно, что достижение критических значений этих показателей произойдет за разное время. В этой ситуации целесообразно ввести комплексный (интегральный) критерий [19; 20], зависящий от H_c , G_c , F_a :

$$K = K(\tau) = f(H, G, F), \quad (1)$$

где f – некоторая функция.

В данном соотношении размерности H_c и F_a соответственно, м и Па. Водостойкость, например, характеризуется водопоглощением, определяемом по массе поглощенной воды за единицу времени через единицу площади поверхности. Следовательно, имеет размерность $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Учитывая это обстоятельство, перейдем в (1) к безразмерным переменным, принимая за размерность времени τ величину τ_0 , толщины $H_c - h_0$, показателя $G_c - g_0$ – его полиномиальное значение g_0 , прочности адгезии $F_a - f_0$ – величину f_0 . Относительно безразмерных переменных $\tilde{\tau} = \tau/\tau_0$, $\tilde{h}_c = H_c/h_0$, $\tilde{g}_c = G_c/g_0$, $\tilde{f}_a = F_a/f_0$ соотношение (1) запишем в виде:

$$K = K(\tilde{\tau}) = f(\tilde{h}_c, \tilde{g}_c, \tilde{f}_a).$$

В простейшем случае ориентируясь на методики производственной оптимизации [19], представим выражение для безразмерного показателя K следующим образом:

$$K = \alpha \tilde{h}_c + \beta \tilde{g}_c + \gamma \tilde{f}_a. \quad (2)$$

Здесь α, β, γ – весовые коэффициенты, характеризующие значимость соответствующего показателя ($0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1, \alpha + \beta + \gamma = 1$), которые определяются экспертно.

Далее предположим, что в (2) зависимости функций $\tilde{h}_c = \tilde{h}_c(\tilde{\tau}), \tilde{g}_c = \tilde{g}_c(\tilde{\tau}), \tilde{f}_a = \tilde{f}_a(\tilde{\tau})$ от безразмерного времени $\tilde{\tau}$, других параметров известны. В частности они могут быть близки к линейным. Для каждого из этих показателей в соответствии с имеющимися требованиями к качеству покрытий выделим критические значения $\tilde{h}_{ck}, \tilde{g}_{ck}, \tilde{f}_{ak}$, определим величину

$$K_0 = \alpha \tilde{h}_{ck} + \beta \tilde{g}_{ck} + \gamma \tilde{f}_{ak}.$$

После чего найдем ресурс покрытия $\tilde{\tau}_k$ как решение относительно $\tilde{\tau}$ уравнения:

$$\alpha \tilde{h}_c(\tilde{\tau}) + \beta \tilde{g}_c(\tilde{\tau}) + \gamma \tilde{f}_a(\tilde{\tau}) = K_0. \quad (3)$$

Так, если $\tilde{h}_c(\tau) = a_0 + a_1 \tilde{\tau}, \tilde{g}_c = b_0 + b_1 \tilde{\tau}, \tilde{f}_a = c_0 + c_1 \tilde{\tau}$, то из (3) следует:

$$\tilde{\tau}_k = (K_0 - D_0) / D_1, \quad (4)$$

где $D_0 = \alpha a_0 + \beta b_0 + \gamma c_0, D_1 = \alpha a_1 + \beta b_1 + \gamma c_1$.

В размерной форме ресурс τ_k рассматриваемых покрытий оценивается соотношением:

$$\tau_k = \tau_0 \tilde{\tau}_k. \quad (5)$$

Обсуждение результатов

В соответствии с предложенным подходом оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий в материале покрытия выделяется контрольный объем. С учетом особенностей воздействия на внешнюю и внутреннюю поверхности этого объема механических, тепловых, химических и других нагрузок оценивается их интенсивность. Кроме того, принимается во внимание совокупность внутренних факторов, таких как слабые связи в макромолекулах полимеров, разрывы сплошности, внутренние напряжения и прочее. Далее качественно обсуждаются возможные последствия воздействия названных факторов на материал. Могут быть получены, в принципе, и количественные оценки.

На следующем этапе исследований выбираются, по нашему мнению, основные эксплуатационные показатели рассматриваемых покрытий: средняя толщина, величина, характеризующая механические, физико-химические свойства материала, и прочность адгезии покрытий. Данные показатели непосредственно либо опосредованно зависят от внешних и внутренних факторов, действующих на покрытие, от их интенсивности и времени воздействия, поэтому являются функциями переменных, характеризующих эти факторы, а также времени эксплуатации покрытий τ (см. (1)).

Приведенные рассуждения естественны. Новизна результатов настоящей работы состоит в том, что с целью одновременного учета названных показателей при оценке ресурса покрытий вводится комплексный (интегральный) критерий K (2). С использованием его, после определенных преобразований получается уравнение (3), решения которого (4), (5) представляют собой зависимости для оценки ресурса покрытий. Важно, что эти соотношения содержат критические значения показателей H_c, G_c, F_a , обусловленные соответствующими требованиями, результаты экспертной оценки значимости данных показателей, коэффициенты $a_0, b_0, c_0, a_1, b_1, c_1$, зависящие определенным образом от параметров $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}, \bar{t}, \bar{g}, \bar{x}, \bar{x}_e; k_m, c_m, g_m, s_m$, характеризующих интенсивность, величину внешних и внутренних факторов, влияющих на поведение покрытий при их эксплуатации.

Заключение

Предложен подход, разработаны основные положения оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий. В рамках данного подхода по отношению к слою покрытия выделены основные внешние и внутренние факторы, влияющие на свойства матери-

ала покрытий при их эксплуатации, проанализированы возможные последствия воздействия этих факторов. В качестве основных показателей состояния покрытий, их работоспособности принята средняя толщина, величина, характеризующая механические и физико-химические свойства материала покрытий, прочность адгезии. Представлен включающий в себя названные показатели критерий, позволяющий оценивать ресурс покрытий с учетом критических значений данных показателей, результатов экспертной оценки значимости их, параметров, характеризующих действующие по ходу эксплуатации нагрузки и текущее состояние материала.

Литература

1. Яковлев, А. Д. Порошковые краски / А. Д. Яковлев. – Ленинград : Химия, 1987. – 216 с. – Текст : непосредственный.
2. Порошковые краски. Технология покрытий : перевод с английского / под редакцией А.Д. Яковлева. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2001. – 253 с. – Текст : непосредственный.
3. Полимерные порошковые покрытия специального назначения / Э. Р. Галимов, Э. В. Зверев, Э. Е. Тукбаев [и др.]. – Казань : Офсет Сервис, 2021. – 164 с. – Текст : непосредственный.
4. Энциклопедия полимеров : в 3 томах / главный редактор В. А. Кабанов. – Москва : Советская энциклопедия, 1977. – Т. 3. – 1152 с.
5. Эмануэль, Н. М. Химическая физика молекулярного разрушения и стабилизации полимеров / Н. М. Эмануэль, А. Л. Бучаченко. – Москва : Наука, 1988. – 368 с. – Текст : непосредственный.
6. Справочник по композиционным материалам : в 2 книгах / под редакцией Дж. Любина. – Москва : Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с. – Текст : непосредственный.
7. Зимон, А. Д. Адгезия пленок и покрытий / А. Д. Зимон. – Москва : Химия, 1977. – 352 с. – Текст : непосредственный.
8. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – Москва : Химия, 2003. – 392 с. – Текст : непосредственный.
9. Белый, В. А. Адгезия полимеров к металлам / В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Ю. М. Плескачевский. – Минск : Наука и техника, 2007. – 288 с. – Текст : непосредственный.
10. Губайдуллин, Д. А. Математическое моделирование неизотермических процессов струйного напыления полимерных порошковых композиций и формирования защитных покрытий / Д. А. Губайдуллин, В. Л. Федяев, И. В. Моренко. – Текст : непосредственный // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 1–14.
11. Губайдуллин, Д. А. Математическое моделирование процессов, протекающих при получении пористых композиционных материалов, формировании покрытий / Д. А. Губайдуллин, В. Л. Федяев, И. В. Моренко. – Текст : непосредственный // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 1–12.
12. Formation of polymeric powder coatings / V. L. Fedyayev, E. R. Galimov, N. Ya. Galimova [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 240. – P. 012014.
13. Высокоэффективные технологии и оборудование для получения полимерных порошковых покрытий / Э. Р. Галимов, Э. Е. Тукбаев, В. Л. Федяев [и др.]. – Казань : АН РТ, 2016. – 252 с. – Текст : непосредственный.
14. Протасов, В. Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности / В. Н. Протасов. – Москва : Недра, 1985. – 192 с. – Текст : непосредственный.
15. Басин, В. Е. Адгезионная прочность / В. Е. Басин. – Москва : Химия, 2001. – 208 с. – Текст : непосредственный.
16. Сухарев, Л. А. Долговечность полимерных покрытий / Л. А. Сухарев. – Москва : Химия, 1984. – 240 с. – Текст : непосредственный.

17. Суходоля, А. В. Современные подходы к прогнозированию долговечности лакокрасочных покрытий строительных и дорожных машин / А. В. Суходоля, Н. В. Одинокова. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 5. – С. 26–29.

18. Исследования стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В. Т. Ерофеев, И. В. Смирнов, П. В. Воронов [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11. – С. 911–924.

19. Хог, Э. Прикладное оптимальное проектирование / Э. Хог, Я. Арора. – Москва : Мир, 1983. – 478 с. – Текст : непосредственный.

20. Ахмадиев, Ф. Г. Математическое моделирование и методы оптимизации : учебное пособие / Ф. Г. Ахмадиев, Р. М. Гильфанов. – Казань : Издательство Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2017. – 178 с. – Текст : непосредственный.

И. Р. Гимранов, В. Л. Федяев

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

Рассматриваются функциональные полимерные порошковые покрытия, отмечаются их преимущества перед традиционными лакокрасочными покрытиями. Называется совокупность эксплуатационных показателей покрытий, оценивается зависимость их как от внешних, так и от внутренних факторов. Из последних выделяется пористость материала покрытия. Осуществляется анализ видов пористости, отмечается, что она является обобщенным показателем. Помимо пористости, эксплуатационные свойства покрытий зависят также от формы, размеров, извилистости пор. В связи с тем, что пористость оказывает значительное влияние на все основные технические свойства покрытий, исследование этого вопроса представляется актуальным с практической точки зрения. Поэтому возникает необходимость разработки эффективного подхода, выделив в качестве основной задачи – формализацию каждого из его этапов. Поскольку в общем случае покрытие, факторы, действующие на него, представляют собой сложную систему, используются методы системного анализа и математического моделирования. При этом в совокупности внешних факторов, действующих на покрытия по ходу хранения, транспортировки, эксплуатации изделий, выделяются атмосферные и собственно эксплуатационные. Обращается внимание на то, что воздействие их приводит к изменению показателей, как пористости, так и материала каркаса (матрицы) покрытия. Записываются в общем виде соотношения, характеризующие влияние пористости, внутренних и внешних факторов на физико-химические свойства полимерных порошковых покрытий.

Ключевые слова: полимерные порошковые покрытия, пористость, внешние и внутренние факторы, эксплуатационные показатели.

I. R. Gimranov, V. L. Fedyayev

**METHODOLOGICAL APPROACH TO ASSESSING THE EFFECT OF POROSITY
ON THE OPERATIONAL PROPERTIES
OF FUNCTIONAL POLYMER POWDER COATINGS**

Functional polymer powder coatings are considered, their advantages over traditional paint coatings are noted. The set of operational indicators of coatings is called, their dependence on both external and internal factors is estimated. Of the latter, the porosity of the coating material is distinguished. The analysis of the types of porosity is carried out, it is noted that it is a generalized indicator. In addition to porosity, the performance properties of coatings also depend on the shape, size, and tortuosity of the pores. Due to the fact that porosity has a significant impact on all the main technical properties of coatings, the study of this issue seems relevant from a practical point of view. Therefore, there is a need to develop an effective approach, highlighting the formalization of each of its stages as the main task. Since, in general, the coverage and the factors acting on it are a complex system, methods of system analysis and mathematical modeling are used. At the same time, in the aggregate of external factors acting on coatings during storage, transportation, and operation of products, atmospheric and actual operational ones are distinguished. Attention is drawn to the fact that their impact leads to a change in indicators, both porosity and the material of the frame (matrix) of the coating. The relations characterizing the influence of porosity, internal

and external factors on the physico-chemical properties of polymer powder coatings are recorded in a general form.

Keywords: polymer powder coatings, porosity, external and internal factors, performance indicators.

Введение

Полимерные порошковые покрытия находят все большее применение в машиностроении, энергетике, на предприятиях нефтегазодобывающей, нефтехимической и многих других отраслях производства. По сравнению с альтернативными лакокрасочными покрытиями полимерные порошковые покрытия обладают, как правило, более высокими эксплуатационными свойствами, такими как механическая прочность, стойкость к воздействию агрессивных сред, излучения, других внешних факторов. При нанесении их на рабочие поверхности деталей, изделий малы потери порошка, высока производительность, степень автоматизации производства. Важно, что в процессе окрашивания практически отсутствуют испарения вредных органических соединений, вследствие чего улучшаются условия труда, повышается уровень взрыво- и пожаробезопасности, в целом, уменьшается техногенное воздействие на окружающую среду [1–5]. Применяемые полимерные порошковые композиции, оборудование и технологии нанесения функциональных покрытий позволяют в широком диапазоне варьировать их физико-химические свойства, основными из которых являются: механические свойства (упругость, хрупкость, пластичность, твердость, предел прочности, усталостная прочность); теплофизические свойства (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, теплостойкость, термостойкость, жаростойкость, морозостойкость); электрические свойства (электропроводность); стойкость к воздействию радиационного, электромагнитного, других видов излучений; стойкость по отношению к химически агрессивным веществам; водостойкость, влагостойкость; стойкость в сильно разреженных газовых средах, вакууме; адгезионная прочность. Перечисленные свойства порошковых покрытий зависят, во-первых, от химического состава материала композиций; во-вторых, строения и структуры как материала (пористость, наличие трещин и другие показатели), так и самого покрытия (однослойное, многослойное); в-третьих, от внешних условий, действия соответствующих факторов.

Принимая во внимание особенности рассматриваемых покрытий, многообразие факторов, действующих на них, поясним, что, по нашему мнению, представляют собой однослойные и многослойные покрытия. Для однослойных полимерных порошковых покрытий характерно то, что пористость их, в целом, структура, химический состав материала, каркаса (матрицы) не меняются по толщине. Если ли в покрытиях можно выделить несколько продольных слоев, названные свойства которых (все или часть из них) по толщине изменяются, в принципе, скачкообразно, такие покрытия называются многослойными.

В виду очевидной практической значимости рассматриваемых вопросов, тема данной работы актуальна. Цель ее состоит в разработке методологического подхода к оценке влияния пористости на эксплуатационные свойства покрытий, основная задача – формализация каждого из этапов данного подхода. Исследование влияния пористости даже конкретного покрытия на названные свойства, тем более с учетом специфики воздействия внешних факторов, представляет большие трудности. Поэтому далее будем ориентироваться на рассмотрение однослойных порошковых покрытий, находящихся в т. н. нормальных (не экстремальных) условиях, применяя при этом, в основном, методы математического моделирования.

Результаты исследования

Поскольку в качестве основного показателя, характеризующего структуру функционального покрытия, выделяется пористость, рассмотрим ее подробнее. Пористостью, как правило, называют отношение объема пустот в образце материала к его полному объему. Различают общую (абсолютную) пористость, когда в образце учитываются все связанные и не свя-

занные между собой пустоты, и открытую пористость, зависящую от объема сообщающихся, выходящих на свободную поверхность пор. Применительно к покрытиям поры подразделяют на закрытые, полуоткрытые (тупиковые) и сквозные. Соответственно, различают общую пористость $m = V_0/V$, где V – общий объем образца, V_0 – объем пор; закрытую m_1 , тупиковую m_2 и открытую m_3 ,

$$m = m_1 + m_2 + m_3.$$

Сама по себе пористость является, по существу, обобщенным показателем, на свойства покрытий оказывают влияние также форма, размеры, извилистость пор. В общем случае по форме поры могут быть близки к пузырчатым, каналовидным, щелевидным и полостям иного рода. При оценке размеров пор обычно используют понятия среднего и максимального l_m размера, распределения их в образце по размерам. Поры подразделяют также на макропоры (средний размер l_0 больше 1 мм), микропоры ($l_0 < 1$ мм), среди которых, в свою очередь, выделяют сверхкапиллярные (ширина $l_b > 0,1$ мм), капиллярные ($0,002 < l_b < 0,1$ мм), субкапиллярные ($l_b > 0,02$ мм) поры. Для оценки извилистости пор применяется коэффициент $\alpha T = l/h_0$ (l , h_0 – средние длины пор, толщина слоя покрытия). Коэффициент извилистости пор зависит от размеров частиц полимерного порошка, их формы, характера слипания частиц в нанесенном слое, других факторов [5, 6].

Рассматривая пористые материалы, следует иметь в виду способность их при контакте с газообразной, жидкой средой впитывать ее. Тела, в порах которых находятся газ, жидкости, смеси этих сред, называются насыщенными пористыми телами. Для них характерно то, что при перепаде давления, действии массовых сил, например, гравитационных, среды продвигаются в телах, имеет место фильтрация [5–9]. Свойство пористых тел пропускать газ, жидкость, смеси называется проницаемостью, которая в свою очередь, характеризуется коэффициентом проницаемости

$$k = d_p^2 \cdot Sl(m, \delta)$$

Здесь d_p – эффективный диаметр частиц каркаса (матрицы) пористого тела, $Sl(m, \delta)$ – число Слихтера, пропорциональное $m^2/(1-m)$, δ – параметр, зависящий от показателей структуры порового пространства, в том числе, от коэффициента извилистости пор αT .

Очевидно, что при хранении, транспортировке, особенно по ходу эксплуатации изделий с функциональными полимерными порошковыми покрытиями пористость, сопутствующие ей коэффициент проницаемости, другие показатели, будут меняться.

Следует ожидать, что если при хранении, транспортировке изделий выполняются соответствующие требования, то изменение пористости, проницаемости материала покрытий минимально. Когда же эти требования нарушаются, что, естественно, нежелательно, воздействие внешних факторов аналогично воздействию окружающей среды в земных (атмосферных) условиях. По ходу эксплуатации изделия с покрытиями могут находиться в самых разных условиях: цеховых, пожалуй, наиболее комфортных; атмосферных, характеризующихся воздействием на покрытия солнечного (светового, ультрафиолетового, инфракрасного) излучения; температуры (тепловые нагрузки), влаги, химически активных веществ (загрязнений), находящихся в атмосфере. Особенность данных условий эксплуатации состоит в том, что они с разной степенью интенсивности действуют одновременно, комплексно. Кроме того, рассматриваемые изделия, а значит и покрытия, находятся еще и под действием эксплуатационных нагрузок [10].

Влияние наиболее агрессивных факторов на пористость покрытий приводит к тому, что при действии на поверхность солнечного излучения нарушается сплошность материала поверхностного слоя, происходит его расслоение; при контакте с загрязняющими веществами выщелачиваются отдельные химические компоненты материала покрытия.

Что же касается эксплуатационных нагрузок, являющихся по отношению к атмосферным дополнительными, выделим воздействие температуры, влаги и механических факторов.

При отрицательных температурах материал каркаса (матрицы) покрытия охрупчивается; действие механических нагрузок, в том числе циклических, создает предпосылки для его разрушения. Соответственно, пористость может увеличиваться. В случае высоких температур, когда материал размягчается, нагрузки, прижимающие покрытия к подложке, приводят к уменьшению пористости, а противоположного направления, наоборот, к увеличению.

Повышенная влажность воздуха действует на материал покрытия, особенно при наличии других факторов окружающей среды, отрицательно, ухудшая, в первую очередь, его механические свойства. При этом, как и в предыдущем случае, пористость уменьшается или увеличивается.

При эксплуатации изделий механические нагрузки, действующие на поверхность покрытия, могут быть самыми разными: сосредоточенными и распределенными, нормальными и касательными к поверхности, ударными, циклическими и т. п. На пористость материала покрытия основное влияние оказывают нормальные распределенные нагрузки, причем, если они сжимают слой покрытия, то материал уплотняется за счет уменьшения пористости, если растягивают – пористость увеличивается.

Согласно литературным данным в простейшем случае при действии на покрытие давления Δp , в соответствии с законом уплотнения, пористость материала будет:

$$m_c = m - a_c \cdot \Delta p,$$

где m – пористость до уплотнения, a_c – коэффициент сжимаемости насыщенного тела.

Нагрузки, обусловленные отдельными ударами тех или иных предметов, либо циклическим (многократным) воздействием, приводят, как правило, к деформированию слоя покрытия, появлению дефектов, вплоть до его разрушения. Если, тем не менее, покрытие сохраняется, то, естественно, в области действия данных нагрузок пористость уменьшается.

Для формализации зависимости свойств функциональных полимерных порошковых покрытий от внутренних факторов и внешних воздействий обозначим совокупность безразмерных показателей физико-химических свойств, а именно, механических, теплофизических, электрофизических, характеризующих радиационную стойкость, стойкость по отношению к агрессивным средам, величину адгезии, следующим образом: $Y_m, Y_t, Y_e, Y_r, Y_a, Y_c$. Соответственно, безразмерные параметры, описывающие внутренние факторы (химический состав, строение и структура материала), действие внешних нагрузок – через X_i, S_i, F_j . При этом, поскольку пористость m является одним из внутренних факторов, запишем: $S_i = S_i(m)$, где

$$m = m(\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a; \theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e) \quad (1)$$

В зависимости (1) $\gamma_a, \theta_a = t_a/t_0, \psi_a = \psi_a/\psi_0, \chi_a$ – безразмерные параметры, характеризующие воздействие на покрытия атмосферных факторов: солнечного излучения, температурных нагрузок, влажности воздуха, находящихся в воздухе химически активных веществ. Безразмерные параметры $\theta_e = t_e/t_0, \psi_e = \psi_e/\psi_0, \sigma_e = p_{ne}/p_0, \tau_e = p_{te}/p_0$ описывают эксплуатационные (дополнительные) нагрузки, обусловленные температурой t_e , влажностью среды ψ_e , воздействием на поверхность покрытий нормальных и тангенциальных сил. Здесь t_0, ψ_0, p_0 – стандартные температура, влажность, давление атмосферного воздуха. Отметим, что в выражении (1) не указано атмосферное давление p_a , т.к. оно учитывается в нормальной нагрузке p_{ne} , и отсутствуют показатели γ_e, χ_e , характеризующие дополнительное к солнечному излучение (электромагнитное, радиоактивное и пр.) и воздействие химически агрессивных сред (растворители, щелочи, кислоты).

Таким образом, каждая группа показателей физико-химических свойств рассматриваемых покрытий ($Y_m, Y_t, Y_e, Y_r, Y_a, Y_c$) описывается зависимостью вида (индексы показателей Y опущены)

$$Y = Y(X_i, S_i, F_j) = Y\{X_i, S_i\{m(g_a, g_e)\}, F_j(g_a, g_e)\} \quad (2)$$

Выражение (2) означает, что показатели Y зависят от химического состава материала покрытия (X_i), строения и структуры его (S_i), включая пористость m , на величину которой влияет совокупность внешних атмосферных (g_a) и дополнительных эксплуатационных (g_e) факторов. При этом данные факторы воздействуют на показатели Y не только опосредованно, через пористость m , но и непосредственно, что символизирует функция $F_j(g_a, g_e)$.

Параметры $m, g_a (\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a), g_e (\theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e)$, входящие в выражение (2), в соответствии с их физическим смыслом, характером воздействия на покрытия могут меняться следующим образом. Пористость материала покрытия $m > 0$ ($m = 0$ означает, что слой покрытия однородный). В общем случае она изменяется как по толщине, так и вдоль слоя покрытия. При воздействии на покрытие таких атмосферных факторов, как γ_a, ψ_a, χ_a , величина которых положительна, пористость уменьшается. Значение безразмерной температуры θ_a может быть и положительным, и отрицательным. В обоих случаях увеличение по модулю θ_a приводит к уменьшению пористости, однако в разной степени. Аналогичным образом может меняться температура θ_e . Параметры ψ_e, τ_e положительны, с увеличением их пористость уменьшается. Напряжение σ_e , действующее по нормали к поверхности покрытия, при положительных значениях растягивает материал покрытия, пористость увеличивается; при отрицательных сжимает, пористость уменьшается.

Предполагая далее, что пористость m зависит от названных параметров линейно, учитывая приведенные оценки, запишем выражение (1) в виде:

$$m = m_0 + m_j . \quad (3)$$

Здесь m_0 – пористость покрытия, когда атмосферные и эксплуатационные факторы на него не действуют, например, в некой изолированной вакуумной камере;

$$m_j = f_a(\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a) + f_e(\theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e) \quad (4)$$

Функции f_a, f_e представим, в свою очередь, следующим образом:

$$\begin{aligned} f_a &= \alpha_t(\theta_a) - (\alpha_\gamma \cdot \gamma_a + \alpha_\psi \cdot \psi_a + \alpha_\chi \cdot \chi_a), \\ f_e &= \beta_t(\theta_e) + \beta_\sigma(\sigma_e) \cdot \sigma_e - (\beta_\psi \cdot \psi_e + \beta_\tau \cdot \tau_e) \end{aligned} \quad (5)$$

Слагаемые $\alpha_t(\theta_a), \beta_t(\theta_e), \beta_\sigma(\sigma_e)$ отражают то обстоятельство, что при положительных и отрицательных температурах θ_a, θ_e , нагрузках σ_e пористость меняется по-разному. Соответственно, положим:

$$\begin{aligned} \alpha_t &= -\alpha_{t1} \theta_a (\theta_a > 0), \alpha_{t2} \theta_a (\theta_a < 0); \\ \beta_t &= -\beta_{t1} \theta_e (\theta_e > 0), \beta_{t2} \theta_e (\theta_e < 0); \\ \beta_\sigma &= \beta_{\sigma1} \sigma_e (\sigma_e > 0), \beta_{\sigma2} \sigma_e (\sigma_e < 0) \end{aligned} \quad (6)$$

В соотношениях (5), (6) все коэффициенты положительны, могут равняться нулю, если определенные факторы мало влияют на пористость покрытия. Величина коэффициентов, вместе с тем, характеризует значимость рассматриваемых факторов, может быть найдена по результатам анализа экспериментальных и теоретических данных.

Учитывая (3), а также прямое влияние рассматриваемых факторов на физико-химические свойства материала каркаса (матрицы) функциональных пористых покрытий, запишем:

$$Y = Y_0 (X_i, m_0, S_{i0}) + G_0 (m_j, F_j), \quad (7)$$

где аргументами функции Y_0 являются параметры, описывающие химический состав материала каркаса (переменные X_i), строение и структуру его в отсутствие внешних факторов (m_0, S_{i0}); функция G_0 характеризует воздействие на покрытие внешних (атмосферных, эксплуатационных) нагрузок.

Полагая далее, что структура функции $F_j (g_a, g_e)$ схожа со структурой m_j (4), получим (A, B – аппроксимационные коэффициенты):

$$\begin{aligned} F_j &= F_a (\gamma_a, \theta_a, \psi_a, \chi_a) + F_e (\theta_e, \psi_e, \sigma_e, \tau_e) = A_t \cdot \theta_a + A_\gamma \cdot \gamma_a + A_\chi \cdot \chi_a + \\ & B_t \cdot \theta_e + B_\sigma \cdot \sigma_e + B_\psi \cdot \psi_e + B_\tau \cdot \tau_e \end{aligned} \quad (8)$$

Зависимость (7) с учетом соотношений (5), (6), (8) позволяет сформировать достаточно четкое представление о влиянии на физико-химические показатели, эксплуатационные свойства полимерных порошковых покрытий совокупности как внутренних, так и внешних факторов.

Отметим, что часть зависимостей, необходимых для конкретизации выражения (7) имеется в научно-технической литературе [5–9, 11–13]. Если в эти зависимости включить время, ис-

пользовать другие соотношения, характеризующие долговечность полимерных покрытий [11], выделить соответствующий критерий, можно оценить ресурс рассматриваемых покрытий.

Заключение

Предложенный подход для оценки влияния пористости полимерных порошковых покрытий на их эксплуатационные свойства дает возможность глубже понять механизм этого влияния, учесть большое число разнообразных факторов, воздействие их на соответствующие показатели. При этом принято во внимание то обстоятельство, что по ходу эксплуатации изделий с покрытиями изменяются не только пористость, сопутствующая ей проницаемость полимерного материала и другие показатели, но и физико-химические свойства его каркаса (матрицы). Представленные в общем виде соотношения, характеризующие зависимость пористости от атмосферных и эксплуатационных нагрузок, физико-химических свойств покрытий как от внутренних, так внешних факторов, после детализации позволят рассчитать показатели покрытий, спрогнозировать поведение их при изменении условий хранения, транспортировки, эксплуатации изделий с покрытиями.

Литература

1. Яковлев, А. Д. Порошковые краски и покрытия / А. Д. Яковлев, Л. Н. Машляковский. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2000. – 63 с. – Текст : непосредственный.
2. Яковлев, А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий / А. Д. Яковлев. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2008. – 448 с. – Текст : непосредственный.
3. Белый, В. А. Полимерные покрытия / В. А. Белый, В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1976. – 416 с. – Текст : непосредственный.
4. Высокоэффективные технологии и оборудование для получения полимерных порошковых покрытий / Э. Р. Галимов, Э. Е. Тукбаев, В. Л. Федяев [и др.]. – Казань : АН РТ, 2016. – 252 с. – Текст : непосредственный.
5. Полимерные порошковые покрытия специального назначения / Э. Р. Галимов, Э. В. Зверев, Э. Е. Тукбаев [и др.]. – Казань : Офсет Сервис, 2012. – 164 с. – Текст : непосредственный.
6. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – Москва : Наука, 1977. – 664 с. – Текст : непосредственный.
7. Щелкачев, В. Н. Подземная гидравлика / В. Н. Щелкачев, Б. Б. Лапук. – Ижевск : РХД, 2001. – 736 с. – Текст : непосредственный.
8. Механика насыщенных пористых сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов [и др.]. – Москва : Недра, 1970. – 336 с. – Текст : непосредственный.
9. Леонтьев, Н. Е. Основы теории фильтрации / Н. Е. Леонтьев. – Москва : Издательство Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88 с. – Текст : непосредственный.
10. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 247 с. – Текст : непосредственный.
11. Сталтон, Р. Влияние окружающей среды на свойства композиционных материалов : справочник по композиционным материалам : в 2 книгах / Р. Сталтон ; под редакцией Дж. Любина. – Москва : Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с. – Текст : непосредственный.
12. Протасов, В. Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности / В. Н. Протасов. – Москва : Недра, 1985. – 192 с. – Текст : непосредственный.
13. Гусева, Е. А. Порошковые полимерные покрытия как альтернативный способ защиты металлов от коррозии / Е. А. Гусева М. В. Константинова. – Текст : непосредственный // Вестник ИрГТУ. Металлургия и материаловедение. – 2015. – № 10 (105). – С. 71–76.

М. И. Морозов, А. В. Долматов

СЕТЕВАЯ МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Работа посвящена внедрению архитектуры встраиваемых вычислительных систем в быстродействующий комплекс диагностики газотермического напыления покрытий. На базе микроконтроллера Arduino Yun R.2 разработан программно-аппаратный интерфейс управления оборудованием системы позиционирования, и протокол обмена сообщениями в сетевой среде для взаимодействия с другими подсистемами измерительного комплекса. Вычислительными средствами системы реализован протокол синхронизации внутренних часов с соседями по измерительному комплексу с точностью 1 мс. Дистанционное управление системой позиционирования построено на основе пульта с IR-каналом связи и LCD-экрана. Альтернативный интерфейс интерактивного управления системы пользователем развернут на микроконтроллере с помощью Web-сервера. Также вычислительные ресурсы процессора Atheros на Arduino Yun обеспечивают работу клиент-серверного приложения, использующего БД для хранения информации о заданиях по перемещению каретки и треки ее движения. Сайт системы позиционирования поддерживает разработку клиентских приложений на языках C++, C#, Python, Matlab с помощью исходного кода класса объектов управления, справочных материалов и библиотек динамической компоновки.

Ключевые слова: встраиваемая система, измерительный комплекс, Arduino Yun, мехатроника, быстродействие, программирование, сетевые технологии.

M. I. Morozov, A. V. Dolmatov

NETWORK MECHATRONIC POSITIONING SYSTEM OF PLASMA SPRAYING UNIT

The work is devoted to the implementation of the architecture of embedded computing systems in a high-speed complex for diagnostics of thermal spraying of coatings. On the basis of the Arduino Yun R.2 microcontroller, a software and hardware interface for controlling the positioning system equipment has been developed, and a message exchange protocol in a network environment for interacting with other subsystems of the measuring complex. The computing means of the system have implemented a protocol for synchronizing the internal clock with the neighbors of the measuring complex with an accuracy of 1 ms. Remote control of the positioning system is based on a remote control with an IR communication channel and an LCD screen. An alternative interface for interactive control of the system by the user is deployed on a microcontroller using a Web server. Also, the computing resources of the Atheros processor on the Arduino Yun provide the operation of a client-server application that uses a database to store information about tasks for moving the carriage and its movement tracks. The positioning system site supports the development of client applications in C++, C#, Python, Matlab using the source code of the class of control objects, reference materials and dynamic link libraries.

Keywords: embedded system, measuring complex, Arduino Yun, mechatronics, performance, programming, network technologies.

Введение

Современное развитие микроконтроллеров и коммуникационных технологий позволяет строить измерительные комплексы как распределенные на значительной территории и выполняющие сбор однородных данных, так и расположенные локально для регистрации гетероген-

Первоначально система использовалась в составе комплекса диагностики газотермического напыления покрытий и отвечала за перемещение быстродействующих средств тепловизионного и спектрального контроля в диапазоне 150 мм по осям X и Y, 200 мм по оси Z (рис. 2).

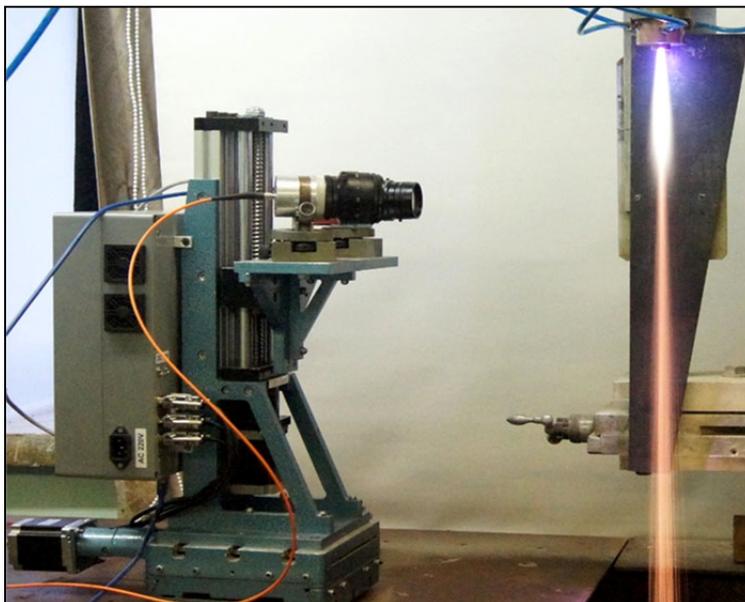


Рисунок 2 – Опытная эксплуатация комплекса диагностики газотермического напыления покрытий в ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск

Контроллер системы позиционирования посредством интерфейса USB подключался к компьютеру, где в среде Matlab был построен виртуальный прибор, управляющий положением вала каждого двигателя на уровне количества шагов [10, 13]. В построении виртуального прибора применялась объектно-ориентированная модель программирования. Тепловизионные и спектральные средства измерения также были представлены в среде Matlab с помощью виртуальных приборов, а их взаимодействие с системой позиционирования производилось в общем сценарии работы комплекса диагностики.

Апробация и последующая опытная эксплуатация системы позиционирования в различных измерительных комплексах выявили следующие недостатки описанной выше конфигурации:

- длины кабеля USB оказалось недостаточно для размещения компьютера на дистанции более 5 метров от плазмотрона без промежуточных электронных компонент;
- воздействие плазменного потока оказывало существенное влияние на качество передачи данных по USB и вызывало многочисленные сбои в работе системы;
- вычислительных ресурсов единственного компьютера со средой Matlab оказалось недостаточно для одновременного обслуживания нескольких виртуальных приборов в режиме реального времени.

Теоретически решение указанных проблем оказалось возможным на основе пропорционального распределения вычислительных ресурсов со специализированной обработкой данных в отдельных системах измерительного комплекса, и наделяния каждой системы помехоустойчивым скоростным каналом связи. Реализация сетевой конфигурации диагностического комплекса повлекла модернизацию архитектуры его элементов, что в случае системы позиционирования потребовало использования следующих электронных компонент:

- микроконтроллер Arduino Yun R.2;
- плата расширения AC/DC Shield;
- LCD экран ITDB02-1.8SP;
- IR-датчик и пульт дистанционного управления.

Arduino Yun R.2 представляет собой комбинацию микроконтроллера ATmega32U4 и микропроцессора Atheros AR933. ATmega32U4 является 8-ми битным и работает на тактовой частоте 16МГц, имеет в своем распоряжении 32 КБ FLASH-памяти, 2.5 Кб SRAM-памяти и 1 КБ EEPROM-памяти. Вычислительные средства микропроцессора Atheros AR933 работают под управлением операционной системы Linino на базе ядра Linux, которая является специальной подготовленной версией ОС OpenWrt. Микропроцессорная система Arduino Yun на базе процессора Atheros AR933 объединяет функциональные блоки: WiFi, Fast Ethernet, USB-хост, 64МБ оперативной и 16МБ Flash-памяти, карта памяти microSD. Для безопасного питания Arduino Yun в блоке управления системы позиционирования задействована плата расширения AC/DC Shield, содержащая преобразователь ~220V / +5V с выходным током 3А и электромеханическое реле управления нагрузкой. В целом, Arduino Yun R.2 в совокупности с AC/DC Shield является гибко настраиваемой системой. Микроконтроллер ATmega32U4 синтезирует управляющие сигналы для драйверов шаговых двигателей (ШД), организует передачу данных LCD, контролирует источник питания ШД, сигналы датчиков конечного положения каретки и поддерживает IR-канал пульта ДУ. Вычислительных ресурсов микропроцессора Atheros AR933 достаточно, чтобы в среде Linino развернуть сервер базы данных, построить высокоуровневый командный интерфейс и организовать защищенный от помех канал передачи данных со скоростью до 100 Мбит в секунду. Взаимодействие процессоров ATmega32 и Atheros AR933 осуществляется посредством UART на скорости 115200 бод по умолчанию.

Результаты программно-аппаратной реализации

Для управления в системе позиционирования тремя шаговыми двигателями посредством драйверов DQ542MA использовано 6 цифровых выводов (D8-D13). D6 задействован в качестве цифрового ввода сигнала IR-датчика, а D3-D5 и цифровые выводы ICSP обеспечивают работу LCD-дисплея. D7 передает сигнал на плату расширения AC/DC Shield для управления источником питания шаговых двигателей с напряжением 36V. Выводы A0-A5 применяются для синхронного контроля состояния датчиков конечного положения при вращении шаговых двигателей. В качестве времязадающего генератора использован таймер, в процессе обработки прерывания которого осуществляется как синтез управляющих сигналов, так и регистрация данных сенсорных элементов. Обмен данными между ATmega32 и Atheros AR933 выполняется через цифровые выводы D1-D2. Расширенное описание назначений выводов Arduino Yun R.2 в блоке управления модифицированной системы представлено на рисунке 3. Программирование микроконтроллера ATmega32 выполнялось в среде Arduino IDE, что позволило использовать следующие стандартные библиотеки:

- «Ucglib» – работа с графическими экранами;
- «Bridge» – связь между процессорами ATmega32U4 и Atheros AR933;
- «IRremote» – обработки сигналов IR-датчика;
- «SPI» – поддержка SPI, использующего выводы ICSP.

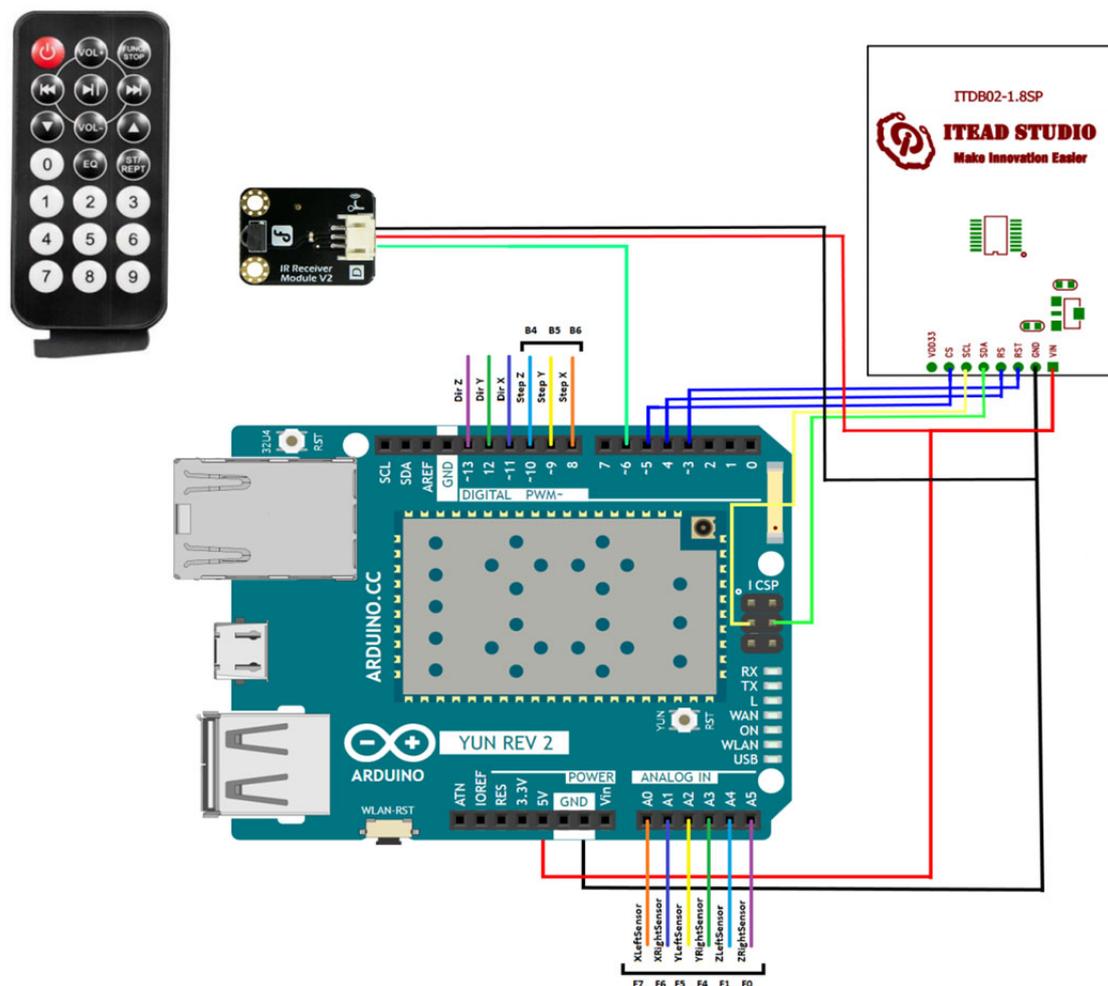


Рисунок 3 – Схема подключения элементов системы к микроконтроллеру Arduino Yun 2

Процессор Atheros AR933 на Arduino Yun работает под управлением Linux-подобной операционной системы, включающей реализацию сетевого интерфейса на базе OpenWrt. Это позволило развернуть СУБД MySQL для хранения и обработки специфичных данных. Использовать GUID в качестве идентификаторов записей БД для установления связности с базами данных других подсистем измерительного комплекса. Установить NTP-клиента для синхронизации часов реального времени с точностью: в Internet до 10 мс; в локальной сети до 100 мкс. Задействовать интерпретатор Python 2.7 для программирования следующих функций контроллера системы позиционирования:

- Низкоуровневый командный интерфейс. Организует передачу данных между аппаратно (микроконтроллер ATmega32) и программно (микропроцессор Atheros AR933) реализуемыми функциями системы.
- Высокоуровневый командный интерфейс. Организует передачу данных между внешним устройством и системой. Программное обеспечение системы транслирует линейные координаты объекта в микрометрах (данные внешней команды) в количество элементарных шагов и период тактирования драйверов ШД (данные внутренних команд) в зависимости от подачи вала линейного привода, требуемой скорости и ускорения при перемещении, настроек работы драйверов.
- Интерфейс дистанционного управления. Обеспечивает режим ручного управления системы пользователем на основе пульта дистанционного управления и LCD-монитора.
- Web-интерфейс. Обеспечивает режим интерактивного управления системы пользователем посредством сайта с доступом из локальной сети по IP-адресу. При настройке

службы NAT на маршрутизаторе возможно подключение из сети Internet. В реализации сайта использован фреймворк «Bottle» [11].

- Сервер сетевого управления. Организует доступ к хранимым в БД данным и обрабатывает команды клиентских приложений.
- Программная поддержка клиентских приложений. Предоставляет на сайте системы доступ к библиотекам и исходным кодам клиентского ПО на популярных языках программирования с подробным справочным описанием.
- Следящее позиционирование. Включает прогноз новой позиции с целью опережения объекта контроля и/или расчет времени его выхода из поля зрения средств измерения. Программное обеспечение реализует протокол сетевого взаимодействия с измерительными средствами диагностического комплекса, получая от них текущее положение наблюдаемого объекта в режиме реального времени, и в зависимости от скорости его движения рассчитывая координаты новой зоны регистрации данных и время начала и окончания перемещения.
- Сетевой протокол синхронизации внутренних часов реального времени. Позволяет с точностью до 1 мс согласовать работу таймеров в системах измерительного комплекса, и использовать глобальное время при регистрации и анализе данных.
- Протокол установления соседства систем в измерительном комплексе. Иницирует создание группы устройств для совместной работы в измерительном комплексе. Назначает группе IP-адреса группового вещания. Генерирует GUID для идентификации записей об общем эксперименте в базах данных различных систем комплекса. Ограничивает использование систем внешними субъектами на время совместной работы в составе комплекса.
- Протокол работы измерительного комплекса. Организует потоки входящих и исходящих сообщений между системами измерительного комплекса для реализации алгоритма его работы.
- Протокол цифрового двойника. За время эксплуатации система позиционирования может быть задействована в разных комплексах. Сбор данных системой может осуществляться только в рамках группы устройств, совместно действующей в настоящий момент времени. Однако анализ ранее собранной информации может производиться в любое время после ее получения. Поэтому система должна обладать способностью одновременно обмениваться информацией со всеми группами, в которых когда-либо участвовала. Для оптимизации информационного обмена цифровые двойники системы могут быть размещены в глобальной сети. Следовательно, она должна поддерживать протокол виртуализации и синхронизацию данных с резервными серверами.

В программной реализации функций системы позиционирования задействованы библиотеки Python:

- «SocketServer» для создания серверного соединения;
- «mysql.connector» для связи с базой данных MySQL;
- «threading» для создания потоков;
- «uuid» для генерации UUID, для базы данных;
- «time» для удобной работы со временем;
- «bridgeclient» для связи между ATmega32U4 и Atheros AR933.

Функционирует система позиционирования следующим образом. При подаче питания на блок управления системы запускается микроконтроллер, осуществляется загрузка операционной системы, выполняется инициализация программных сервисов и стартует синтез аппаратных сигналов. Во время инициализации осуществляется калибровка глобальной системы координат, после которой каретка помещается в позицию, сохраненную в БД во время последнего сеанса. В завершении процесса инициализации на LCD-экране появляется сообщение об окончании загрузки и готовности приема команд позиционирования по каналам ди-

станционного, программного и web-интерфейса управления. При поступлении команды перемещения, контроллер включает питание ШД и генерирует импульсы управления драйверам так, чтобы движение происходило с заданным ускорением и скоростью. По окончании перемещения текущая позиция каретки сохраняется в БД на SD-карте контроллера. Если в течении 5 секунд новых команд по перемещению каретки не поступает контроллер отключает питание шаговых двигателей и система переходит в энергосберегающий режим. При этом сетевые сервисы системы всегда активны и обеспечивают ее работу до момента отключения питания.

Тестирование программного управления системой позиционирования выполнялось с помощью консольного приложения, разработанного на языке C# с использованием технологии .NetCore. После запуска консоли клиентское приложение пытается установить соединение с сервером и в случае успеха получает приглашение к вводу координат новой позиции каретки (рис. 4).

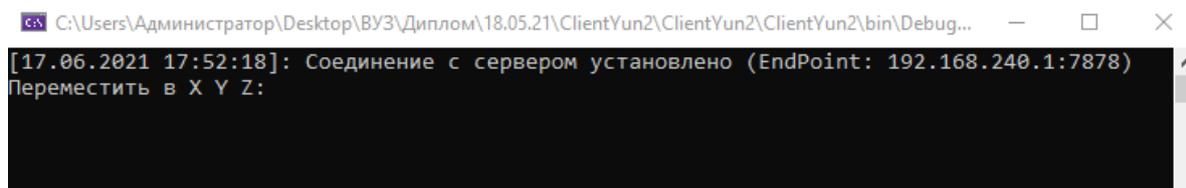


Рисунок 4 – Программный интерфейс клиент-серверного приложения

Если подключение с сервером было прервано или клиент не смог получить доступ, консоль выдаст соответствующее сообщение и попытается установить повторное соединение. В ходе тестирования выявлено, что точность системы позиционирования составляет около 20 мкм, среднее время передачи команды на исполнение в локальной сети 230 мкс, а в сети Internet зависит от маршрута обмена данными и составляет от 15 до 90 мс.

Заключение

Эволюция архитектуры измерительных приборов прошла несколько этапов: аналоговый прибор, цифровой прибор, виртуальный прибор (датчик + ПК), и достигла стадии использования встраиваемых систем. На ней приборы должны за счет вычислительных технологий и искусственного интеллекта не только инкапсулировать в себе трафик примитивных сигналов, но и обрести возможность организовываться в измерительные сети с высоким быстродействием и качественно новым уровнем обрабатываемой информации. Современные микроконтроллеры и ПЛИС уже сейчас обеспечивают достаточную производительность для обработки многомерных цифровых сигналов в режиме реального времени и позволяют решать проблему ограничения быстродействия измерительных комплексов, в том числе, с использованием сетевых технологий. Выполняя настоящую работу авторы пытались осознать какие задачи потребуют решения при взаимодействии информационных и мехатронных устройств в рамках измерительного комплекса и создать прототип прибора в области контроля высокотемпературных быстропротекающих процессов. Главным качественным результатом работы можно считать перестройку архитектуры системы позиционирования и организацию взаимодействия с другими подсистемами измерительного комплекса только с помощью входящих и исходящих сообщений, передаваемых в сетевой среде. Количественным показателем можно считать точность синхронизации действий системы с соседями на уровне 1 мс. В перспективе программно-аппаратная реализация протокола RTP всеми системами измерительного комплекса должна обеспечить синхронизацию в локальной сети с точностью 1-10 мкс.

Литература

1. Chernysheva, N. S. Application of a multichannel radiation thermometer for increase in adequacy of non-contact temperature measurement results / N. S. Chernysheva, A. B. Ionov. – DOI: 10.1109/EDM.2015.7184557 // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2015. – P. 334–336.
2. Hashemi, M. A low power 1-V 10-bit 40-MS/s pipeline ADC / M. Hashemi, M. Sharifkhani, M. Gholami. – DOI: 10.1109/ICECS.2011.6122251 // 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems. – 2011. – P. 212–215.
3. Ganssle, J. The art of designing embedded systems / J. Ganssle. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 309 p. – ISBN 0-7506-9869-1.
4. Ammar, A. Accurate Realtime Motion Estimation Using Optical Flow on an Embedded System / A. Ammar, H. B. Fredj, C. Souani // Electronics. – 2021/ – 10 (17). – P. 2164.
5. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 60–64.
6. Gulyaev, I. P. Diagnostic system YuNA for disperse phase properties control in plasma and laser powder deposition processes / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov. – DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032072 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1115(3). – P. 032072.
7. Dolmatov, A. Chrono-topographic analysis of the fire focus dynamics in the SHS wave / A. Dolmatov, P. Gulyaev, I. Milyukova. – DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042024 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1115, № 4. – P. 042024.
8. Dolmatov, A. Thermal imaging complex with tracking function for joint research of microheterogeneous processes and macrokinetics of SHS phenomenon / A. Dolmatov, P. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062006 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. – P. 062006.
9. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.
10. Vento, J. A. Application of LabVIEW in higher education laboratories / J. A. Vento. – DOI: 10.1109/FIE.1988.35023 // Proceedings Frontiers in Education Conference, 1988. – P. 444–447.
11. Bottle: Python Web Framework. – URL: <https://bottlepy.org/docs/dev/> (Дата обращения: 07.06.21)
12. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012058 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 012058.
13. Бороненко, М. П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.
14. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / M. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev, A. E. Seregin, K. G. Poluhina. – DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012028 // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028.

С. П. Нефедьев, А. Н. Емелюшин

ВЛИЯНИЕ АЗОТА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ТИПА 10P6M5

Исследовано влияние легирования азотом из присадочного материала на формирование структуры и свойств покрытия типа 10P6M5, полученного плазменно-порошковой наплавкой. Изучена микроструктура и фазовый состав наплавленных слоёв, а также, коэффициенты перехода легирующих элементов при наплавке. Определено влияние состава присадочного порошка и режима наплавки на твёрдость и абразивную износостойкость покрытий. Показано положительное влияние азота на повышение абразивной износостойкости покрытий.

Ключевые слова: плазменная наплавка, легирование азотом, твёрдость износостойкость, микроструктура, режимы наплавки.

S. P. Nefedyev, A. N. Emelyushin

THE INFLUENCE OF NITROGEN ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA COATINGS OF THE 10P6M5 TYPE

The effect of nitrogen doping from an additive material on the formation of the structure and properties of a coating of type 10P6M5 obtained by plasma-powder surfacing is investigated. The microstructure and phase composition of the deposited layers, as well as the transition coefficients of alloying elements during surfacing, are studied. The influence of the additive powder composition and the surfacing mode on the hardness and abrasive wear resistance of coatings is determined. The positive effect of nitrogen on increasing the abrasive wear resistance of coatings is shown.

Keywords: plasma surfacing, nitrogen alloying, hardness, wear resistance, microstructure, surfacing modes.

Введение

В последнее десятилетие отмечается повышенный интерес отечественных и зарубежных исследователей к применению азота в качестве легирующего элемента литых сплавов и покрытий. Использование азота в ряде случаев позволяет достигать уникальных свойств, по сравнению с безазотистыми сплавами аналогичного назначения. Оптимальное легирование азотом позволяет значительно повысить коррозионную стойкость сплавов [1], прочность, ударостойкость [2, 3] и т. д.

Основными трудностями применения азота является его высокая диффузионная подвижность при высоких температурах, и связанный с этим повышенный угар, а также, склонность азотированных сплавов к чрезмерному росту зерна, что может полностью нивелировать всё положительное влияние от легирования азотом.

В связи с этим в настоящее время активно разрабатываются технологии обоснованного применения азота в металлических сплавах и покрытиях. Применительно к износостойким покрытиям, азот применяется с целью повысить износостойкость, одновременно с ударостойкостью, а также, для повышения коррозионной стойкости покрытий.

Проблема легирования плазменных покрытий азотом из присадочного материала связана в первую очередь с такими технологическими факторами как: высокая температура ванны расплава и связанный с этим повышенный угар легирующих элементов, повышенное давление газа в атмосфере плазменной дуги и связанная с этим дегазация (деазотирование), ис-

ходным фазовым составом азотсодержащего присадочного материала, а также, технологическими параметрами плазменно-порошковой наплавки: расходом присадочного порошка, силой тока, скоростью наплавки и др. Путём правильного назначения режима наплавки применительно к конкретной детали, а также, оптимальным подбором состава наплавочного порошка, возможно снизить негативное воздействие описанных выше технологических факторов и обеспечить максимальный коэффициент перехода азота в покрытие, при минимальных технологических затратах.

Благодаря возможности применения различных технологических воздействий при наплавке технология плазменно-порошковой наплавки стала широко применимой для восстановления и упрочнения деталей, в тех случаях, когда другие способы наплавки оказываются технологически или экономически не приемлемы [4]. Для обеспечения получения наплавленного металла с максимально возможно высокими значениями физических и механических свойств, плазменно-порошковую наплавку производят на таких режимах, при которых глубина проплавления металла подложки стремится к минимально возможному своему значению, и доля участия основного металла в наплавленном металле также минимальна.

Цель работы

Целью данной работы является определение влияния азота на формирование структурно-фазового состава и абразивной износостойкости покрытий, полученных плазменно-порошковой наплавкой порошком ПР-10Р6М5, а также порошком ПР-10Р6М5, дополнительно легированным азотом, на образцы из стали 45 с исходной нормализованной структурой.

Используемые материалы и методика исследования

Порошок ПР-10Р6М5 по химическому составу близок к инструментальной стали Р6М5 и имеет схожее с ней предназначение. Основная сфера его применения – изготовление или ремонт крупного режущего инструмента – дисковых ножей, токарных резцов, штампов, и др. инструмента, предназначенного для применения на операциях резания массивных заготовок, чаще всего из серого и ковкого чугуна или нелегированных марок сталей. Основной проблемой применения порошка ПР-10Р6М5 для изготовления режущего инструмента является нестабильность получаемых свойств инструмента – твёрдости и износостойкости, а также, склонность к образованию трещин при эксплуатации на границе подложки и наплавленного металла.

Исходный состав наплавочного порошка ПР-10Р6М5, азотированного феррокремния, а также, азотсодержащей наплавочной смеси ПГ-10Р6АМ5, изготовленной на их основе, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав наплавочной смеси и исходных порошков

	С	Cr	W	Mo	V	Mn	Ni	Si	N
ПР-10Р6М5*	1,03	4,20	6,43	5,20	2,05	0,37	0,40	0,20	-
Азотированный феррокремний**	0,10	0,30	-	-	-	0,10	-	30,00	30,00
ПГ-10Р6АМ5***	1,07	4,00	6,10	4,94	1,94	0,35	0,38	1,68	1,50

* – Fe – остальное, S – 0,016 %; P – 0,03 %; O₂ – 0,03 %; H₂O – 0,01 %

** – Fe – остальное, Al – 0,29 %; Ti – 0,4 %; O₂ – 0,2 %; S – 0,02 %; P – 0,04 %

*** – рассчитанный состав наплавочной смеси. Fe – остальное, S – 0,02 %; P – 0,04 %

Результаты исследования

В связи с высокой температурой плавления порошка ПР-10Р6М5 и низкой подвижностью расплава, формирование качественных покрытий становится возможным только при повышенной силе тока наплавки – выше 120 А. При более низких значениях силы тока формируются некачественные покрытия, не обладающие металлургическим сцеплением с подложкой или не формирующие правильные валики наплавленного металла.

На рисунках 1 и 2 показана микроструктура зоны сплавления и средней части покрытия соответственно, полученного с использованием порошка ПР-10P6M5, при плазменно-порошковой наплавке на токе 180 А.

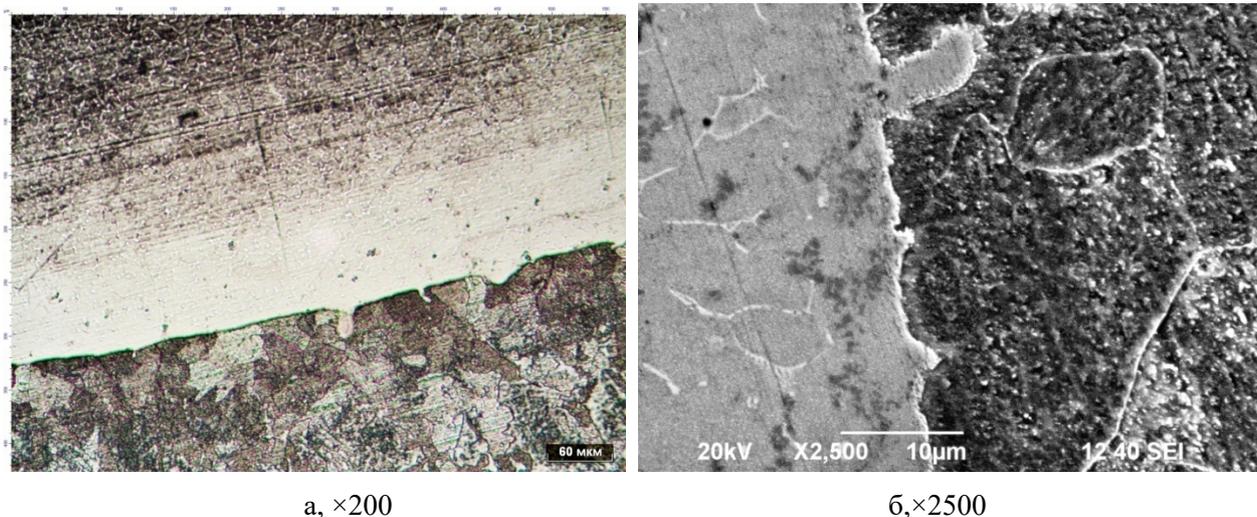


Рисунок 1 – Микроструктура зоны сплавления покрытия типа 10P6M5 при наплавке на токе 180 А

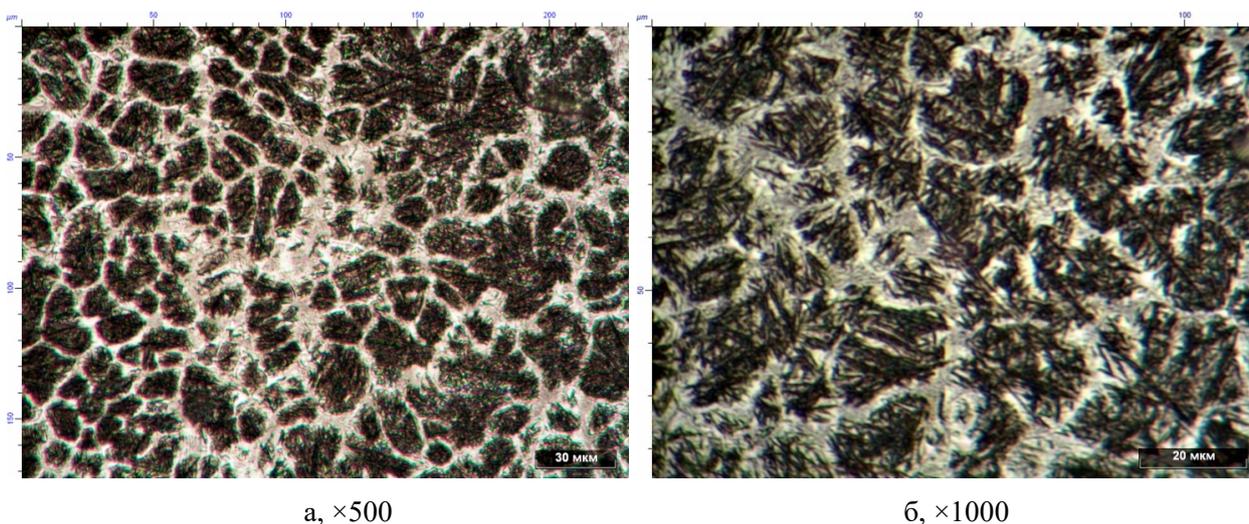


Рисунок 2 – Микроструктура средней части покрытия типа 10P6M5 при наплавке на токе 180 А

Анализ микроструктуры показывает, что формирующаяся структура напоминает структуру литой быстрорежущей стали P6M5, однако отличается от неё некоторыми особенностями [5]. Наиболее схожей со структурой литого металла является средняя часть покрытия, сформированная в условиях замедленного теплоотвода в подложку и наиболее длительного теплового воздействия плазменной струи. В результате, в средней части наплавленного покрытия формируется дендрито-ячеистая структура основного металла. Результаты рентгеноструктурного анализа, а также, металлографические данные позволяют идентифицировать фазовый состав металла основы как аустенито-мартенситную смесь с содержанием аустенита – 34,6 %, а мартенсита – 65,4 %. Мартенсит обладает ярко выраженным игольчатым строением.

В междендритном пространстве находится карбидная фаза – эвтектика (рисунок 3) сетчатого строения на базе карбидов типа Me_6C и $Me_{23}C_6$, а также, очевидно и вторичного карбида Me_2C . Однозначная идентификация карбидной фазы затруднена ввиду наложения дифракционных линий этих карбидов. Из литературных данных [6] известно, что в литом состоянии сплавы типа 10P6M5 кристаллизуются с образованием эвтектических карбидов Me_6C , а по границам дендритных кристаллов и в их объёме возможно образование округлых карбидов типа MeC на основе ванадия.

В связи с тем, что при плазменно-порошковой наплавке кристаллизация наплавленного металла происходит в термодинамически неравновесных условиях, вызванных чрезвычайно сильным переохлаждением, некоторые карбидные фазы не успевают выделиться или кристаллизуются со значительным недостатком углерода [7, 8].

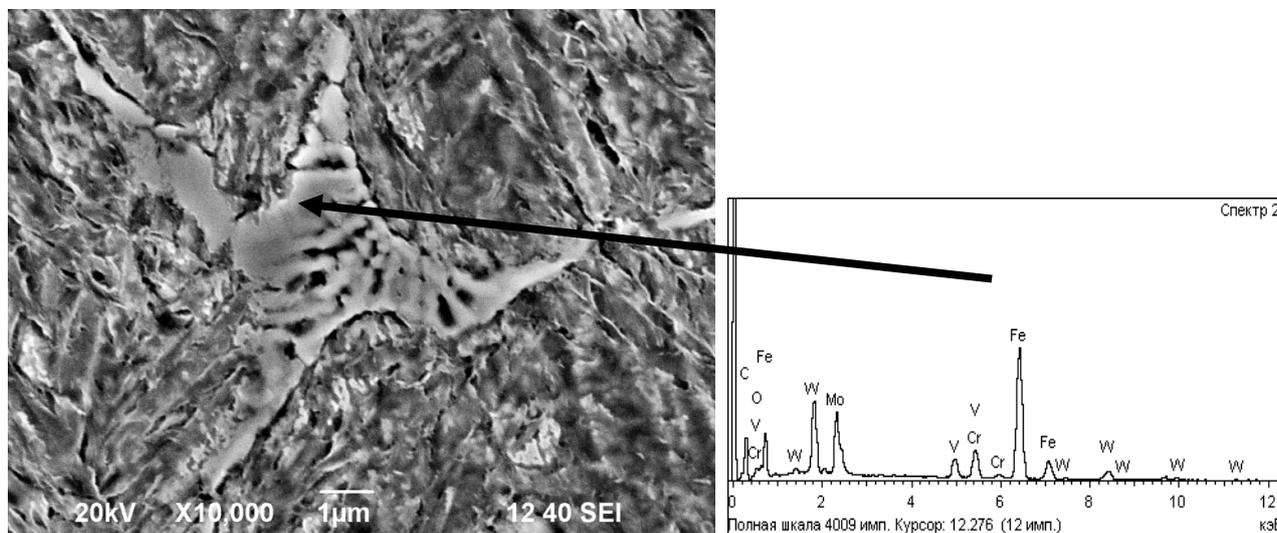


Рисунок 3 – Структура и химический состав карбидной фазы

Результаты рентгеноструктурного микроанализа свидетельствуют о том, что эвтектика представлена комплексным карбидом $Fe_3(W-Mo-V)_3C$ (см. рисунок 3 и таблица 2) в котором наблюдается некоторый недостаток углерода. Сетчатые эвтектические карбиды типа Me_6C расположены по границам дендритных зёрен твёрдого раствора. Объёмная доля эвтектической фазы, определенная металлографически составляет 14,8 %. Большая часть ванадия расходуется на образование собственного карбида VC , округлой формы, находящегося как в теле дендритных кристаллов, так и на их границе (рисунок 4а). Результаты металлографического анализа подтверждают это предположение (рисунок 4б). Металлографически определенное (на нетравленных шлифах) количество округлых карбидов ванадия не превышает 0,15 % об., а их средний размер составляет 2,22 мкм.

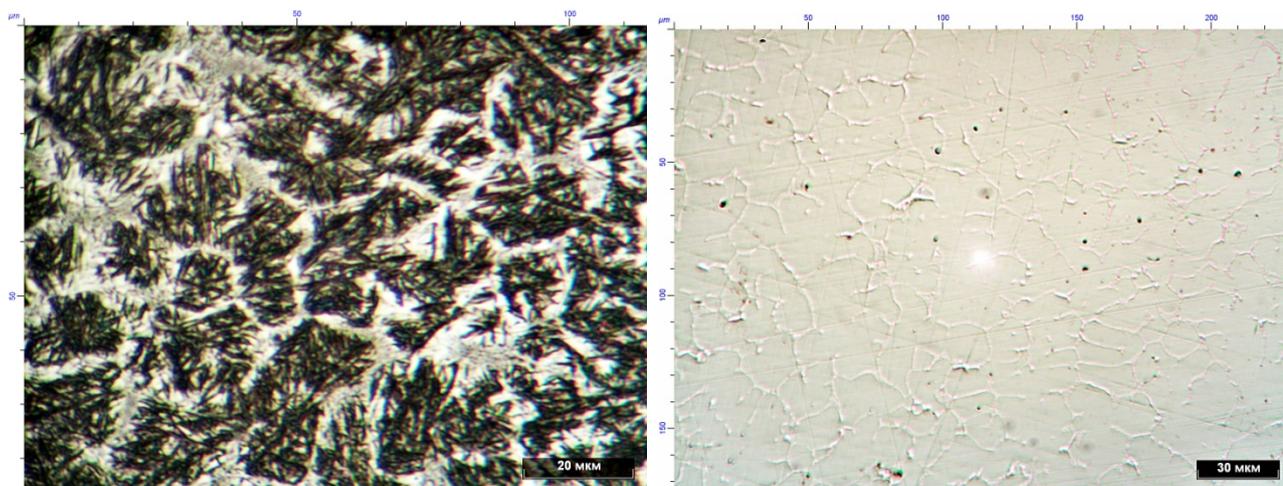
Таблица 2 – Состав эвтектической фазы покрытия типа 10P6M5

Элемент	Весовой %	Атомный %
C K	29,15	12,29
V K	3,19	1,85
Cr K	4,80	12,72
Fe K	35,75	38,89
Mo L	13,04	4,01
W M	14,08	2,26
Итого	100,00	

Анализ микроструктуры образцов после плазменно-порошковой наплавки порошком ПР-10P6M5 показывает, что формирующаяся структура покрытий обладает разнонаправленным дендритно-ячеистым строением по всему сечению. Средняя величина дендритных ячеек составляет 38...48 мкм. В междендритном пространстве присутствует эвтектика скелетообразной формы. Анализ характеристик травления, морфологии, и данных фазового и рентгеноструктурного анализов показывает, что эвтектика образована на базе карбида $Fe_3(W-Mo-V)_3C$. Эвтектические карбиды имеют ограниченную форму, располагаясь в междендритном пространстве. Твёрдость наплавленного покрытия составляет 61 HRC. Такое строение и свойства наплавленного металла схоже со строением литой быстрорежущей стали P6M5 [9]

и отличается от последней существенно большей дисперсностью всех формируемых фаз, а также, меньшим количеством остаточного аустенита и вторичных карбидов типа Me_2C .

Определение коэффициентов перехода основных легирующих элементов из наплавочного порошка в покрытие (таблица 3) показало, что коэффициент перехода основных легирующих элементов находится на уровне 0,8...0,9, что говорит об оптимальности выбранного режима наплавки. Коэффициент перехода азота в среднем составляет 0,12, что обеспечивает его остаточное содержание в покрытии на уровне 0,18 %. Столь значительный угар азота при плазменно-порошковой наплавке связан, очевидно, с тем, что азот является диффузионно-подвижным газом, и легко удаляется из ванны расплава. Также низкий коэффициент перехода азота связан с несовершенством технологии ввода азота в сварочную ванну. Кроме того, как показано в работе [10], устойчивое существование плазменной дуги, стабильный перенос капель, и как следствие формирование качественного безпористого покрытия возможно лишь при ограничении содержания азота в присадочном материале не более 0,3 % масс.



а, $\times 1000$

б, $\times 500$

Рисунок 4 – Карбиды ванадия VC: а – травлено, б – нетравлено

Плазменно-порошковая наплавка с использованием наплавочной смеси ПГ-10P6AM5 (см. табл. 1), содержащей азотированный феррокремний, приводит к формированию покрытия, имеющего повышенное содержание азота (таблица 3). Применение наплавочной смеси при плазменно-порошковой наплавке приводит к формированию качественных безпористых покрытий, имеющих повышенную твердость – более 66 HRC. Микроструктура средней зоны покрытия показана на рисунке 5.

Таблица 3 – Состав формируемых покрытий при плазменно-порошковой наплавке

Покрытие		Fe	C	Cr	W	Mo	V	Mn	Ni	Si	N
ПР-10P6M5	Хим. Сост.	81,4	0,85	3,65	5,98	4,73	1,91	0,34	0,36	0,18	-
	К пер.	1,02	0,82	0,87	0,93	0,91	0,93	0,92	0,90	0,89	-
ПГ-10P6AM5	Хим. Сост.	81,6	0,86	3,32	5,73	4,40	1,77	0,32	0,36	1,48	0,18
	К пер.	1,03	0,80	0,83	0,94	0,89	0,91	0,92	0,94	0,88	0,12

Введение азотированного феррокремния в присадочный порошок приводит к формированию ячеисто-дендритной структуры наплавленного металла. Результаты металлографического анализа свидетельствуют, что средний размер главных осей дендритных кристаллов находится на уровне 24...30 мкм. Рентгеноструктурный анализ образцов показал, что металлическая основа состоит из двух фаз – аустенита и мартенсита пластинчатого строения. По данным рентгеноструктурного анализа содержание аустенита составляет – 42,5 %, а мартенсита – 57,5 %. Микротвердость дендритных ячеек составляет 482 HV₁₀.

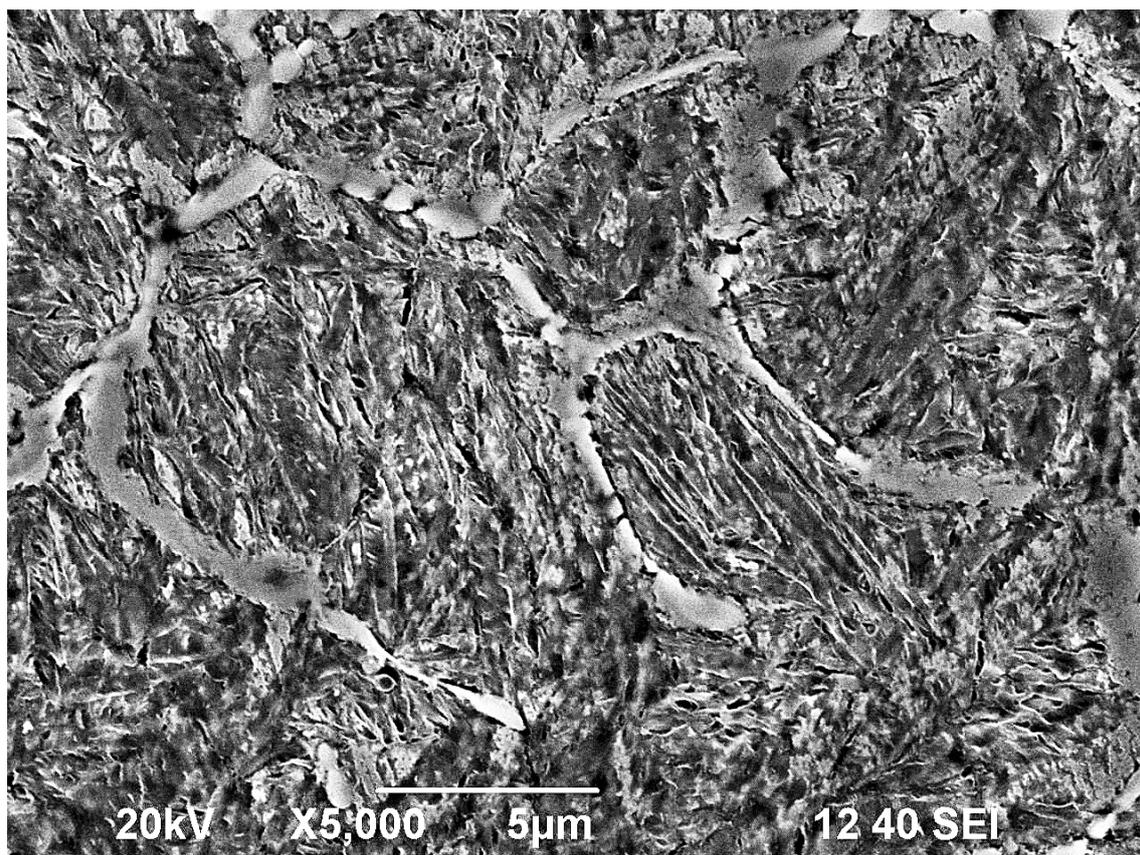


Рисунок 5 – Микроструктура покрытия, полученного при использовании наплавочной смеси

Междендритное пространство заполнено эвтектическими карбидами сложного строения и состава, на основе основного карбида типа Me_6C (таблица 4). Результаты электронномикроскопического анализа (рисунок 6) свидетельствуют, что строение эвтектических карбидов претерпело изменение по сравнению со строением эвтектических карбидов формируемых в покрытии типа 10P6M5. Наблюдается изменение формы и строения карбидных кристаллов. Скелетообразное строение эвтектических карбидов в покрытии на основе исходного порошка ПР-10P6M5, сменилось на пластинчатое строение эвтектических карбидов с рваными и неровными краями (рисунок 6), образующими сплошную тонкую сетку по границам зёрен. Подобное изменение строения формирующихся эвтектических карбидов свидетельствует об увеличении степени переохлаждения сварочной ванны и как следствие резкому увеличению скорости роста карбидной фазы эвтектической композиции. При этом происходит закалка наплавленного покрытия из жидкого состояния и обеспечивается получение мелкозернистой микроструктуры покрытия со сплошной тонкой сеткой эвтектических карбидов по границам зёрен. Кроме того, как свидетельствуют данные РСМА анализа, введение азота приводит к замещению эвтектического карбида Me_6C на карбонитрид Me_6CN (табл. 4), имеющий более высокую микротвёрдость [11]. Средняя величина дендритных ячеек покрытия уменьшается более чем в 1,5 раза, по сравнению с величиной дендритных ячеек в покрытии на основе порошка ПР-10P6M5. В результате твёрдость покрытия, наплавленного с использованием наплавочной смеси ПГ-10P6AM5, содержащей азотированный феррокремний, повышается более чем на 5 единиц по шкале Роквелла, что должно также способствовать и повышению абразивной износостойкости такого покрытия.

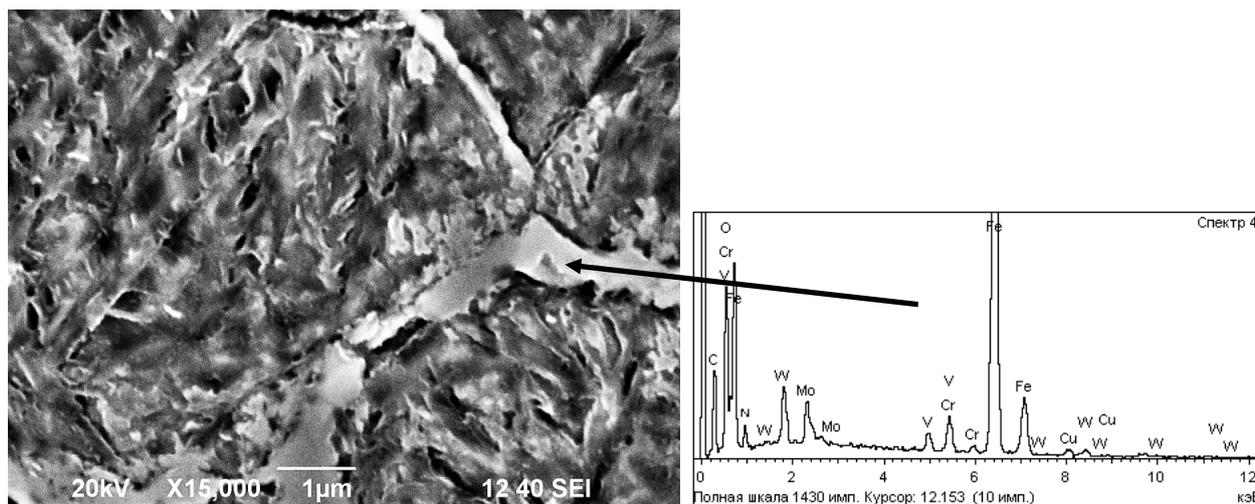


Рисунок 6 – Морфология эвтектических карбидов в покрытии на основе наплавочной смеси

Таблица 4 – Состав эвтектической фазы покрытия на основе наплавочной смеси

Элемент	Весовой %	Атомный %
C K	25,02	49,93
N K	12,08	22,12
V K	1,21	0,63
Cr K	8,19	25,43
Fe K	45,11	49,76
Mo L	3,6	1,0
W M	4,79	0,69
Итого	100,00	

Результаты измерения твёрдости покрытий представлены в таблице 5. При использовании порошка ПР-10P6M5, среднее значение твёрдости составляет 61 HRC, в то время как среднее значение твёрдости покрытия полученного с использованием смесового наплавочного порошка ПГ-10P6AM5 составляет 66,2 HRC. Повышение твёрдости покрытия, при введении в него азотированного феррокремния, возможно объяснить как значительным повышением содержания кремния в покрытии (см. табл. 3), так и действием самого азота, входящим в состав карбидной фазы эвтектики и образующего собственные нитриды железа и хрома – Fe_4N (γ') и Cr_2N соответственно (табл. 6.). Кроме того вклад в повышение твёрдости наплавленного покрытия на основе наплавочной смеси вносит и существенное измельчение металлической основы покрытия.

Таблица 5 – Измеренные значения твёрдости покрытий

Покрытие	Твёрдость, HRC					Среднее значение
	Измеренные значения					
ПР-10P6M5	58,2	58	61	63,2	64,6	61
ПГ-10P6AM5	66,4	65,6	66,3	66,2	66,5	66,2

В средней части покрытия на основе азотсодержащего наплавочного порошка ПГ-10P6AM5 металлографически обнаружены участки не до конца расплавившегося азотированного феррокремния (рисунок 7). Эти участки представляют собой отдельно расположенные области округлого строения, не травящиеся в стандартных металлографических реактивах – 4 %-ом растворе азотной кислоты или реактиве Марбле. Микротвёрдость этих участков в среднем составляет 360 HV_{20} соответствующей ферриту. Объёмная доля нетравящихся участков составляет 0,21 %.

Также в пределах расположения белых нетравящихся участков металлографически обнаружены сферические включения, которые возможно идентифицировать как кварц – SiO_2 .

Данные рентгеноструктурного анализа (рис. 8 и табл. 6) также подтверждают наличие кварца в структуре наплавленного металла. Однако содержание его незначительно – объёмная доля не превышает 0,02 %.

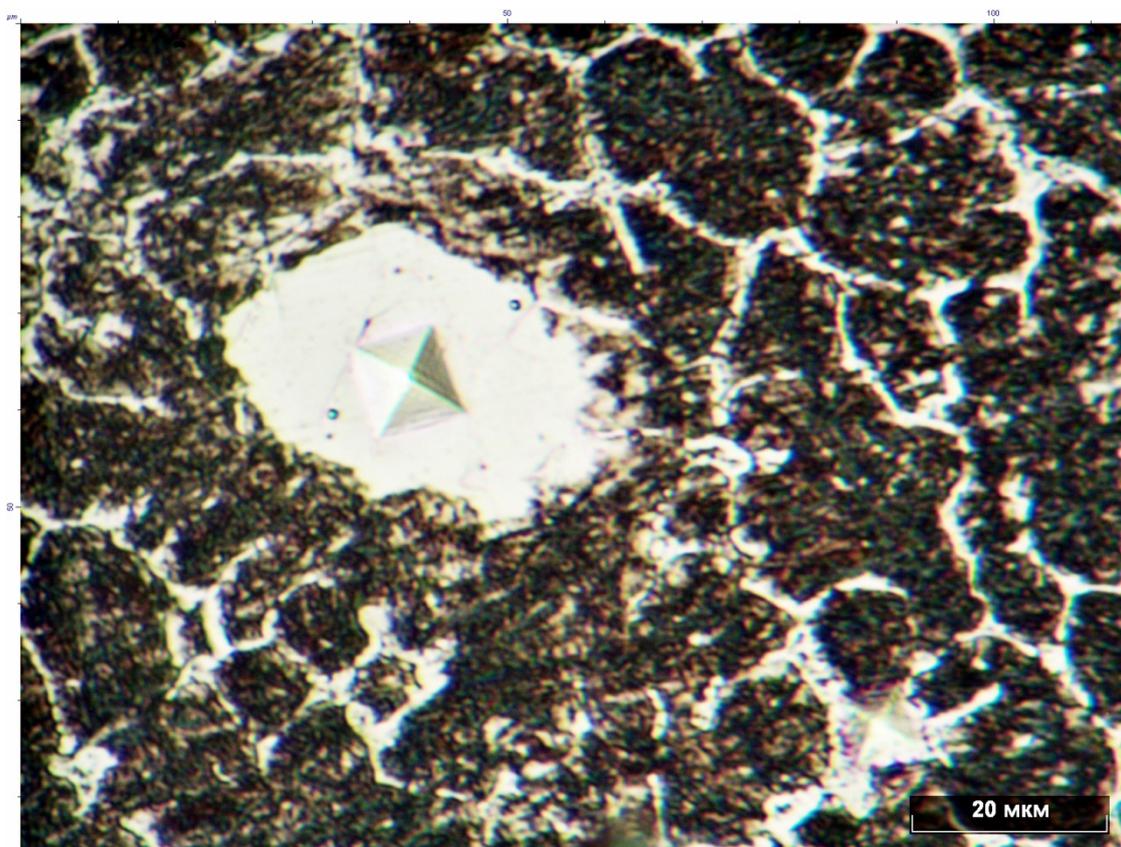


Рисунок 7 – Участок не расплавившегося азотированного феррокремния, $\times 1000$

Формирование в структуре участков не до конца расплавившегося азотированного феррокремния связано с технологическими трудностями гомогенизации сварочной ванны при плазменно-порошковой наплавке, а также, с особенностями технологии ввода в сварочную ванну азотированного феррокремния. Из литературных данных известно, что введение азотированного феррокремния в сплавы на основе железа приводит к повышению вязкости расплава и замедлению его растворения [12]. Однако факт наличия в структуре участков не до конца расплавившегося азотированного феррокремния не должен сказываться на свойствах такого покрытия (в первую очередь износостойкости), в связи с незначительной объёмной долей таких включений.

Расчёт дифрактограммы, снятой с поверхности азотсодержащего покрытия, приведён в таблице 6. Показано, что использование при плазменно-порошковой наплавке азотсодержащей порошковой смеси привело к формированию покрытия со сниженной интенсивностью интерференционных линий карбидных фаз в 1,3...1,8 раз, по сравнению с покрытием, полученным на основе базового порошка ПР-10Р6М5. Это говорит о снижении объёмной доли карбидов в пользу повышения содержания карбонитридов железа и хрома, а также, образованию собственных нитридов хрома Cr_2N (табл. 6), надёжно идентифицированных в покрытии по линиям с межплоскостными расстояниями 1,6291 и 1,386, не накладывающимся на линии других фаз.

Таблица 6 – Расчёт дифрактограммы азотсодержащего покрытия

№ п/п	Угол	Площадь	Интенсивность	Полуширина	Межплоскостное расстояние	Фаза
1	10,13	0,02	2	0,0083	4,017	SiO ₂ (α-квартц)
2	12,076	0,02	2	0,0083	3,3715	SiO ₂ (α-квартц)
3	13,123	0,06	6	0,0083	3,1033	SiO ₂ (α-квартц)
4	14,173	0,02	2	0,0083	2,8745	SiO ₂ (α-квартц)
5	14,474	0,03	3	0,0084	2,8151	WC
6	15,075	2,59	5	0,4535	2,7034	Cr ₃ C ₂
7	15,526	0,03	3	0,0084	2,6254	Mo ₂ C
8	15,977	0,08	8	0,0085	2,5517	Cr ₃ C ₂ , WC
9	16,879	0	0	0,0085	2,4163	Me ₃ C, Cr ₂₃ C ₆ , VC
10	17,78	0,04	3	0,0117	2,2948	ε-Fe ₃ C, SiO ₂ (α-квартц), Cr ₃ C ₂ , Cr ₇ C ₃
11	18,232	1,71	4	0,3932	2,2383	Me ₃ C, Fe ₄ N (γ'), SiO ₂ (α-квартц), Mo ₂ C, Cr ₃ C ₂ , Cr ₂ N
12	19,713	15,27	21	0,6676	2,0716	γ-Fe, Me ₃ C, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂ N, VC
13	20,036	12,57	18	0,6339	2,0386	α-Fe, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆
14	20,938	0,07	7	0,0088	1,9517	Me ₃ C, Cr ₃ C ₂
15	21,839	0,12	9	0,012	1,8721	Me ₃ C, Fe ₄ N (γ'), Cr ₃ C ₂ , Cr ₂₃ C ₆ , WC
16	22,14	0,1	10	0,0089	1,8469	Me ₃ C, Cr ₇ C ₃
17	22,892	0,07	5	0,0121	1,7871	γ-Fe, Cr ₂₃ C ₆
18	23,343	0,02	2	0,009	1,753	Me ₃ C, Mo ₂ C
19	23,644	0,06	4	0,0122	1,731	Cr ₇ C ₃
20	24,095	1,29	6	0,1838	1,6991	Me ₃ C, Cr ₃ C ₂
21	25,147	2,66	7	0,3419	1,6291	Cr ₂ N
22	25,598	0,04	3	0,0124	1,6008	ε-Fe ₃ C, Cr ₂₃ C ₆
23	26,8	1,2	4	0,2852	1,5302	Me ₃ C, SiO ₂ (α-квартц), Mo ₂ C
24	28,15	0,13	9	0,0125	1,4583	Cr ₇ C ₃ , VC, WC
25	28,75	0,1	7	0,0125	1,4284	α-Fe
26	29,05	0,06	6	0,0092	1,414	Cr ₃ C ₂ , WC
27	29,65	0,04	3	0,0125	1,386	Cr ₂ N
28	29,95	0,05	5	0,0092	1,3724	SiO ₂ (α-квартц)
29	30,25	0,06	4	0,0125	1,3591	ε-Fe ₃ C, Mo ₂ C
30	30,55	0,05	5	0,0092	1,3461	Me ₃ C, Fe ₄ N (γ'), Cr ₇ C ₃
31	31,45	0,63	4	0,1582	1,3085	Fe ₄ N (γ')
32	31,9	0,03	3	0,0092	1,2905	Cr ₂₃ C ₆ , WC
33	32,35	0,05	5	0,0092	1,273	Mo ₂ C, Cr ₂ N
34	32,95	1,63	7	0,2175	1,2505	γ-Fe, Cr ₂₃ C ₆ , VC, WC
35	33,84	0,96	3	0,2825	1,2185	ε-Fe ₃ C
36	34,3	0,04	4	0,0092	1,2026	Cr ₇ C ₃
37	34,75	1,28	6	0,1822	1,1875	Cr ₇ C ₃ , VC
38	35,35	0,12	9	0,0125	1,168	α-Fe
39	35,948	2,96	6	0,446	1,1492	Cr ₂₃ C ₆ , WC
40	37	0,45	2	0,1987	1,1176	Me ₃ C
41	37,877	3,34	7	0,4342	1,0927	γ-Fe
42	40,748	1,17	6	0,1711	1,0186	α-Fe, γ-Fe
43	42,1	0,01	1	0,0092	0,9873	Cr ₂₃ C ₆
44	42,7	0,07	5	0,0125	0,9741	Cr ₂₃ C ₆
45	43,071	1,19	4	0,3128	0,9661	Mo ₂ C

46	43,45	0,98	4	0,2575	0,9581	Cr ₂₃ C ₆
47	44,35	0,03	3	0,0092	0,9396	Cr ₂₃ C ₆
48	44,95	0,05	5	0,0092	0,9277	Cr ₂₃ C ₆ , VC
49	45,85	0,05	5	0,0092	0,9104	Me ₃ C
50	46,3	0,75	4	0,1895	0,902	α-Fe
51	46,9	0,01	1	0,0125	0,8911	Cr ₂₃ C ₆

На рисунках 9а и 9б показано изображение микроструктуры зоны сплавления покрытия на основе азотсодержащей наплавочной смеси. Распределение микротвёрдости по глубине зоны сплавления показано на рисунке 10. Видно, что микротвёрдость плавно возрастает от границы с металлом подложки вглубь покрытия и стабилизируется на глубине 350....400 мкм.

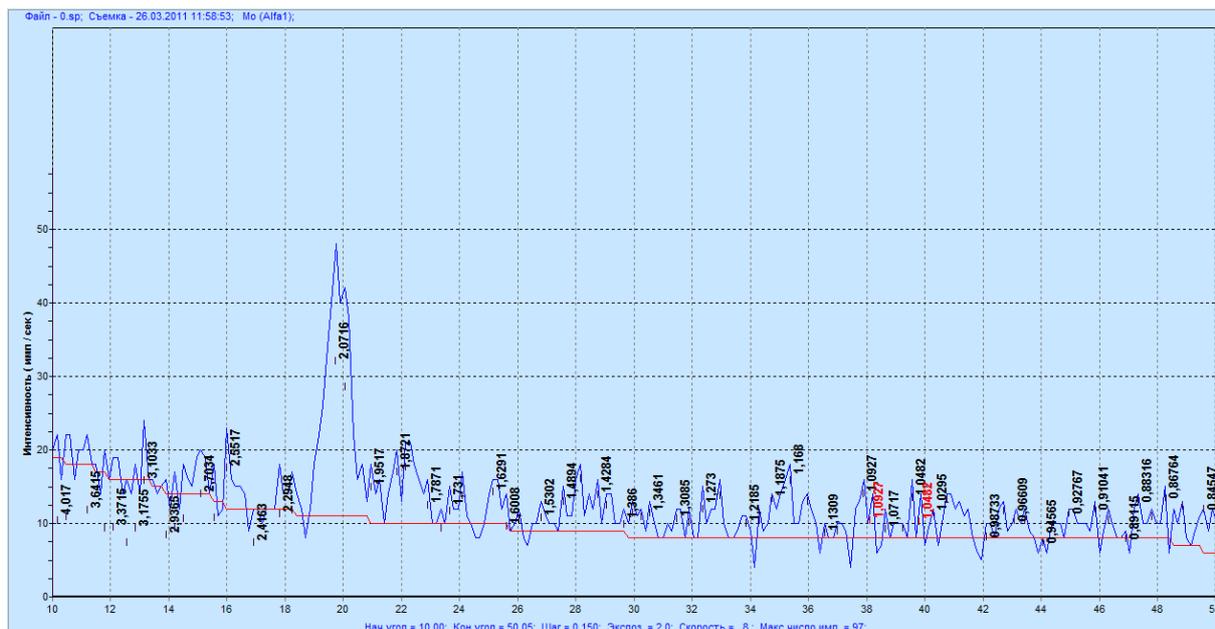
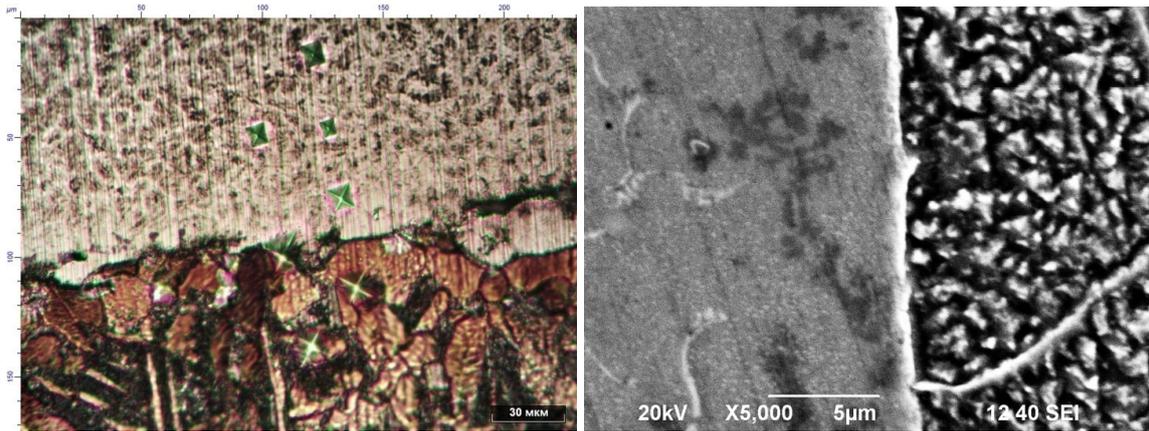


Рисунок 8 – Дифрактограмма покрытия полученного наплавкой азотсодержащей наплавочной смеси

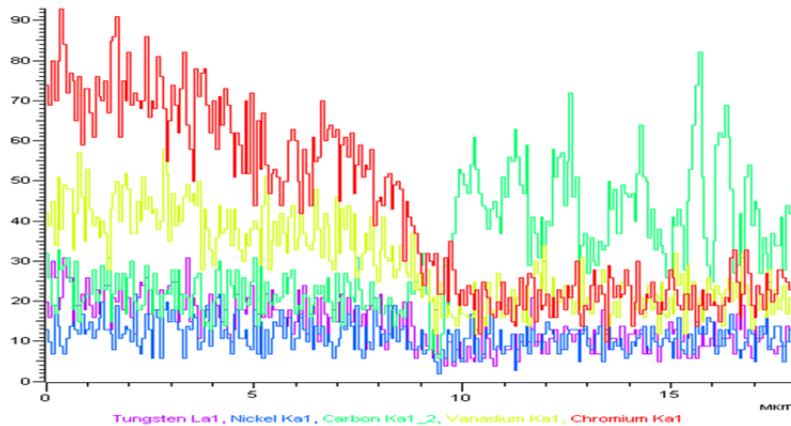
Повышение микротвёрдости от границы с подложкой вглубь наплавленного металла объясняется снижением подмешивания металла основы в сварочную ванну покрытия при плазменно-порошковой наплавке. Металлографически не удалось определить образование кристаллической прослойки в зоне сплавления. Отсутствие дискретности микротвёрдости в зоне сплавления подтверждается также и результатами РСМА анализа (рисунок 9в). Очевидно, это и определяет плавный характер изменения микротвёрдости по глубине зоны сплавления.

Таким образом, дюрOMETрически определённая глубина зоны сплавления не превышает 400 мкм и характеризуется плавным изменением микротвёрдости, которая в свою очередь находится в зависимости от степени подмешивания металла основы в наплавленный металл (рисунок 10).



а)

б)



в)

Рисунок 9 – Микроструктуры зоны сплавления покрытия на основе наплавочной смеси:
а и б – зона сплавления, в – РСМА анализ распределения легирующих элементов
(слева – покрытие, справа – подложка)

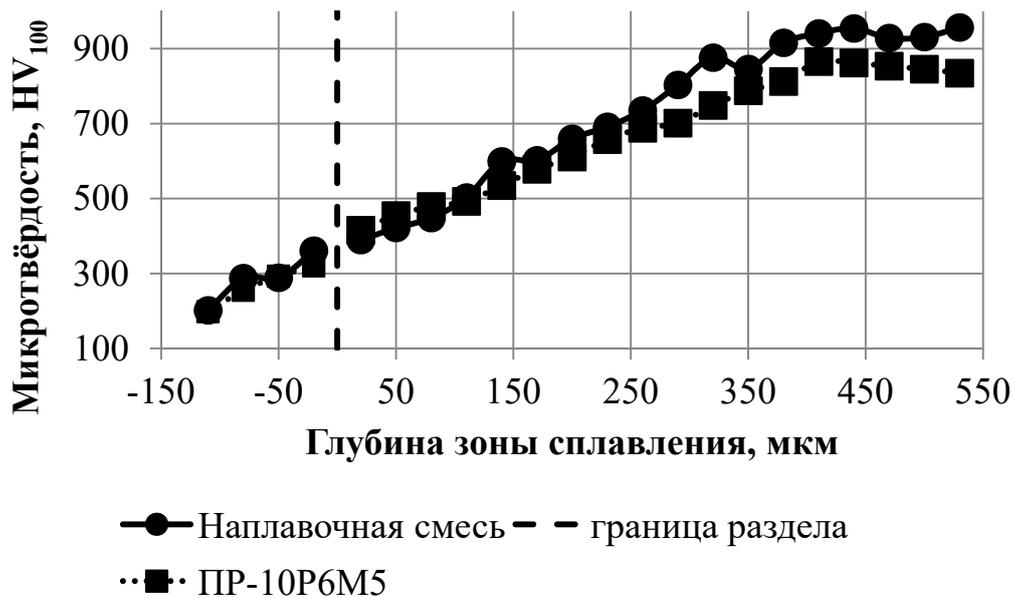


Рисунок 10 – Распределение микротвёрдости по зоне сплавления покрытия
на основе азотсодержащей наплавочной смеси

На рисунке 11 представлены результаты испытания на абразивную износостойкость и ударно-абразивную износостойкость полученных покрытий. В качестве эталона в обоих случаях использовалась закалённая сталь 45. Видно, что абразивная износостойкость покрытия на основе азотсодержащей наплавочной смеси на 25 % превышает абразивную износостойкость покрытия на основе порошка ПР-10Р6М5. В тоже время ударно-абразивная износостойкость азотсодержащего покрытия на 20 % ниже, чем ударно-абразивная износостойкость покрытия на основе базового порошка ПР-10Р6М5. Снижение ударно-абразивной износостойкости при легировании азотом может быть объяснено снижением пластичности металлической основы, и связанное с этим снижением прочности закрепления карбидных частиц в металлической матрице сплава.

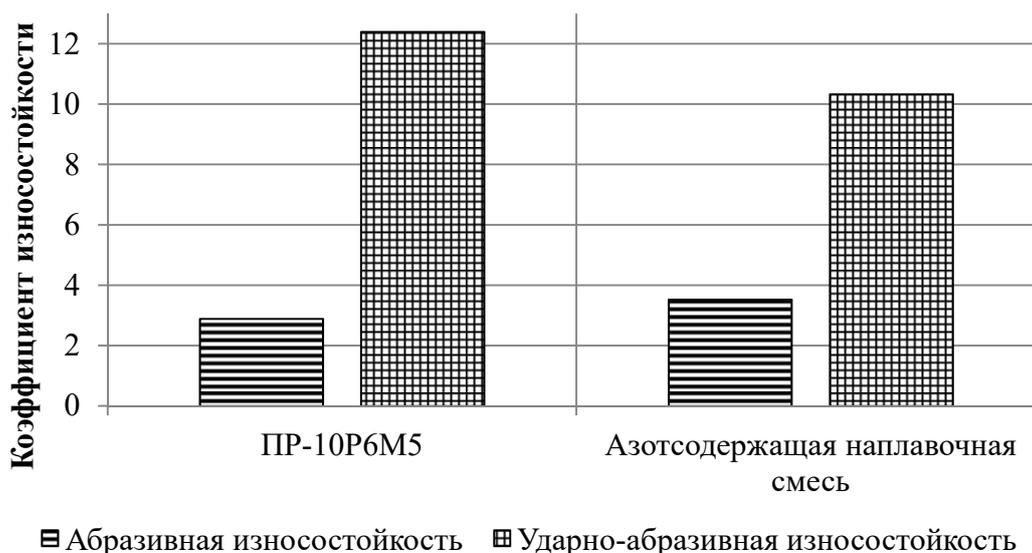


Рисунок 11 – Абразивная и ударно-абразивная износостойкость покрытий

Выводы

Полученные данные показывают, что с помощью дополнительного легирования азотом базового наплавочного порошка ПР-10Р6М5 возможно изменять микроструктуру, фазовый состав и трибологические характеристики формируемых плазменных покрытий. Влияние азота на механические свойства быстрорежущего наплавленного металла заключается в значительном повышении сопротивлению абразивному изнашиванию. Введение азота позволяет модифицировать карбидную фазу наплавленного покрытия за счёт образования карбонитридов взамен карбидов, образующихся при наплавке традиционного присадочного материала – порошка ПР-10Р6М5. Это приводит к повышению микротвердости и прочности карбидной фазы, и к повышению эксплуатационной стойкости таких покрытий. При испытаниях азотсодержащего наплавленного покрытия на ударно-абразивное изнашивание наблюдается некоторое снижение износостойкости, что может быть объяснено, по нашему мнению, некоторым повышением хрупкости покрытия, вызванному повышением микротвердости металлической основы.

Литература

1. Коршунов, Л. Г. Влияние азота на структуру, трибологические и механические свойства азотсодержащих хромомарганцевых аустенитных сталей / Л. Г. Коршунов, Ю. Н. Гойхенберг, Н. Л. Черненко. – Текст : непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 96, № 5. – С. 100–110.

2. Изучение влияния азотированного феррованадия на параметры микроструктуры литых изделий из стали Гадфильда / К. Н. Вдовин, О. А. Никитенко, Н. А. Феоктистов, Д. А. Горленко. – Текст : непосредственный // Литейщик России. – 2018. – № 3. – С. 23–27.
3. Емелюшин, А. Н. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы FE-C-CR-MN-SI, дополнительно легированных азотом / А. Н. Емелюшин, Е. В. Петроченко, С. П. Нефедьев. – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – 2011. – № 10. – С. 18–22.
4. Структура зоны сплавления хромомарганцевого покрытия, полученного плазменно-порошковой наплавкой / С. П. Нефедьев, Р. Р. Дема, Н. Ш. Тютряков [и др.]. – Текст : непосредственный // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. – № 1. – С. 68–72.
5. Емелюшин, А. Н. Сравнение структуры и свойств литых и наплавленных износостойких материалов / ФА. Н. Емелюшин, Е. В. Петроченко, С. П. Нефедьев. – Текст : непосредственный // Литейные процессы. – 2012. – № 11. – С. 141–145.
6. Шевченко, О. И. Управление структурой, составом и свойствами покрытий при плазменной наплавке / О. И. Шевченко. – Нижний Тагил : НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2006. – 290 с. – Текст : непосредственный.
7. Нефедьев, С. П. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твёрдых наплавленных покрытий / С. П. Нефедьев, Р. Р. Дёма, Д. А. Котенко. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 103–106.
8. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1969. – 192 с. – Текст : непосредственный.
9. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел : перевод с английского / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – Москва : Машиностроение, 543 с. – Текст : непосредственный.
10. Легирование наплавленного металла азотом через наполнитель порошковых проволок / В. Б. Литвиненко-Арьков, Г. Н. Соколов, Ф. А. Кязымов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия ВолгГТУ. – 2013. – № 6 (109). – С. 152–155.
11. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – Москва : Наука. 1976, – 230 с. – Текст : непосредственный.
12. Патент № 2394107 Российская Федерация, МПК C21C/70 (2006.01) Способ легирования сталей азотом : № 200913959/02 : заявл. 2009.04.13 : опубл. 2010.02.20 / Шатохин И. М., Букреев А. Е., Зиатдинов М. Х., Никифоров Б. А. – 1 с. – Текст : непосредственный.

Ю. П. СНИТОВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ И $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$

Работа посвящена применению новых методов создания омических контактов к р-области кремния при распылении молибдена в BF_3 плазме, что позволяет получить минимальное переходное сопротивление системы $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ до термообработки (0,09 Ом). Эта величина в 4,4 раза меньше, чем при распылении молибдена в Ar плазме. При этом методе обработки показано, что минимальное значение переходного сопротивления несколько выше, чем при распылении молибдена магнетронным методом при использовании дополнительной обработки кремниевой пластины с активными областями в перекисно-аммиачном растворе, с последующей выдержкой пластины в вакууме $4 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ Па в течение 30–50 мин. при температуре 250–350 °С и повторной обработки в перекисно-аммиачном растворе перед нанесением молибдена (0,07 Ом).

Ключевые слова: плазменная обработка, омические контакты, удельное сопротивление контакта, кремниевые эпитаксиальные структуры, рентгенофазовый анализ, твердый сплав.

Yu.P. Snitovsky

SILICON SURFACE TREATMENT IN $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ AND $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$ PLASMA

The method of creating ohmic contacts to the p-region of silicon by sputtering molybdenum in a BF_3 plasma makes it possible to obtain the minimum transient resistance of the $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ system before heat treatment (0.09 Ohm). This value is 4.4 times less than when molybdenum is sputtered in Ar plasma. With this processing method, it was shown that the minimum value of the transient resistance is slightly higher than when sputtering molybdenum by the magnetron method when using additional processing of a silicon wafer with active regions in a peroxide-ammonia solution, followed by holding the wafer in a vacuum of $4 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ Pa for 30–50 minutes at a temperature of 250–350 °C and re-treatment in a peroxide-ammonia solution before applying molybdenum (0.07 Ohm).

Keywords: plasma treatment, ohmic contacts, contact resistivity, silicon epitaxial structures, x-ray phase analysis, hard alloy.

Введение

К настоящему времени, анализ возможных причин повышенного значения удельного сопротивления контакта R_k позволил выяснить следующее.

Во-первых, процесс плазмохимического травления SiO_2 в BF_3 плазме сопровождается образованием нелетучего побочного продукта B_2O_3 согласно реакции [1]: $\text{SiO}_2 + \text{F}^* + \text{B}^* \rightarrow \text{SiF}_4 \uparrow + \text{B}_2\text{O}_3 \downarrow$, где F^* и B^* – радикалы фтора и бора соответственно. В связи с тем, что процесс травления протекает непосредственно в контактных окнах на поверхности кремния, B_2O_3 осаждается именно в них и переходное сопротивление контакта за счет этого увеличивается.

Во-вторых, в результате реакции гидролиза фторида бора по схеме: $\text{BF}_3 + \text{H} + \text{O} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 \downarrow + \text{HF} \uparrow$ и $\text{BF}_3 + \text{HO} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 \downarrow + \text{HF} \uparrow$, также может образоваться соединение B_2O_3 , которое осаждается в контактных окнах.

Подтверждением сказанному является экспериментально обнаруженная в работе [2] кремний–бор–фторсодержащая пленка на поверхности кремния при внедрении бора в $\text{Ar} +$

BF_3 плазме ВЧ-индукционного разряда низкого давления. Толщина указанной пленки определяется конкурирующими процессами ее образования и распыления. Химический состав указанной пленки можно интерпретировать как смесь B_2O_3 и SiO_2 с промежуточными продуктами травления и гидролиза, например, $SiOF_2$ и BOF . Ее наличие, несомненно, препятствует удалению SiO_2 из контактных окон.

Цель работы – исследовать особенности плазменной обработки поверхности полупроводникового кремния, позволяющие снизить величину удельного сопротивления контакта R_k на поверхности пластины.

Методика исследования

Поскольку при распылении молибдена в плазме BF_3 на поверхности кремния в контактных окнах образуется кремний – бор – фторсодержащая пленка, препятствующая удалению SiO_2 из контактных окон, были разработаны новые составы газовой среды для создания омических контактов к кремнию при катодном распылении молибдена [3–5], табл. 1.

Таблица 1 – Составы газовой среды для создания омических контактов Mo/ p+Si

Газовая среда, состав % (об.)	Изобретение
$BF_3 - 100$	а. с. 795321 [3]
$H_2 - (15 - 30), BF_3 - \text{остальное}$	а. с. 1292628 [4]
$H_2 - (15 - 30), CF_4 - (15 - 25), BF_3 - \text{остальное}$	а. с. 1709864 [5]

Влияние добавки H_2 к BF_3 . Добавка H_2 [4, 6–9] способствует восстановлению соединения B_2O_3 до BH_3 и H_2O , которые при травлении SiO_2 в плазме бинарной смеси $BF_3 + H_2$ являются летучими. Это предупреждает осаждение на поверхности контактных окон B_2O_3 , что улучшает качество контакта. Метод восстановления основан на взаимодействии между образующимся в плазме атомарным водородом и соединением B_2O_3 :



где H – атомарный водород.

Дополнительными процессами, протекающими при добавке водорода, являются восстановление SiO_2 в контактных окнах до кремния и его травление радикалами фтора согласно реакциям:



С учетом вышеизложенного процесс травления SiO_2 при использовании в качестве основного плазмообразующего рабочего вещества бинарной смеси $BF_3 + H_2$ протекают по следующей схеме:



Сказанное выше согласуется также с результатами работ, например, [10–14], где показано, что очистка поверхности кремния от SiO_2 , углерода, кислорода основана на взаимодействии атомов поверхности кремния, SiO_2 , а также нелетучих соединений с образующимся в плазме атомарным водородом.

Влияние добавки CF_4 к $BF_3 + H_2$. Введение CF_4 обусловлено следующими соображениями [6–9]. Легирование кремния бором сопровождается образованием в приповерхностном слое полупроводника дефектов структуры, обусловленных высокой концентрацией легирующей примеси. Дефекты носят характер радиационных повреждений. Их плотность может быть оценена как степень аморфизации монокристаллической поверхности полупроводника. Это явление известно давно и достаточно хорошо описано, например, в [15]. Введение CF_4 в состав газовой смеси приводит к снижению уровня легирования за счет уменьшения концентрации бора в рабочем газе. Снижение уровня легирования приводит к уменьшению плотно-

сти дефектов структуры в области контакта, что улучшает его качество. Наличие H_2 в составе данной газовой смеси, очевидно, предупреждает также образование на поверхности кремния полимерной пленки состава $(-CF_2-)_x$, обнаруженной в ряде работ, см., например, [16], и ухудшающей качество контакта, за счет реакции:



Снижение концентрации BF_3 в составе газовой смеси не отражается на уменьшении концентрации радикалов фтора, так как CF_4 также является их источником. Поэтому скорость процесса очистки контактных окон не уменьшается, а качество очистки окон – не ухудшается.

Исходные образцы для проведения исследований электрофизических характеристик контактной системы Mo/p^+Si и методика их приготовления для формирования p -областей кремния были идентичны тем, о которых было сказано выше.

В качестве экспериментальной установки для напыления молибдена использовали установку УПР-1, как и для распыления молибдена в BF_3 плазме, но оборудованную двумя дополнительными газовыми натекателями.

Для создания контактов Mo/p^+Si пленки молибдена толщиной 50 нм получали следующим образом. После достижения вакуума $(3-5) \cdot 10^{-4}$ Па в камеру подавали бинарную газовую смесь $BF_3 + H_2$ или тройную газовую смесь $BF_3 + H_2 + CF_4$. Когда давление снижалось до $(3-6) \cdot 10^{-2}$ Па зажигали тлеющий разряд при потенциале 30–150 В. После травливания в контактных окнах пленки SiO_2 создавали постоянное рабочее напряжение 2–3 кВ между молибденовой мишенью и подложкодержателем с рабочими пластинами кремния.

Для сравнения результатов пленки молибдена распыляли в Ar плазме, в Ar плазме с предварительной очисткой контактных окон в CF_4 плазме (в разных циклах), в BF_3 плазме, BF_3+H_2 и $BF_3+H_2+CF_4$ плазме.

Поверх пленки молибдена проводилось напыление пленки алюминия толщиной ~ 1 мкм. Вклад очистки поверхности кремния от SiO_2 в контактных окнах и дополнительное легирование кремния в них бором в BF_3 , BF_3+H_2 , $BF_3+H_2+CF_4$ плазме оценивали по вольт-амперным характеристикам контактов и величине контактного сопротивления. Результаты измерения переходного сопротивления контактов представлены в табл. 2 [7].

Путем проведения серии предварительных исследований было установлено, что наиболее эффективным рабочим газом, позволяющим существенно снизить величину переходного сопротивления контактов Mo/p^+Si , являются смеси, состоящие соответственно из 75 % BF_3 и 25 % H_2 , а также из 55 % BF_3 , 25 % H_2 и 20 % CF_4 . Контроль качества поверхности пластин кремния, подвергнутых воздействию $BF_3 + H_2$, а также $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазмы проводился в темноте.

Таблица 2 – Технологическая обработка поверхности кремния в контактных окнах и переходное сопротивление контактов Mo/p^+Si [7]

Процесс	Вид обработки	Переходное сопротивление R_k , Ом
1	Без обработки, только катодное распыление Mo в Ar плазме	0,40
2	Очистка в CF_4 плазме и катодное распыление Mo в Ar плазме в разных циклах	0,27
3	Очистка, легирование и катодное распыление Mo в BF_3 плазме	0,10
4	Очистка, легирование и катодное распыление Mo в BF_3+H_2 плазме	0,02
5	Очистка, легирование и катодное распыление Mo в $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазме	0,01

Качество поверхности оценивалось по числу точек, светящихся в темном поле микроскопа, поскольку количество светящихся точек может служить мерой как числа твердых частиц и микродефектов поверхности, так и количества загрязнений ионами металлов, и рядом органических веществ, см., например [17–20].

Анализ процесса 3 показывает, что плазмохимическая очистка и распыление молибдена в BF_3 плазме в едином вакуумном цикле без разгерметизации установки позволяет получить более низкое значение R_k . Это достигается благодаря более полной очистке контактных окон от SiO_2 , подлегированию поверхности кремния через окна бором, а также за счет исключения влияния атмосферного воздуха на поверхность кремния. Исключение влияния атмосферного воздуха предотвращает повторное окисление кремния в контактных окнах, как это имеет место в процессе 2.

Очистка, легирование и распыление молибдена в $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ плазме в едином вакуумном цикле без разгерметизации установки (процесс 4) позволяет получить еще меньшее значение величины переходного сопротивления R_k . Это достигается тем, что добавка водорода способствует восстановлению V_2O_3 атомарным водородом до VH_3 и H_2O (см. реакции (4.19), (4.22)), которые в условиях травления являются летучими. Это предупреждает осаждение на поверхности контактных окон V_2O_3 , что улучшает качество контакта.

Таким образом, более низкое значение переходного сопротивления контактов в данном случае обусловлено наиболее полной очисткой контактных окон в $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ плазме.

В свою очередь сравнение процессов 4 и 5 показывает, что уменьшить величину переходного сопротивления контактов $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ можно, используя в качестве газовой среды смесь, состоящую из 55 % BF_3 , 25 % H_2 и 20 % CF_4 .

Выше было сказано, что снижение уровня легирования приводит к уменьшению плотности структурных дефектов в области контакта, что приводит к улучшению его качества. Подтверждением этого является контроль качества поверхности пластин кремния, подвергнутых воздействию $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ и $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$ плазмы, в темном поле оптического микроскопа ММУ-3 при 250-кратном увеличении. Установлено, что в первом случае плотность светящихся точек, которые могут быть отнесены к структурным дефектам, составляет $2\text{--}5 \text{ см}^{-2}$. В то же время плотность аналогичных дефектов на пластинах, подвергнутых обработке в $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$ плазме, составляет величину менее $0,5 \text{ см}^{-2}$.

Кроме того, было обнаружено, что селективность травления SiO_2/Si в процессе, включающем травление SiO_2 в контактных окнах, в $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$ плазме в 6 раз выше, чем селективность травления SiO_2/Si в процессе, включающем травление кремния в CF_4 плазме.

Таким образом, для снижения R_k контактов $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ предпочтительно использование $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$ плазмы, так как именно в этом случае (процесс 5) наблюдается самое низкое его значение. Как следует из вышеизложенного, эффект снижения переходного сопротивления контактов при переходе от процесса 1 к процессу 5 объясняется повышением качества обработки поверхности контактных окон за счет более полного удаления пленки естественного диоксида кремния, обеспечения оптимального уровня легирования кремния в области контакта и установления за счет этого тесного контакта металл–полупроводник. Сопоставив полученные данные по качеству обработки пластин кремния с результатами [21–24] можно сделать вывод, что для получения высокого качества контактов $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ необходимо обеспечить максимально высокую чистоту поверхности полупроводника и оптимальный уровень подлегирования. Указанные требования достигаются оптимизацией состава газовой среды при плазмохимической очистке контактных окон непосредственно перед напылением слоя металла и режимами обработки. Для повышения скорости плазмохимического травления оксида кремния целесообразно использование магнитного поля, скрещенного с электрическим полем [25–28].

Формирование омических контактов молибден/кремний имплантацией ионов в область границы раздела

Полупроводниковые приборы, в том числе СВЧ-диапазона, представляют собой нагроможденную структуру различных тонких пленок. Границы раздела между этими пленками играют важную роль в работе приборов. Поэтому формирование высококачественных пленок, имеющих «идеальные» границы раздела, является наиболее существенным моментом при изготовлении приборов с прекрасными характеристиками. Имеется много примеров деградации качества пленки и неидеальных границ раздела, вызванных выдержкой таких границ на воздухе в процессе изготовления приборов [25]. Значимые границы раздела для работы прибора, такие, как например, граница раздела Si-SiO₂ в МОП-транзисторе, граница раздела перехода эмиттер-база в биполярном транзисторе и др., никогда не должны подвергаться воздействию воздуха.

Проблема КПД, являющаяся принципиальной для любых мощных устройств, в случае полупроводниковых приборов СВЧ имеет дополнительный смысл: чем выше КПД, тем лучше обеспечивается при заданной выходной мощности тепловой режим прибора и тем выше его надежность. Общим для повышения КПД всех полупроводниковых приборов [12] является требование максимального снижения омических потерь в пассивных областях полупроводника и контактах, в частности в омических контактах металл-полупроводник. И как было сказано выше для того, чтобы вклад этих потерь в выходные параметры прибора был мал, удельное сопротивление контактов ρ_k не должно превышать величин 10^{-5} – 10^{-6} и 10^{-6} – 10^{-7} Ом·см² в приборах сантиметрового и миллиметрового диапазона соответственно.

Удельное сопротивление ρ_k большинства применяемых контактных материалов к ионно-легированным слоям кремния в лучшем случае не ниже $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Применение тугоплавких металлов в полной мере не решает проблему снижения величины контактного электросопротивления и для получения величин $\rho_k \sim 1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² требуется новый подход к созданию омических контактов [29].

Одним из эффективных методов воздействия на свойства контактов металл-полупроводник является ионное внедрение, особенностями которого является контролируемое нетермическое введение примеси и дефектов решетки, получение атомных смесей. При этом возможно создание однородных атомных смесей заданного состава без ограничений, определяемых такими термодинамическими параметрами, как, например, растворимость.

Благодаря этому появляется возможность формировать переходные слои контактных систем с заданными свойствами, путем внедрения высокоэнергетичных ионов через металлическую пленку в границу раздела металл-полупроводник. В этом случае уделяется внимание модификации свойств материала, основанной на способности ионных пучков смешивать нанесенный металлический слой с поверхностью полупроводника в результате каскадов динамического смещения, вызванных прохождением первичного иона [30–34]. При этом энергию иона выбирают такой, чтобы средний проективный пробег данного иона в материале металлической пленки был соизмерим с ее толщиной [35]. Смешивание слоев в этом случае начинается на границе раздела металл-полупроводник. Причем толщина смешанного слоя увеличивается пропорционально дозе ионов [36].

Отметим, что более высокое электросопротивление переходных металлов по сравнению с Ag, Au, Al и Cu объясняется рассеянием s-электронов на заполненных состояниях в d-полосе, обладающей высокой плотностью состояний на уровне Ферми [37].

Свойства омических контактов молибден/кремний, облученных ионами бора, фосфора, аргона. Образцы для исследований представляли собой тестовые структуры, технология изготовления которых была максимально приближена к технологии изготовления кремниевых эпитаксиально-планарных *n-p-n* генераторных СВЧ-транзисторов [38].

Для изготовления тестовых структур использовали эпитаксиальные однослойные структуры кремния 7КЭФ1,5/380ЭКС0,01(111). В эпитаксиальном слое формировали тестовые структуры для измерения контактного сопротивления ρ_k и области для проведения структур-

ных исследований, имитирующие условия взаимодействия пленки молибдена с монокремнием p - и n -типа в контактных окнах [39].

Для создания контактов Mo/p^+Si эпитаксиальные структуры окисляли при температуре 1150 °С в сухом, влажном и затем опять в сухом кислороде до толщины оксида кремния 400 нм. Имплантировали бор на ионно-лучевой установке «Везувий-5» с энергией $E_1 = 40$ кэВ в окна, полученные в окисле методами фотолитографии и травления. Дозу легирования D_1 для формирования p - n -переходов в тестовой структуре варьировали от $6,25 \cdot 10^{13}$ до $6,2 \cdot 10^{15}$ см⁻². Пиролитические пленки диоксида кремния осаждали при температуре 630 °С до толщины 300 нм. Для окончательного формирования p^+ -слоев с необходимыми параметрами проводили стационарный отжиг имплантированных бором пластин кремния при температуре 940 °С в течение 600 с в атмосфере кислорода. В пиролитической пленке диоксида методами фотолитографии и травления вскрывали контактные окна площадью 10^{-6} см² и наносили пленку молибдена.

Для создания контактов Mo/n^+Si перед окислением ионно имплантировали бор по всей поверхности эпитаксиального слоя кремния n -типа с энергией $E = 30$ кэВ и дозой $D = 1,25 \cdot 10^{15}$ см⁻². Затем поверхность окисляли при температуре 1000 °С. С целью формирования p - n -перехода тестовой структуры ионно имплантировали фосфор в окна с энергией $E_1 = 30$ кэВ. Дозу легирования (D_1) изменяли от $6,25 \cdot 10^{13}$ до $6,20 \cdot 10^{15}$ см⁻². Для окончательного формирования n^+ -слоев с необходимыми параметрами проводили стационарный отжиг имплантированных фосфором пластин кремния при температуре 900 °С в течение 600 с в атмосфере азота.

Для контактов Mo/n^+Si и для Mo/p^+Si после вскрытия контактных окон в пиролитической пленке диоксида кремния пленки молибдена наносили двумя методами: термическим испарением в вакууме $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па со скоростью 5 нм/с на образцы, нагретые до 300 °С, и магнетронным способом при токе 5 А и напряжении на электродах 500 В до толщины ~100 нм. После этого проводили фотолитографию и травление с целью формирования рисунка токопроводящих дорожек.

В табл. 3 приведены режимы облучения контактов Mo/p^+Si и Mo/n^+Si через пленку молибдена ионами аргона, фосфора и бора. Средний проективный пробег ионов в пленке Мо и среднеквадратичный разброс определены экстраполяцией данных работы [40]. Отжигали тестовые структуры со сформированными контактами в вакууме $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па на ленточном молибденовом нагревателе в течение 900 с в диапазоне температур 200–600 °С.

Измеряли ρ_k по методике [41]. Структуру переходного слоя исследовали на электронографе ЭМР-100 при ускоряющих напряжениях 50–100 кВ методами «на просвет» и «на отражение». Образцы для съемки предварительно травил с обратной стороны пластины в полирующем травителе СР-4.

Таблица 3 – Режимы облучения ионами контактов молибден/кремний

Ионы	Энергия (E_2), кэВ	Доза (D_2), см ⁻²	Параметры распределения ионов	
			$\bar{R}_p, \Delta R_p$, нм [108]	
			Мо	
			\bar{R}_p	ΔR_p
В ⁺	60	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	71	40
	80	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	93	47
	100	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	114	53
P ⁺	100	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	45	27
Ar ⁺	100	$6,25 \cdot 10^{14}$	43	26

К концу травления применяли разбавленный травитель и снижали скорость травления. При этом образец помещали в стакан на поверхность воды и подсвечивали снизу лампой накаливания, что позволяло точно выйти на необходимую толщину образца и предохранить от подтравливания границу раздела Мо-Si. Контролировали травление с помощью микроскопа МБС-2.

Основные результаты исследования

Установлено, что характер изменения ρ_k контактов $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ с возрастанием температуры отжига существенно зависит как от дозы легирования кремния D_1 , так и от дозы облучения контактов D_2 . Для образцов с дозой легирования кремния $\text{V}^+ D_1 = 6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, не подвергнутых облучению, ρ_k уменьшается почти в 2 раза (рис. 12, кривая 1), в то время как для доз легирования $6,25 \cdot 10^{14}$ и $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ оно возрастает в 20 и 100 раз соответственно (рис. 1, кривые 3, 5).

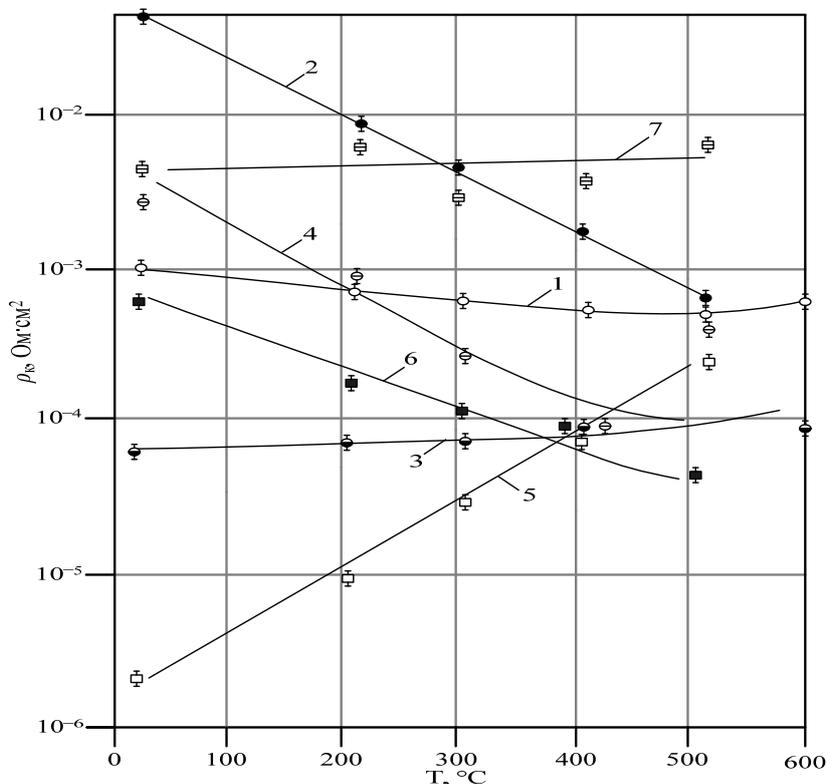


Рисунок 1 – Зависимость удельного сопротивления $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ контактов от температуры отжига: доза легирования кремния ионами $\text{V}^+ D_1$: 1, 2, 7 – $6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3, 4 – $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 5, 6 – $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, доза облучения контактов D_2 : 2, 4, 6 – $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (V^+); 7 – $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (Ar^+)

Наблюдаемые зависимости могут быть объяснены образованием на границе раздела $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ силицидов молибдена, скорость роста которых существенно зависит от совершенства структуры приповерхностных слоев кремния. Большая доза легирования кремния влечет за собой большее количество структурных дефектов, сохраняющихся при "безразгонном" отжиге, что приводит к повышенной диффузии атомов кремния в пленку молибдена с границ зерен поликристаллической фазы кремния, образовавшейся после рекристаллизации аморфизованного слоя [42].

Выводы

1. Следует отметить, что добавление водорода в VF_3 , также, как и в CF_4 , см., например, [43] за счет связывания свободного фтора в HF приводит к его дефициту. Водород также выступает в роли ингибитора скорости травления SiO_2 , если его добавление в CF_4 более 30% (об.) [44].

2. Установлено, что во всех случаях вольт-амперные характеристики полученных контактов до термообработки являются линейными и симметричными относительно начала координат, что подтверждает их омический характер. Как видно из табл. 4.4 (процесс 2) более низкое значение R_k можно получить, если предварительно перед нанесением молибдена катодным распылением в Ar плазме в установке УПР-1 провести очистку контактных окон от SiO_2 в плазме CF_4 в установке для плазмохимического травления.

3. Наблюдаемое снижение R_k при обработке контактных окон к p^+ -области кремния в процессе 2 по сравнению с процессом 1 можно объяснить более полным удалением слоя SiO_2 с поверхности кремния в контактных окнах путем его травления радикалами фтора F^* [16, 45]. Однако проведение процесса плазмохимического травления SiO_2 и напыления пленки металла в разных вакуумных циклах приводит к повторному окислению поверхности кремния за счет воздействия атмосферных кислорода и влаги, что согласуется с результатами работ [46, 47], где пластины обрабатывались исключительно изолированно от воздуха. Поэтому в данном процессе не достигнуто минимальное переходное сопротивление контактов.

Литература

1. Красников, Г. Я. Начальный этап термического окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si-SiO₂ / Г. Я. Красников, Н. Я. Зайцев, И. В. Матюшкин. – Текст : непосредственный // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. – № 2. – С. 98–104.
2. Низкоэнергетическая ионная имплантация бора в кремний в низкотемпературной, плотной $Ar + BF_3$ плазме / И. И. Амиров, С. А. Кривелевич, С. Г. Симакин [и др.]. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 2000. – Т. 29, № 3. – С. 163–169.
3. Влияние технологических режимов формирования невыпрямляющих контактов на качество СВЧ-транзисторов / В. А. Зеленин, Ю. Л. Бобченко, Л. Я. Портнов, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация, надежность. – 1987. – Вып. 2. – С. 31–38.
4. Патент № 1292628 СССР, МПК H01L (2006.01) Способ формирования омических контактов к кремнию : № 3886882/25 : заявл. 19.04.1985 : опубл. 20.03.2012 / С. А. Шепурев, Ю. П. Снитовский, Г. В. Принцев. – 1 с. – Текст : непосредственный.
5. Патент № 1709864 СССР, МПК H01L 21/28 (2006.01), H01L 21/285 (2006.01) Способ создания омических контактов к кремнию : № 2817649/25 : заявл. 17.09.1979 : опубл. 20.03.2012 / Ю. П. Снитовский, С. Ф. Сенько, О. А. Воробьев, И. Л. Баранов. – 1 с. – Текст : непосредственный.
6. Сенько, С. Ф. Влияние качества переходного слоя на величину контактного сопротивления системы $Mo - p^+Si$ / С. Ф. Сенько, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Современные средства связи : материалы V Международной научно-технической конференции, 25-29 сентября 2000 г., Нарочь, Беларусь : специальный выпуск журнала «Известия белорусской инженерной академии». – 2000. – № 1(9)/2. – С. 36.
7. Snitovskii, Yu. P. The Effect of Window Cleaning and Doping in $BF_3 + H_2$ and $BF_3 + H_2 + CF_4$ Plasmas on the $Mo - p^+Si$ Contact Resistance / Yu. P. Snitovskii, S. F. Sen'ko // Russian Microelectronics. – 2001. – Vol. 30, № 5. – P. 335–338.
8. Snitovsky, Yu. P. A new technology of fabricating ohmic metal – silicon contacts / Yu. P. Snitovsky, S. F. Sen'ko // Interaction of radiation with solids: proc. of the Fourth Int. conf., Minsk, Belarus, October 3-5, 2001. – Minsk, 2001. – P. 89.
9. Borodina, K. Thermal analysis of reaction producing $KXTiO_2$ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.
10. In situ cleaning of silicon substrate surfaces by remote plasma-excited hydrogen / V. Anthony [et al.] // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1989. – Vol. B7, № 4. – P. 621–626.
11. Incidence angle effect of hydrogen plasma beam for the cleaning of semiconductor surfaces / I. Suemune [et al.] // Applied Physics Letters. – 1989. – Vol. 55, № 8. – P. 760–762.
12. Кагадей, В. А. Травление окисных пленок полупроводниковых материалов в потоке атомарного водорода / В. А. Кагадей, Д. И. Проскуровский, Л. М. Ромась. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1998. – Т. 27, № 2. – С. 114–119.

13. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.
14. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012058 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 012058.
15. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. – Москва : Мир, 1984. – 475 с. – Текст : непосредственный.
16. Орликовский, А. А. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. Ч. I. Реактивное ионное травление / А. А. Орликовский. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 5. – С. 344–369.
17. Очистка пластин кремния перед первым окислением / М. И. Бакулина [и др.]. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1974. – Вып. 8. – С. 88–93.
18. Методы и средства контроля чистоты и качества поверхности полупроводников : обзоры по электронной технике / О. А. Фестваль [и др.]. – Москва : ЦНИИ Электроника, 1976. – 35 с. – Текст : непосредственный.
19. Старшинов, И. П. Использование метода светящихся точек для оценки загрязненности поверхности кремниевых пластин ионами / И. П. Старшинов, И. Г. Ерусалимчик. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1982. – Вып. 5. – С. 41–46.
20. Cui, H. Z. Influence of micropores on structural instability of the combustion wave / H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev // Yugra State University Bulletin. – 2019. – № 4 (55). – P. 33–40.
21. Киселев, В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках / В. Ф. Киселев. – Москва : Наука, 1970. – 400 с. – Текст : непосредственный.
22. Surface Treatment of (1102) Sapphire and (100) Silicon for Molecular Beam Epitaxial Growth / A. Christon, E. P. Richmond, B. R. Wilkins, A. R. Knudson // Applied Physics Letters. – 1984. – Vol. 44, № 8. – P. 196–198.
23. Коробцов, В. В. Влияние химической очистки поверхности кремния на эпитаксиальный рост кремния / В. В. Коробцов, А. П. Шапоренко, В. В. Балашов. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1998. – Т. 27, № 5. – С. 367–369.
24. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий / Е. Е. Корниенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6 (102). – С. 957–966.
25. Готлиб, С. О. Вакуумно-плазменное травление двуоксида кремния в скрещенном электрическом и магнитном полях / С. О. Готлиб, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Тонкие пленки в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем : тезисы докладов VI отраслевой конференции, октябрь 1986 г. – 1986. – Вып. 4. – С. 235.
26. Готлиб, С. О. Вакуумно-плазменное травление диоксида кремния в скрещенных электрическом и магнитном полях / С. О. Готлиб, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. – 1990. – Вып. 2. – С. 42–46.
27. Снитовский, Ю. П. Влияние магнитного поля на скорость травления диоксида кремния в $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ плазме / Ю. П. Снитковский. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, Вып. 6. – С. 141–145.
28. Correction factor in temperature measurements by optoelectronic systems / N. Bikberdina, R. Yunusov, M. Boronenko, P. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 052031.
29. Бобченко, Ю. Л. Формирование омических контактов тугоплавкий металл – кремний при ионной имплантации в область границы раздела : автореферат диссертации на соискание

ученой степени кандидата технических наук / Ю. Л. Бобченко. – Минск, 1987. – 16 с. – Текст : непосредственный.

30. Tsaur, B. Y. Ion-beam-induced silicide formation / B. Y. Tsaur, Z. L. Liao, J. W. Mayer // Applied Physics Letters. – 1979. – Vol. 34, № 2. – P. 168–170.

31. Snitovsky, Yu. P. The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region / Yu. P. Snitovsky // 6th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. (EFRE 2018). Sept. 16-22, 2018. – Tomsk : Abstracts. – P. 372.

32. Snitovsky Yu.P. The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region // 6th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. (EFRE 2018). Sept. 16 – 22, 2018. Tomsk, Russian: Abstracts. – P. 372.

33. Снитовский, Ю. П. Формирование омических контактов молибден/кремний при ионной имплантации в область границы раздела / Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61, № 8/2. – С. 155–159.

34. Солодуха, В. А. Управляемые процессы трансформации параметров кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов ионными пучками / В. А. Солодуха, Ю. П. Снитовский, Я. А. Соловьев. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2018. – Вып. 4 (51). – С. 23–37.

35. Ли, Д. Имплантированные полупроводниковые приборы / Д. Ли, Дж. В. Мейер. – Текст : непосредственный // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1974. – Т. 62, № 9. – С. 70–87.

36. Дехтяр, И. Я. Электронная структура и электронные свойства переходных металлов и их силицидов / И. Я. Дехтяр, В. В. Немошкаленко. – Киев : Наукова думка, 1984. – 304 с. – Текст : непосредственный.

37. Зайцев, А. А. Генераторная СВЧ-транзисторы / А. А. Зайцев, Ю. Н. Савельев. – Москва : Радио и связь, 1985. – 48 с. – Текст : непосредственный.

38. Свойства омических контактов молибден – кремний, облученных ионами бора, фосфора, аргона / Л. И. Гурский, Ю. Л. Бобченко, В. А. Зеленин [и др.]. – Текст : непосредственный // Спецэлектроника. Сер. Полупроводниковые приборы. – 1985. – Вып. 1. – С. 55–61.

39. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей : теория, метод расчета, таблицы / О. Н. Буренков, Ф. Ф. Комаров, М. А. Кумаков, М. М. Темкин. – Минск : Издательство БГУ, 1980. – 348 с. – Текст : непосредственный.

40. Berger, H. N. Contact resistance and contact resistivity / H. N. Berger // Journal of the Electrochemical Society. – 1972. – Vol. 119, № 4. – P. 507–514.

41. Гурский, Л. И. Особенности фазовых превращений в системе молибден – кремний, подвергнутой ионной бомбардировке / Л. И. Гурский, В. А. Зеленин, Ю. Л. Бобченко. – Текст : непосредственный // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 5. – С. 72–75.

42. Ивановский, Г. Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров. – Москва : Радио и связь, 1986. – 232 с. – Текст : непосредственный.

43. Данилин, Б. С. Вакуумно-плазменные процессы травления микроструктур. Ч. II. Рабочие газы и их влияние на параметры процесса травления / Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев, В. И. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1982. – Вып. 4. – С. 3–8.

44. Бороненко, М. П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.

45. Ohmi, T. Ultra clean processing / T. Ohmi // Microelectronic Engineering. – 1991. – Vol. 10, № 3-4. – P. 163–176.

46. Ohmi, T. Requirements of CAM in IC technology / T. Ohmi, T. Shibata // Microelectronic Engineering. – 1991. – Vol. 10, № 3-4. – P. 177–196.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВ
И МАТЕРИАЛОВ

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта 18-47-860018 р_а.*

О. Л. Исаева, М. П. Бороненко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПУПИЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ПРИБОРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

Перспективы применения искусственного интеллекта в видеоаналитике становятся все более неоспоримыми. Исследователи активно работают над методами принятия решений, принимаемых на основании результатов автоматизированного анализа последовательности изображений, поступающих с видеокамер. Целью нашего исследования стала разработка методики принятия решений на основе моделирования зрачковой реакции человека на информационный раздражитель. Для исследований применяли цифровую видеокамеру ZWO ASI120MC. Проведенные исследования позволили достоверно установить, что состояние оптической системы глаза при просмотре калибровочного слайда приходит к физическому состоянию, общему для всех людей. Это позволило систематизировать пупиллограммы, относя их к одной из двух категорий (стрессовое состояние есть/нет). Определив при калибровке индивидуальное пороговое значение, становится возможным проводить быструю классификацию эмоциональной реакции человека на полученный информационный импульс. На основании разработанной методики систематизации зрачковой реакции на информационный раздражитель по категориям построено дерево принятия решений для интеллектуальных систем видеонаблюдения. Помимо размеров зрачков алгоритм учитывает параметры фиксации взгляда на стимульных изображениях, стабильность освещенности поверхности зрачков.

Ключевые слова: пупиллограммы, модели зрачковых реакций, принятие решений.

O. L. Isaeva, M. P. Boronenko

EXPERIMENTAL METHODS OF PUPILLOGRAPHIC ANALYSIS BASED ON HIGH-SPEED VIDEO RECORDING DEVICES

The prospects for using artificial intelligence in video analytics are becoming more and more undeniable. Researchers are actively working on methods for making decisions based on the results of automated analysis of the sequence of images received from video cameras. The purpose of our study was to develop a method for decision-making based on modeling a person's pupillary response to an information stimulus. A ZWO ASI120MC digital video camera was used for research. The studies carried out made it possible to reliably establish that the state of the optical system of the eye when viewing the calibration slide comes to a physical state common to all people. This made it possible to systematize the pupillograms, referring them to one of two categories (stress state is / is not). Having determined an individual threshold value during calibration, it becomes possible to quickly classify a person's emotional response to the received information impulse. Based on the developed methodology for systematizing the pupillary reaction to an information stimulus by categories, a decision tree for intelligent video surveillance systems was built. In addition to the size of the pupils, the algorithm takes into account the parameters of gaze fixation on stimulus images, the stability of the illumination of the surface of the pupils.

Keywords: pupillograms, pupil response models, decision making.

Введение

Перспективы применения искусственного интеллекта в видеоаналитике становятся все более неоспоримыми. Исследователи активно работают над методами принятия решений, принимаемых на основании результатов автоматизированного анализа последовательности изображений, поступающих с видеочамер. Также ведется разработка средств, обеспечивающих оптимизацию взаимодействия человека и техники. Стремление научить понимать машину, что чувствует или хочет человек, ставит задачу моделирования реакции человека, в зависимости от условий, в которых он находится. Самым сложным является поиск паттернов, которые искусственный интеллект сможет распознавать или имитировать.

Алгоритмы видеоаналитики чаще всего используются в видеонаблюдении и других сферах безопасности. В таких системах обычно ведется поиск определенной личности [1], наркоманов [2], непосредственно совершающих противоправные действия. Разрабатываются методы, направленные на заблаговременное выявление опасных личностей. Известно, что внешние признаки эмоциональных состояний и форм поведения можно рассматривать как характеристики профиля потенциально опасных людей [3]. Одним из наиболее характерных признаков нештатных террористов — наличие сильной тревоги, попытках обмана и манипуляции [3]. При обязательном учете и других признаков, наличие стрессового (напряженного) состояния является одним из основных показателей, который можно применять для выявления опасных личностей. В стрессовом состоянии эмоциональная реакция человека отличается от обычной [4]. Babiker A. et al. [5] разработали метод обучающей машины для обнаружения и отличия положительных и отрицательных эмоций (a learning machine technique to detect and differentiate between positive and negative emotions.) на основании изменения диаметра зрачка в ответ на звуковые сигналы. Однако, данный метод не позволит указать причину эмоционального возбуждения при использовании в реальных условиях, так невозможно подтвердить наличие причинно-следственной связи.

Человек, особенно обученный, хорошо умеет скрывать свои эмоции и намерения. Поэтому принятие решений о злых намерениях не должно основываться только на присутствии улыбки на лице или отсутствии таковой. Поэтому актуально выявление паттернов, которые можно использовать для прогнозирования поведения человека и создания соответствующих алгоритмов.

Для выявления лжи и прогноза возможных действий обычно используют полиграф. Один из измеряемых параметров на полиграфе это кожно-гальваническая реакция (КГР). Zhang T. et al. [6] создали алгоритм, который извлекает основанные на корреляции признаки (диаметр зрачка и проводимость кожи). Так как КГР и размер зрачков коррелируют, то зрачковую реакцию можно использовать в системах безопасности, в которых наблюдение должно быть ненавязчивым (скрытым). Вероятность успеха увеличивают работы по повышению точности локализации и оконтуривания зрачка. Khan W. et al. [7] предлагают метод грубой и тонкой локализации зрачка, использующего комбинацию алгоритмов машинного обучения и обработки изображений. Предложенный метод превосходит предыдущие работы с точки зрения точности и надежности при бенчмаркинге на нескольких стандартных наборах данных.

Цель работы: разработать методику принятия решений на основе моделирования зрачковой реакции человека на информационный раздражитель. Для этого мы решаем следующие задачи:

1. Разработать методику систематизации пупиллограмм.
2. Построить модели зрачковых реакций, которые будут соответствовать определенной категории пупиллограмм.
3. Построить дерево принятия решений с применением разработанной методики.

Методы и техника эксперимента

Использование в системах безопасности пупиллографии и айтрекинга приводят к необходимости анализировать большой объем информации. Входными данными является последовательность изображений зрачков, по сути набор окружностей разных размеров. Чтобы

производить анализ зрачковой реакции и делать какие-то выводы о психофизическом состоянии человека, нужно систематизировать эти входные данные.

Для получения пупиллограмм использовали цифровую видеокамеру ZWO ASI120MC (30 fps, объектив с оптическим увеличением 1X-100X), шлем, с помощью которого создается жесткая координатная связь с видеокамерой. Основой шлема является каркас сварочной маски, обтянутый мягким материалом. Видеокамера крепится к плоскости, приваренной к полой алюминиевой трубке. Крепление позволяет корректировать наклон видеокамеры и направить объектив на зрачок глаза [8, 9]. Трубка пропускается через два отверстия в каркасе шлема. Величина отверстий регулируется, что позволяет зафиксировать положение трубки. Намеренный сдвиг трубки вдоль оси отверстий делает возможным регулировать расстояние между объективом и глазом. Это позволяет улучшить качество получаемых видеофайлов. Модуль для исследования пупиллограмм представлен на рисунке 1.

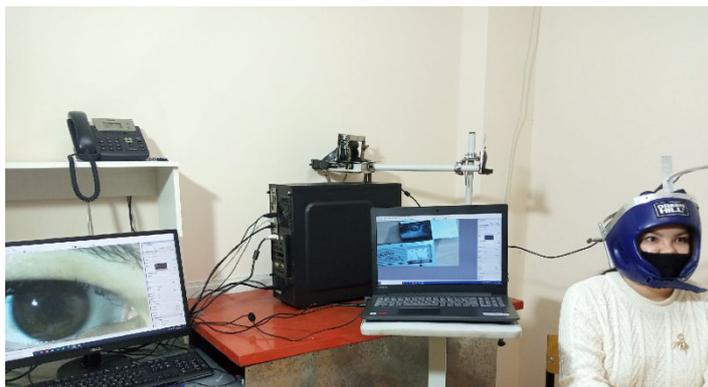


Рисунок 1 – Пупиллографический модуль для регистрации изменений размера зрачка

Жесткая связь видеокамеры с головой позволяет избежать искажений трека внимания и облегчает обработку изображений. Анализ полученных результатов осуществлялись в два этапа. Препарирование изображений, обработка и оконтуривание зрачков проводилось с помощью программы ImageJ. Визуализация результатов была проведена в программе Origin19.

Для эксперимента были приглашены добровольцы, всего приняло участие более 60 студентов (юношей и девушек различных национальностей). Все испытуемые не имели болезней глаз или же зрение было скорректировано (очки, линзы). Во время эксперимента участники по очереди располагались на стуле, шлем надевали на голову, с экрана монитора демонстрировали стимульный материал. Между человеком и монитором было расстояние, при котором изменение освещенности поверхности глаза, обусловленная свечением монитора, становится несущественным.

Испытуемым поочередно через равные промежутки времени предоставлялись изображения (тест-объекты), несущие заранее запланированную информацию, и калибровочные слайды. Ничего запрещенного не демонстрировалось. Для проведения экспериментов использовалась презентация, каждый слайд которой содержит один из стимулов (изображений) с наиболее вероятным эмоциональным откликом. Стимульные изображения выбирались на основании статистического анализа результатов социального опроса. Участники опроса оценивали величину эмоций, вызванных при просмотре предложенных изображений (тест-объектов). Соответственно результатам опроса по шкале от 0 до ± 5 (самая сильная эмоция): слайды, содержащие изображение сколопендры, пауков вызывают эмоциональную реакцию с вероятностью $p=0,42$; изображение гробовых плит вызывает эмоцию с вероятностью $p=0,64$. Информация, содержащаяся на изображениях, несмотря на тривиальность, должна по-разному воздействовать на испытуемых. Некоторые боятся насекомых, некоторые к ним равнодушны и т. д. Поэтому реакция на стимульный материал ожидалась разной: от равнодушия до проявления страха (стресса, напряженного состояния). Перед испытанием каждого участника инструктировали, о требованиях к процедуре испытания и порядке ее прохожде-

ния. Также для каждого участника проводится регулировка кресла и экрана монитора, поскольку каждый человек имеет свои физиологические особенности. Общее время всей процедуры исследования занимает не более 5 минут, что не влияет на утомляемость респондента, но достаточно для отслеживания зрачковой реакции на информационный стимул [10]. После окончания эксперимента испытуемому предлагали оценить возникшее эмоциональное состояние при просмотре тест-объектов. Все участники после окончания эксперимента были довольны.

Модели данных

Прогнозирование поведения человека необходимо осуществлять методами, совместимыми с методами машинного обучения. Один из способов – это формализация эмпирических данных и представление их в виде математических моделей и алгоритмов.

Последовательно зарегистрированные пупиллограммы представляют собой сложную функцию чередующихся минимумов и максимумов. Зависимость размера зрачков от времени, в общем виде, можно представить вводя поправочные коэффициенты, учитывающие факторы, оказывающие основное влияние на изменение размеров – освещенность $\mathcal{E}(t)$, триадную реакцию [11] $\alpha(t)$ и испытываемую эмоцию (напряжение) или повышенное внимание $\Psi(t)$ (1):

$$S(t) = S\mathcal{E}(t)\alpha(t)\psi(t). \quad (1)$$

Для того, чтобы расшифровывать такие графики правильно, нужно знать, какой из пиков чем обусловлен. Так как стрессовое состояние характеризуется отличной от нормы эмоциональностью, то необходимо классифицировать пупиллограммы: содержащие эмоции и не содержащие.

Чтобы систематизировать пупиллограммы и находить в них участки эмоциональной реакции человека, нужно выбрать, относительно чего рассматривать изменение размеров зрачков. Широкий спектр внутренних и внешних причин, влияющих на зрачковую реакцию, не позволяет назвать конкретный диаметр зрачков, относительно которого нужно рассматривать все пупиллограммы. Даже среднестатистическое значение нельзя принять за точку отсчета. Однако при всем различии есть общий для всех физический принцип функционирования оптической системы глаза, которое позволяет сделать выбор. В связи с этим, на пупиллограммах участки концентрации внимания находятся ниже калибровочного уровня (индивидуально). Их можно считать волнами внимания и отнести их к процессу распознавания объектов человеком. Соответственно, после идентификации наблюдаемого объекта человек автоматически оценивает его уровень значимости, в результате чего возникает/не возникает эмоциональный отклик (напряженное состояние). Если эмоциональная реакция не возникает, то размеры зрачка продолжают флуктуировать вокруг калибровочного значения до поступления новой информации.

Модель М0 (калибровочная)

Для того чтобы иметь возможность сравнивать пупиллограммы разных людей нужно нормировать данные. Нормировка должна быть индивидуальна, и должна учитывать первоначальное психофизическое состояние человека. Этим требованиям отвечает состояние зрительной системы человека (при наблюдении калибровочных слайдов). Нормировка делает возможным сравнивать пупиллограммы разных людей. Для проверки данного факта были проведены эксперименты [12] по описанной выше методике. Предварительно данные подвергались очистке от артефактов, обусловленных морганием. Проверка данных на нормальность дала отрицательный результат (большая часть данных не подчиняются закону нормального распределения), несмотря на то что объемы выборок достаточно большие. Так как в данном случае исследовалась зрачковая реакция разных людей, было принято решение применять критерий Краскела-Уоллиса, иногда еще называемый непараметрическим дисперсионным анализом. Критерий Краскела-Уоллиса рассчитывается с использованием не фактических значений перемешанных, а их рангов, поэтому является методом выбора при сильно скошенных распределе-

ниях. Так же, как и дисперсионный анализ, критерий Краскела-Уоллиса позволяет выяснить, имеются ли различия между группами. По результатам статистического анализа установлено, что при просмотре калибровочных слайдов зрачковая реакция достоверно не отличается: the difference of the means is not significant at the 0.01 level (Таблица 1). Это является очень важным выводом, т. к. дает основание для построения трехуровневой модели зрачковой реакции. Пупиллограммы, отнесенные к этому уровню хорошо описываются Weibull peak function (2) и (3):

$$S = \frac{x-x_c}{w_1} + \left(\frac{w_2-1}{w_2}\right)^{\frac{1}{w_2}} \quad (2)$$

$$y = \begin{cases} y_0, S \leq 0; \\ y_0 + A \left(\frac{w_2-1}{w_2}\right)^{\frac{1-w_2}{w_2}} S^{w_2-1} e^{-S^{w_2+\left(\frac{w_2-1}{w_2}\right)}}, S > 0. \end{cases} \quad (3)$$

В работе Mortensen Uwe [13] рассматривается возможность применения распределения Weibull для определения психометрической функции. Интерпретация параметров модели активности нейронов, генерируемой стимулом, сложна. Поэтому функцию Weibull можно осмысленно использовать только в качестве приближения. Тем не менее, прослеживается связь психометрической функции с активностью зрительной системы. Таким образом, полученный результат позволяет систематизировать пупиллограммы и построить трехуровневую модель зрачковых реакций, которая обеспечивает сохранение индивидуального подхода.

Модель М1 (внимание) и Модель М2 (стресс/эмоция)

Как известно, даже в условиях отсутствия эмоций, при рассматривании деталей изображения центр внимания смещается. Это приводит к изменению размеров зрачков, в соответствии с угловыми размерами рассматриваемого объекта и испытываемыми эмоциями. На слайды с изображением высоты, вероятность даже слабого эмоционального отклика оказалась мала ($p < 0,1$). Таким образом, согласно статистическому анализу, это изображение вызывает только внимание при рассматривании деталей. Поэтому эти изображения можно использовать при моделировании внимания в пупиллограммах без эмоций. Таким образом, слайды презентации включали изображения, на которые реакция наиболее вероятна. При просмотре калибровочных слайдов, полезная информация равна нулю, состояние зрачка, соответственно статистическому анализу (таблица 1) не отличается от калибровочного состояния. При просмотре изображений, не вызывающих эмоции, изменение размеров зрачков объясняется только аккомодацией и скольжением взгляда по рассматриваемому объекту (при прочих равных условиях). Если же при просмотре стимульного материала у человека появляются эмоции, значит информация была важной. Сильные эмоции приводят к превышению калибровочных значений относительного размера зрачков. Поэтому проверялась гипотеза H_0 : Выборка пупиллограмм респондентов, рассматривающих изображения, не вызывающих эмоционального отклика не отличается от выборок пупиллограмм респондентов, рассматривающих калибровочный слайд и не испытывающих эмоцию.

Зрачковая реакция на стимул, вызывающий эмоцию, должна быть другая. Поэтому проверялась еще одна гипотеза H_0 : Выборка пупиллограмм респондентов, рассматривающих изображения, которые с наибольшей вероятностью должны вызывать эмоциональный отклик, не отличается от выборок пупиллограмм респондентов, рассматривающих калибровочный слайд и слайд, не вызывающий эмоций.

Для связанных выборок, проверка статистических гипотез осуществляется Friedman ANOVA. Таким образом, достоверно отличаются друг от друга зрачковые реакции на калибровочный слайд, на слайд, вызывающий эмоции и не вызывающий эмоциональной реакции.

Выбор метода статистического анализа основан на том, что сравниваемые пупиллограммы принадлежат одним и тем же людям, но относятся к разным тест-объектам. Поэтому выборки пупиллограмм относятся к зависимым группам. Для связанных выборок, проверка статистических гипотез осуществляется Friedman ANOVA. Результаты показаны на рисунке 2а, в таблице 1.

Таблица 1 – Friedman Anova

Descriptive Statistics						
	N	Min	Q1	Median	Q3	Max
«non-emotional stimulus 1»	103	0.838	0.879	0.918	0.940	1.005
«non-emotional stimulus 2»	103	0.882	0.900	0.916	0.935	1.081
«calibration»	103	0.901	0.966	1	1.041	1.112
Ranks						
	N	Mean Rank	Sum Rank			
«non-emotional stimulus 1»	103	1.665	171.5			
«non-emotional stimulus 2»	103	1.519	156.5			
«calibration»	103	2.816	290			
Test Statistics						
Chi-Square	DF	Prob>Chi-Square				
103.84951	2	0				

At the 0.01 level, the populations are significantly different. Это означает, что даже без эмоциональной реакции размеры зрачков отличаются от нормально расширенного состояния, что объясняется концентрацией взгляда на деталях изображения, то есть распознаванием предметов на изображении. Аппроксимация экспериментального участка пупиллограммы, характеризуемый как «концентрация внимания» представлена на рисунке 2б.

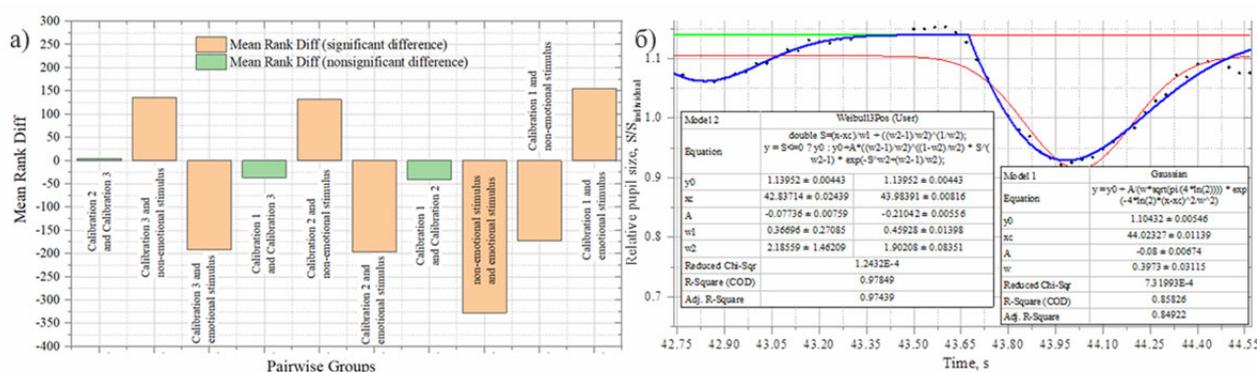


Рисунок 2 – а) результаты сравнения зрачковой реакции на разные стимулы:
 б) аппроксимация экспериментального участка пупиллограммы, характеризуемый как «концентрация внимания»

Подбор математической модели для участка пупиллограммы, характеризуемый как «концентрация внимания» показал, что Weibull3Pos лучше описывает экспериментальные данные, чем Gaussian. Модель M1 «концентрация внимания» также учитывает индивидуальные особенности человека.

В случае наличия эмоции подтверждено отличие зрачковой реакции, чем при безразличии. Одна и та же информация может быть значимой для одного индивида и не представляющей интерес для другого. Чем важнее информация, тем большую эмоцию она может вызвать. В процессе распознавания и осознания поступающей информации размеры зрачков изменяются в зависимости от величины испытываемых эмоций (пропорционально уровню значимости). Соответственно, после идентификации наблюдаемого тест-объекта каждый человек автоматически оценивает его уровень значимости для себя, в результате чего возникает/не возникает эмоциональный отклик. Если стимул несет важную информацию для индивида, то изменение размеров зрачков, обусловленное эмоцией, превосходит изменения, вносимые напряженными глазными мышцами. При возникновении устойчивой сильной эмоции (или напряженного состояния) на пупиллограммах наблюдается рост относительного значе-

ния размеров зрачка. На кривую эмоционального роста накладываются более мелкие – волны концентрации внимания. Понятно, что Weibull функция зависит от его параметров более гибким образом, чем распределение Гаусса. Однако в случае пупиллограммы, содержащей эмоциональные участки, функция не может быть адаптирована к данным. Различие зрачковой реакции приводит к тому, пупиллограмму с наличием stress/emotion лучше описывает функция Gaussian (рис. 3).

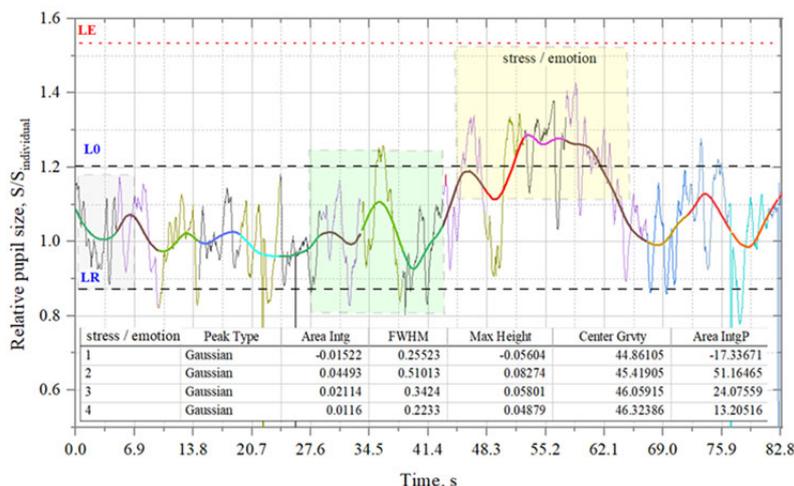


Рисунок 3 – Динамика зрачковой реакции на информационный стимул: серая область – калибровка; зеленая область – концентрация внимания; желтая область – стресс/эмоция

Очевидно, что модель находится в согласии с теорией [14]: при продолжительном воздействии различных факторов эмоции накапливаются. Так же и при проявлении слабых эмоций. Новая информация (несколько тест-объектов подряд), приводит к возрастающему психологическому напряжению, наблюдается кумулятивный эффект. В отличие от M0 и M1 математическая модель M2 лучше описывается Gaussian. Благодаря нормировке математическая модель также учитывает индивидуальные особенности человека.

На данном этапе исследований можно выделить три категории (уровня) пупиллограмм. Категория (уровень) 1 – это калибровочные пупиллограммы. Данная категория (уровень) описывает общее для всех людей состояние зрительной системы, характеризующееся индивидуальными особенностями каждого. Категория (уровень) 2 – область фокусировки внимания. Категория (уровень) 3 – это эмоциональное состояние/психологическое напряжение человека.

Уровневая модель зрачковой реакции и алгоритм принятия решений

Одной из задач современных систем безопасности является предупреждение противоправных действий. Также выявление напряженного состояния человека важно и в других областях. В предлагаемой методике принятие решения осуществляется на основе синхронизированных данных айтрекинга и пупиллограмм.

Как показано выше, выборки пупиллограмм, соответствующих уровням распознавания LR (или аккомодации, фокусировке на деталях изображения) и эмоциональной реакции LE (информация важна для индивида) достоверно отличаются. Следовательно, на любой пупиллограмме можно выделить от 1 до 4 зон (рис. 3). Таким образом, измерив ширину зоны пупиллограммы, соответствующей калибровочному L0 состоянию зрачков, и отметив ее на всей пупиллограмме (выполнить индивидуальную настройку пупиллографического модуля), становится возможным быстро определить психофизическое состояние человека. На основании того, к какому уровню отнесена реакция человека будет приниматься решение, например, системами безопасности. Этот подход применим для построения алгоритма принятия решений. Кроме размеров зрачков, как минимум, следует синхронно отслеживать трек внимания, контролировать освещенность.

Для построения алгоритма принятия решений в системах безопасности нужно применять следующий подход. На мониторе, при описанных выше условиях, демонстрируют изображения определенной тематики. В качестве стимулов могут применяться изображения, содержащие подробности, которые могут знать малый процент людей. Такие подробности обычно не вызывают интереса у несведущих. Тогда вероятность того, что область интереса и трек центров внимания совпадут не более 0,1. Ведется видеонаблюдение зрачковой реакции в ответ на полученную на информацию. Человек, который видит стимул проявляет свой интерес тем, что фокусирует взгляд на значимых элементах изображения. В зависимости от степени значимости информации, содержащейся в изображении, проявляется эмоция/ напряженность. Для таких тест-объектов дерево принятия решения можно представить в виде (рис. 4):

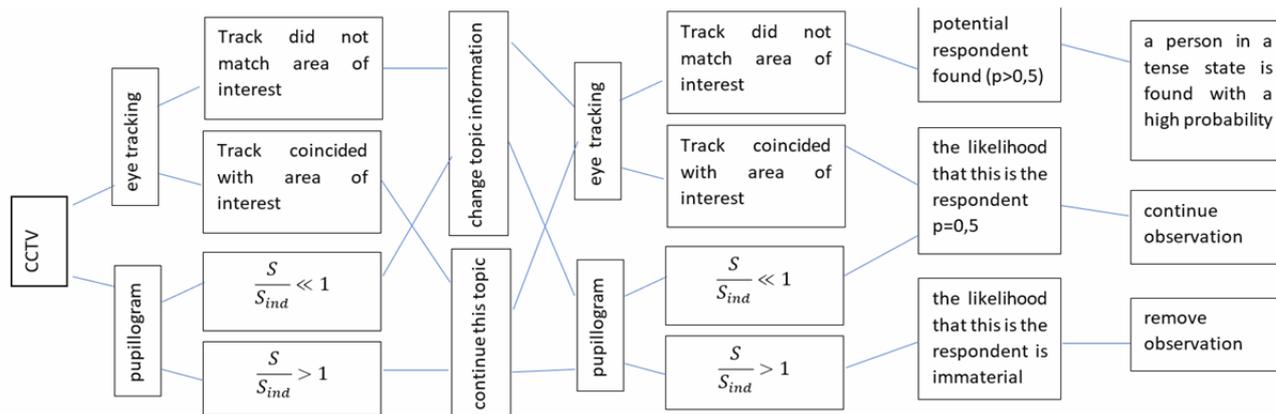


Рисунок 4 – Дерево принятия решений

Расширенное дерево решений должно включать стабильность освещенности, масштаба и другие параметры. Точность принятия решений повышается с увеличением количества итераций.

Основные выводы

На основании проведенных экспериментов установлено:

1. Участки пупиллограмм – зрачковых реакций на калибровочные слайды M0 и стимулы, не вызывающие эмоций M1 описывается функцией Weibull3Pos и учитывают индивидуальные особенности человека. Пупиллограмма, описывающая состояние психологического напряжения/эмоции благодаря нормировке, также учитывает индивидуальные особенности человека и лучше описывается функцией Gaussian. Математическая формализация пупиллограмм в будущем может позволить идентифицировать конкурирующие процессы сжатия – расширения зрачков.

2. Достоверно установлено (at the 0.01 significance level), что не отличаются зрачковые реакции разных людей на калибровочный слайд. Достоверно установлено (at the 0.01 significance level) отличие зрачковой реакции на эмоциональный стимул.

Этот факт позволил систематизировать пупиллограммы по категориям, относя их к одному из уровней: калибровочному L0, распознавания LR, состояние психологического напряжения/эмоции LE. Разбиение на уровни индивидуально для каждого человека.

3. Описанная методика систематизации пупиллограмм по категориям позволяет построить дерево принятия решений для интеллектуальных систем видеонаблюдения. Алгоритм позволяет определить: нужно ли продолжать видеонаблюдение за объектом, или нет.

Результаты исследований могут быть полезны в медицине при выявлении стрессового состояния человека, в образовании, в системах искусственного интеллекта.

Литература

1. Кольцов, А. С. Использование алгоритмов видеоаналитики в задачах выделения и распознавания человеческого лица в цифровом видеосигнале / А. С. Кольцов, Т. Е. Урусова, П. Ю. Гусев. – Текст : непосредственный // *Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы*. – Воронеж, 2018. – С. 33–35.
2. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст: непосредственный // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2014. – № 1 (31). – С. 60–64.
3. Каменева, М. Е. Психологические профили потенциально опасных лиц / М. Е. Каменева. – Текст : непосредственный // *Вестник Московского университета МВД России*. – 2010. – № 11. – С. 12–18.
4. Elevated response of human amygdala to neutral stimuli in mild post traumatic stress disorder: neural correlates of generalized emotional response / M. Brunetti [et al.] // *Neuroscience*. – 2010. – Т. 168, № 3. – P. 670–679.
5. Machine learning to differentiate between positive and negative emotions using pupil diameter / A. Babiker [et al.] // *Frontiers in psychology*. – 2015. – № 6. – P. 19–21.
6. CorrFeat: correlation-based feature extraction algorithm using skin conductance and pupil diameter for emotion recognition / T. Zhang [et al.] // *2019 International Conference on Multimodal Interaction*. – 2019. – P. 404–408.
7. Pupil Localisation and Eye Centre Estimation Using Machine Learning and Computer Vision / W. Khan [et al.] // *Sensors*. – 2020. – № 20 (13). – P. 3785.
8. Development of a method for adjusting the coordinates of the center of attention in the absence of fixation of the head / E. S. Kiseleva, O. L. Isaeva, M. P. Boronenko, V. I. Zelensky. – doi:10.1088/1742-6596/1695/1/012087 // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. – 2020. – Vol. 1695, №1. – P. 012087.
9. Determination of the fear coefficient by pupillograms / O. L. Isaeva, M. P. Boronenko, V. I. Zelensky, E. S. Kiseleva. – DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012062 // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. – 2020. – Vol. 1695, № 1. – P. 012062.
10. The Problem of Tracking the Center of Attention in Eye Tracking Systems / M. Boronenko, V. Zelensky, O. Isaeva, E. Kiseleva // *In International Conference on Intelligent Human Systems Integration*. – 2020. – P. 365–371.
11. Фоменко, В. Н. Параметры реакции зрачка при аккомодации зрения / В. Н. Фоменко, А. И. Кубарко. – Текст: непосредственный // *Материалы конференции биологического факультета БГУ*. – 2017. – С. 123.
12. Model of Emotionally Stained Pupillogram Plot / M. Boronenko, Y. Boronenko, O. Isaeva, E. Kiseleva. – DOI : org/10.1007/978-3-030-39512-4_62 // *In International Conference on Intelligent Human Systems Integration*, Springer, Cham. – 2020. – P. 398–403.
13. Mortensen, U. Additive noise, Weibull functions and the approximation of psychometric functions / U. Mortensen // *Vision Research*. – 2002. – № 42.20. – P. 2371-2393.
14. Shevchenko, R. P. Disorders of the psycho-emotional sphere in military personnel with psychosomatic and neurotic registers / R. P. Shevchenko // *Наука і освіта*. – 2015. – № 3. – 134–138.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-47-860018 р_а.

О. Л. Исаева, Р. Р. Ключникова

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРЕССОВОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Работа посвящена разработке методики выявления напряженного состояния (стресса) с помощью видеокамеры. Проводились эксперименты по определению напряженного состояния двумя методами: измерение кожно-гальванической реакции с помощью «Активациометр-6» и методом пупиллографии. Сравнительный анализ пупиллограмм и графиков кожно-гальванической реакции (КГР) показал, что результаты измерений двумя методами согласуются при условии наличия эмоции: корреляция $p=0,88$ при наличии ответной реакции на тест-объект и ее уменьшение при снижении реакции. В сочетании с другими методами (айтрекинг, виброизображение), возможно проводить дистанционно диагностику напряженного состояния, что позволит предотвратить агрессивное поведение людей, суициды и др.

Ключевые слова: напряженное состояние, пупиллография, кожно-гальваническая реакция, активациометр, тест-объекты.

O. L. Isaeva, R. R. Klyuchnikova

METHOD FOR DETECTING HUMAN STRESS STATE FOR VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS

The work is devoted to the development of a technique for identifying a stressed state (stress) using a video camera. Experiments were carried out to determine the stress state by two methods: measurement of galvanic skin response using the "Activatiometer-6" and by the method of pupillography. Comparative analysis of pupillograms and graphs of galvanic skin response (GSR) showed that the results of measurements by the two methods are consistent under the condition of the presence of emotion: correlation $p=0.88$ in the presence of a response to the test object and its decrease with a decrease in the response. In combination with other methods (eye tracking, vibraimage), it is possible to carry out remote diagnostics of a stress state, which will prevent aggressive behavior of people, suicides, etc.

Keywords: stress state, pupillography, galvanic skin reaction, activationometer, test objects.

Введение

В связи с участвующими проявлениями агрессии и террористической угрозой, проблема объективной прогнозирования поведения человека, связанного с оценкой его психологического состояния человека, относится к числу наиболее актуальных. Напряженное состояние понимается как совокупность деятельностных состояний организма, характеризующихся повышением уровня функционирования систем по сравнению с состоянием покоя [1]. Чтобы напряженное состояние не приняло крайние формы, необходима своевременная диагностика.

Для диагностики напряженного состояния используется ряд физиологических, психофизиологических и биохимических показателей. Например, Алпатов А. В. и др. используют метод флуктуационного анализа ЭЭГ в задачах контроля напряженных состояний человека-

оператора [2]. Юматов Е. А. и др. [3] разработали метод выявления напряжения/стресса, основанного на регистрации вегетативных показателей человека и на расчете кросскорреляционных коэффициентов. Также разработано специальное портативное устройство. Однако при использовании данного метода нельзя определить причину напряженного состояния, возможно определить только его величину. Чо и др. предложили перспективный подход к распознаванию напряженного состояния/стресса с помощью тепловизионной камеры [4].

Также идентификация психоэмоционального состояния человека возможна по мимике, анализу звуковых волн [5], виброизображению [6]. Однако определение эмоционального состояния по мимике может быть недостоверным, поскольку человек может подделать «нужное» выражение лица. Анализ звуковых волн не будет работать, если человек молчит. Идентификация по виброизображению не регистрирует малые изменения в психофизическом состоянии. Для дистанционной диагностики психологического состояния искусственным интеллектом из вышеперечисленных подходит только наблюдение за мимикой, анализ звуковых волн и виброизображение. Таким образом, остается актуальным совершенствование дистанционного метода определения напряженного состояния. При этом если научиться выявлять напряженное/стрессовое состояние по изменениям размеров зрачков, то станет возможным прогнозировать поведение людей.

Цель работы – разработать методику выявления напряженного состояния человека системами видеонаблюдения.

Задачи:

1. Провести эксперименты по выявлению напряженного состояния двумя методами: с помощью пупиллографического модуля и регистрации изменений КГР.
2. Сравнить полученные результаты, проверить наличие корреляции между изменением размеров зрачков и КГР.

Методика выявления напряженного состояния

Техника проведения эксперимента

Измерение психоэмоционального состояния проводили с помощью активациометра, регистрирующего кожно-гальваническую реакцию (КГР). Использовалась стандартная методика [7].



Рисунок 1 – Процедура диагностики на приборе модели «АЦ-6»

После данной процедуры с помощью оптоэлектронной системы (рис. 2) производится видеосъемка реакции зрачка.

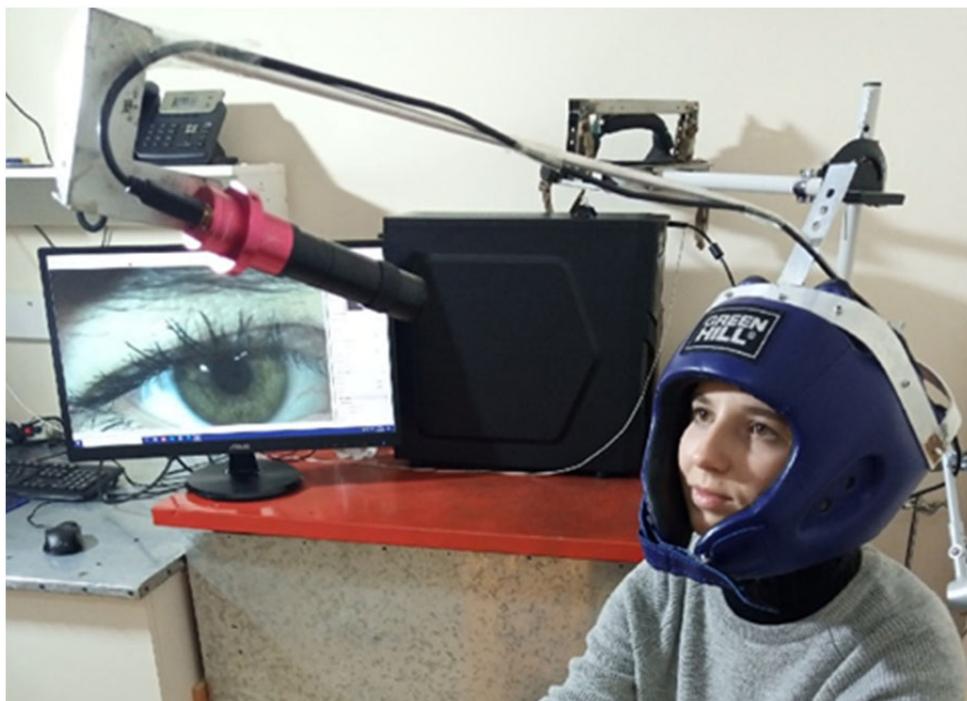


Рисунок 2 – Пупиллографический модуль регистрации изменений размеров зрачка

Пупиллографический модуль состоит из видеокамеры и специального шлема. Использовалась цифровая видеокамера ZWO ASI 120MC-S со скоростью видеосъемки 30 кадр/с на основе цветной матрицы AR0130CS с размерами пикселя 3,75 x 3,75 мкм и рабочей областью 4,8 x 3,6 мм. Разрядность АЦП составляет 12 бит (4096 уровней). Матрица камеры защищена встроенным фильтром, который отсекает инфракрасную часть спектра.

Процедура видеосъемки оптоэлектронной системой начинается с того, что испытуемый садится на стул, на него надевается специальный шлем, создающий жесткую координатную связь головы и видеокамеры. Затем испытуемый смотрит на экран телевизора (расположен на стене), с которого демонстрируется стимульный материал. При этом расстояние от стула до стены составляет не менее двух метров. Так как все испытуемые имеют разные физиологические особенности, необходимо корректировать угол наклона видеокамеры в соответствии с каждым человеком. Процедура видеосъемки зрачка длится не более 10 минут.

Испытуемым было предложено посмотреть презентацию, состоящую из 13 калибровочных слайдов и 11 стимульных материалов (изображений). На последнем слайде презентации было представлено фото молодого человека. Данный молодой человек до проведения эксперимента (за несколько дней или часов) заходил во время учебного процесса в кабинет к студентам (преподаватель в это время отсутствовал в кабинете), с целью исправить оценку в журнале преподавателя (данное действие было заранее согласовано с преподавателем).

Эксперимент проводили с согласия участников. Всего приняло участие 50 человек в возрасте от 17 до 35 лет. Присутствовали представители мужского и женского пола, представители разных национальностей. Все испытуемые не имели болезней глаз или же зрение было скорректировано (очки, линзы).

Обработка и анализ полученных данных

Проблема точного выделения зрачка связана с оконтуриванием. Во многих случаях очень важно выделить зрачок, отследить его размеры и трек. Для оконтуривания зрачков существуют различные методы. Можно назвать морфологическое выделение круга, проекции яркости или ее градиента, построение оптимального контура. Мы для препарирования изображений, обработки и оконтуривания зрачков используем программу Fiji. Процесс обработки представлен на рис. 3.

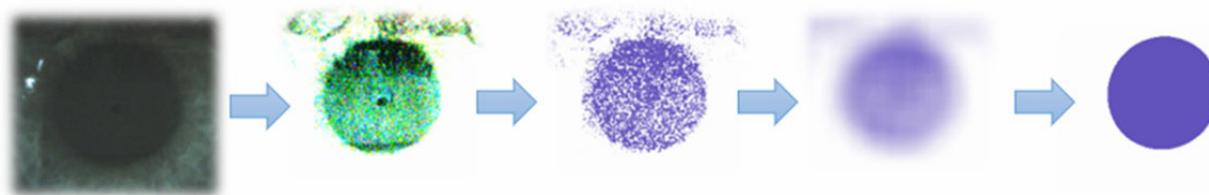


Рисунок 3 – Процесс оконтуривания зрачка

Визуализация результатов была проведена в программе OriginLab20.

Сравнение результатов, полученных двумя методами

На всех участников эксперимента воздействовали одинаковым визуально-информационным стимулом. Участники эксперимента были поделены на две категории. Люди из первой категории присутствовали в кабинете и наблюдали за тем, как молодой человек пытается исправить оценку в журнале преподавателя. Люди из второй категории (контрольная группа) не присутствовали на паре, то есть они ничего не видели. Таких студентов было 5. Мы предположили, так как студенты скрывали от преподавателя факт попытки внесения исправлений в журнал, то они должны были находиться в напряженном состоянии. Напряженными считаются моменты, наполненные стресс-факторами, когда оказываются важными последствия очередности событий [1].

Подтверждением того, что человек находится в напряженном состоянии, является превышение ситуативного показателя над индивидуально-типологическим сверх нормы. В отличие от индивидуально-типологического показателя психического состояния ситуативный показатель отражает психическое состояние человека в конкретной ситуации. На рис. 4 отмечены два уровня психоэмоционального состояния, соответствующие стандартизированным показателям по диагностической шкале психоэмоциональных состояний [7]: красная линия – уровень «чрезмерно», желтая линия – уровень «выше среднего».

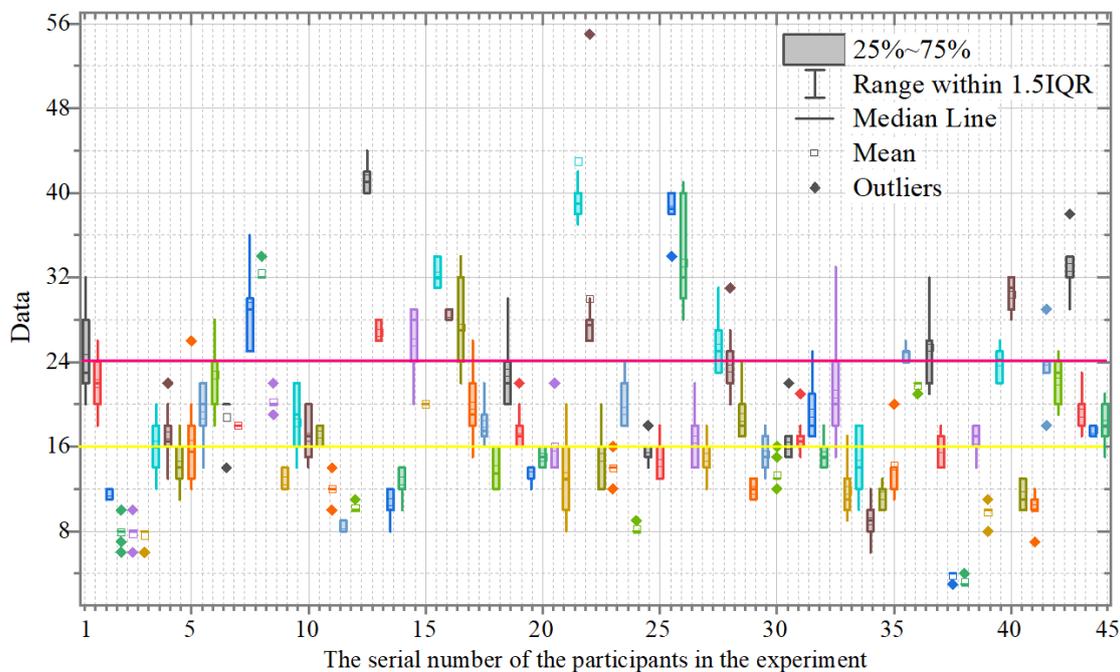


Рисунок 4 – Статистика измерений кожно-гальванической реакции

Однако студенты могли испытывать волнение из-за самой процедуры измерения из-за чего показатели их психоэмоционального состояния могли находиться на одном из этих уровней. Поэтому необходимо измерить величину воздействия именно стимульного материала (фото моло-

дого человека, который пытался внести изменения в журнал преподавателя) на испытуемого. В связи с этим измерения ситуативного показателя психического состояния проводили до и после воздействия стимульного материала. Для дополнительного подтверждения результатов после проведения эксперимента участникам задавался вопрос: «Встречали ли Вы когда-нибудь этого человека?». При этом испытуемый прижимал пластинчатые электроды прибора «Активациометр», что позволяло измерять КГР непосредственно в ходе осмысления заданного вопроса и спустя несколько секунд после него. Отсутствие реакции должно означать, что испытуемый говорит правду; в то время как наличие реакции означает, что он утаивает информацию.

Общее эмоциональное состояние всех участников эксперимента можно оценить по усредненному значению индивидуальных ситуативных показателей испытуемых. Проверка гипотезы, что значение ситуативного показателя после воздействия стимульного материала превышает значение ситуативного показателя до воздействия стимульного материала, производилась с помощью сравнительного анализа результатов измерений. Сравнительный анализ проведенных измерений до (1) и после (2) воздействия стимулов представлен в таблице 1.

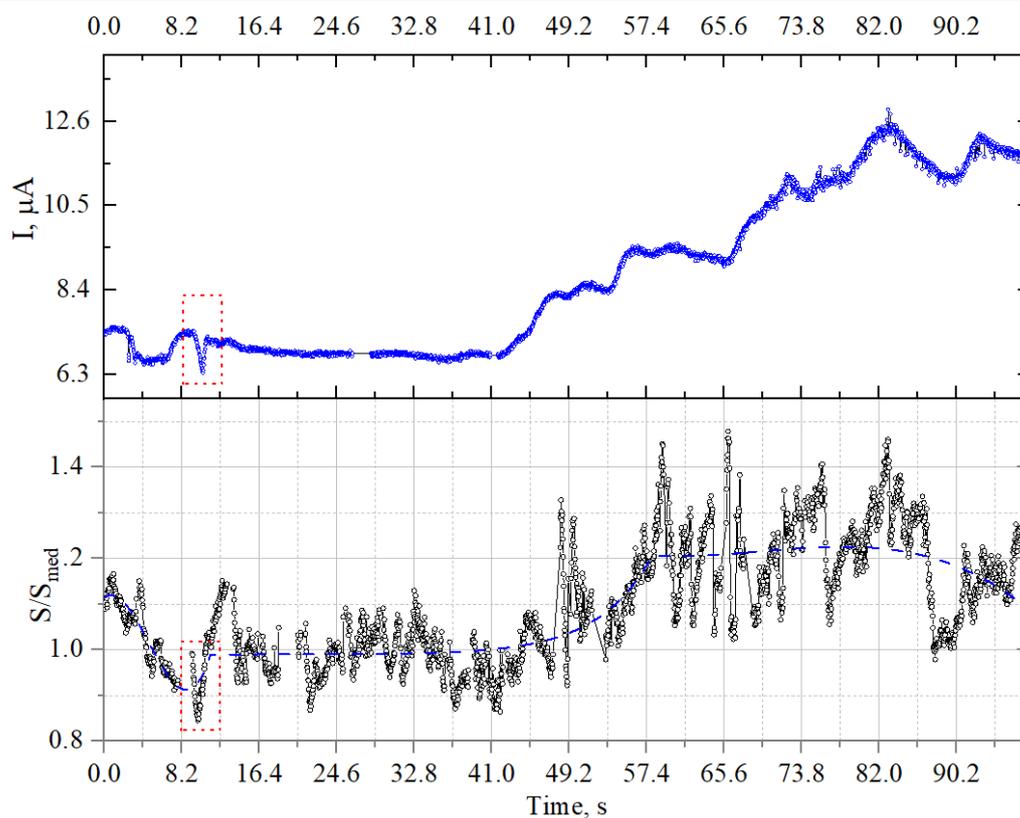
Таблица 1 – Сравнение средних значений ситуативных показателей

Описательная статистика						
VAR	N	Среднее	Среднеквадратичное отклонение	Дисперсия	Минимум	Максимум
24.4 (1)	43	19,9814	8,5131	72,4735	3,8	43,
22 (2)	43	16,8233	7,016	49,2237	3,2	33,4
Отчет о средних значениях ситуативных показателей						
VAR	Среднее	99.9 % LCL		99.9 % UCL		
24.4 (1)	19,9814	15,3885		24,5742		
22 (2)	16,8233	13,0381		20,6084		
Средняя разница (1-2)	3,1581	0,5552		5,7611		
Парный двухвыборочный t-тест						
Предполагаемая средняя разница				0,		
Средняя разница				3,1581		
Дисперсия				60,8486		
Пирсон R				0,8239		
Статистика теста				4,2924		
Степени свободы				42		
H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ / Не равно (двусторонний)						
t критическое значение (0,1 %)	3,5377	p-значение	0,0001	H1 (0.1 %)		Принято
H1: $\mu_1 - \mu_2 < 0$ / меньше (нижний хвост)						
t критическое значение (0,1 %)	-3,296	p-значение	0,9999	H1 (0.1 %)		Отклонено
H1: $\mu_1 - \mu_2 > 0$ / Больше чем (верхний хвост)						
t критическое значение (0,1 %)	3,296	p-значение	5,0954E-5	H1 (0.1 %)		Принято

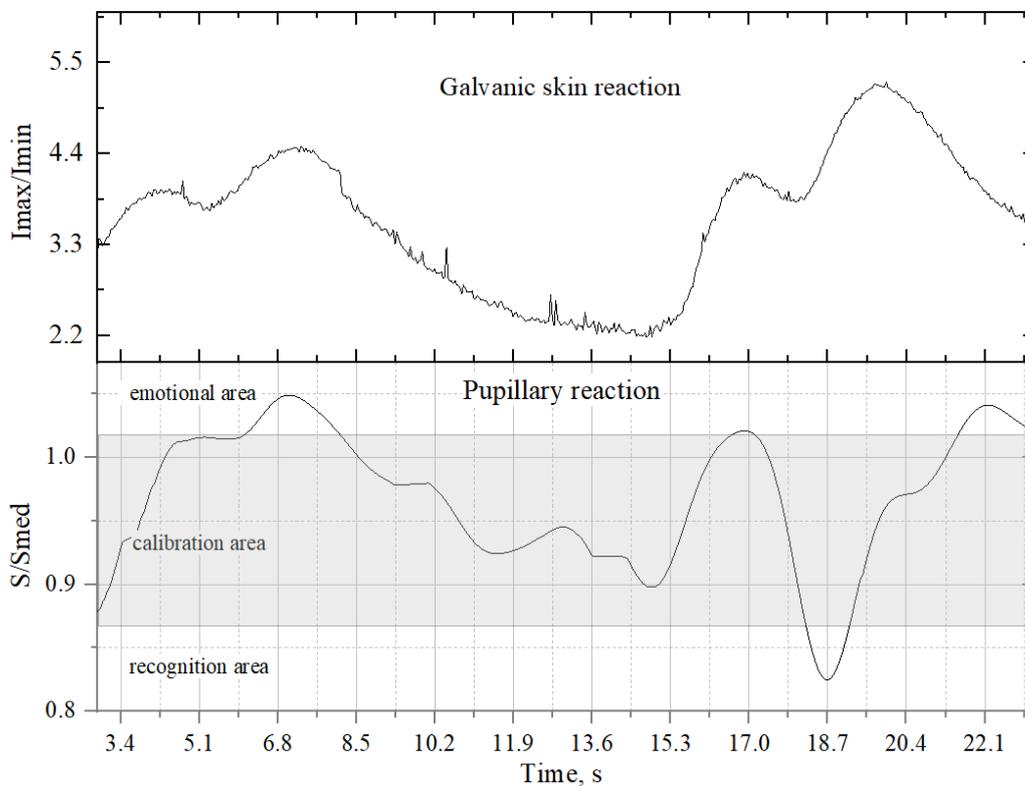
Оказалось, что среднее значение ситуативного показателя уменьшилось. Логично предположить, что у большинства испытуемых напряженное состояние сверх нормы было обусловлено процедурой измерения, а не воздействием стимульного материала.

Однако у 15 % испытуемых ситуативный показатель (напряженное состояние) увеличился. Именно на этих студентов стимульный материал подействовал.

В качестве примера на рис. 5 представлены пупиллограммы двух студентов. Были взяты данные именно этих студентов, поскольку у одного из них присутствовала явная эмоциональная реакция, а у другого она была слабой.



а)



б)

Рисунок 5 – а) Пупиллограмма и КГР с сильным эмоциональным откликом;
б) Пупиллограмма и КГР со слабым эмоциональным откликом

Значения напряженного состояния представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели напряженного состояния для студентов № 1 и № 2 до воздействия стимулов

До воздействия стимулов										
№1	14	13	12	13	14	13	12	11	12	12
№2	22	22	24	18	18	18	18	18	17	16
После воздействия стимулов										
№1	16	16	16	14	14	15	14	15	14	15
№2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Напряженное состояние студента № 1 (рис. 4а) увеличивалось в процессе воздействия стимулов (в среднем с 12 до 15). Устный опрос подтвердил, что студент № 1 узнал на фото человека, совершающего попытку исправить оценку. Кроме того, он указал слайды, просмотр которых вызвал у него эмоциональный отклик.

Напряженное состояние студента № 2 (рис. 4б) не увеличивалось, а уменьшалось (в среднем с 19 до 8). В процессе опроса студент № 2 сказал, что не испытывал никаких эмоций, человека на фото никогда не видел. В его пупиллограмме (рис. 4б) изменение размеров зрачковой реакции не выходит за пределы серой зоны.

Важным шагом является проверка наличия корреляционной связи между напряженным состоянием, измеряемым КГР и напряженным состоянием, измеряемым методом пупиллографии. После корреляционного анализа, мы получили, что между изменением размеров зрачка и кожно-гальванической реакцией существует значительная корреляция ($p=0,88$). Полученные результаты позволяют связать кожно-гальваническую реакцию и реакцию зрачков в ответ на стимульный материал. При этом корреляция между размерами зрачка и КГР сильно снижается, если стимульный материал не вызывает никакого отклика (таблица 3).

Таблица 3 – r-Спирмена

VAR vs. VAR	N	Rho	t	p-значение
$\Delta(S/Smed)_{max}$ vs. Δt	28	-0.2262	-1.1839	0.2472
$\Delta(S/Smed)_{max}$ vs. $ \Delta$ КГР	29	-0.1636	-0.8617	0.3965
Δt vs. Δ КГР	28	-0.0474	-0.2422	0.8105

Таким образом, если эмоциональная реакция отсутствует, то КГР не коррелирует с изменением размеров зрачков. Однако если эмоциональный отклик будет, то напряженное состояние будет выявлено и посредством КГР и посредством пупиллографии.

Основные выводы

Проведены эксперименты по определению напряженного состояния двумя методами: измерение кожно-гальванической реакции с помощью «Активациометр-6» и измерение методом пупиллографии. Полученные результаты сравнивались:

- Кожно-гальваническая реакция и изменение размеров зрачков коррелирует ($p=0,88$), при условии наличия эмоции.

Разность измерений на приборе «Активациометр-6» до и после воздействия стимулов, является показателем напряженного состояния. Результаты, полученные пупиллографическим методом, согласуются с результатами измерений КГР:

- Пупиллограммы людей, уровень психоэмоционального состояния которых после воздействия стимулов увеличился, содержали эмоционально окрашенные участки;
- В пупиллограммах людей из контрольной группы увеличения амплитуды за пределы калибровочной зоны отсутствовало. То есть напряженное состояние не регистрировалось ни пупиллографическим модулем, ни «Активациометром-6».

Таким образом, пупиллограммы могут стать бесконтактным средством измерения напряженного состояния. Так как КГР и размер зрачков коррелируют, то зрачковую реакцию можно использовать в системах безопасности, в которых наблюдение должно быть ненавязчивым (скрытым).

Литература

1. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / М. Р. Boronenko, Р. Yu. Gulyaev, А. Е. Seregin, К. G. Poluhina. – DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012028 // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028.
2. Метод флуктуационного анализа ЭЭГ в задачах контроля напряженных состояний человека-оператора / А. В. Алпатов, С. П. Вихров, Р. А. Зорин, М. М. Лапкин. – Текст : непосредственный // Биотехносфера. – 2013. – № 2 (26). – С. 52–58.
3. Патент № 2073484 Российская Федерация, МПК А61В 5/02 (2006.01), А61В 5/04 (2006.01) Способ определения эмоционального стресса и устройство для его осуществления : № 93027568/14 : заявл. 1993.05.17 : опубл. 1997.02.20 / Юматов Е. А., Судаков К. В., Тараканов О. П. – 16 с. – Текст : непосредственный.
4. Cho, Y. DeepBreath: Deep learning of breathing patterns for automatic stress recognition using low-cost thermal imaging in unconstrained settings / Y. Cho, N. Bianchi-Berthouze, S. J. Ju-lier. – DOI: 10.1109/ACII.2017.8273639 // Seventh International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII). – San Antonio, 2017. – P. 456–463.
5. Kalyan, V. P. Choice of solutions for recognizing emotions by speech / V. P. Kalyan // Machine Learning and Data Analysis. – 2016. – № 2 (4). – P. 454–470.
6. Нгуен, Д. К. Обзор методов оценки психоэмоционального состояния человека / Д. К. Нгуен, М. М. Южаков. – Текст : непосредственный // Информационно-измерительная техника и технологии : материалы VI научно-практической конференции, Томск, 27–30 мая 2015 г. – Томск : Издательство ТПУ, 2015. – С. 109–112.
7. Цагарелли, Ю. А. Системная диагностика человека и развитие психических функций / Ю. А. Цагарелли. – Казань : Познание. – 2009. – 492 с. – Текст : непосредственный.
8. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 60–64.
9. Григорьевская, А. А. Компьютерный эксперимент верификации инвариантных свойств Трасе- критерия спиновой неустойчивости на основе моделирования дифференциальных хронограмм движения / А. А. Григорьевская // Математика : материалы 59-й Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск, 2021. – С. 94–95.

Д. С. Корнеев, М. К. Котванова

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ НЕФТЕ- И ГАЗОПЕРЕРАБОТКИ**

Статья представляет собой обзор научных работ профессора А. А. Новикова. Показаны возможности и перспективы компьютерного моделирования промышленных процессов нефте- и газопереработки, предложенного профессором А. А. Новиковым. Представлены результаты по физико-химическим свойствам и составу нефтей Западной Сибири, использование которых позволяет выбрать наиболее эффективные и рациональные способы их добычи, транспортировки и переработки.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, прогнозирование, попутный нефтяной газ, нефтепереработка, фракционный состав нефти.

D. S. Korneev, M. K. Kotvanova

**COMPUTER ANALYSIS AND
OF OIL AND GAS REFINING PROCESSES**

The article is a review of the scientific works of Professor A. A. Novikov. The possibilities and prospects of computer simulation of industrial operations of oil and gas processing, proposed by Professor A. A. Novikov are shown. The results on the physicochemical properties and composition of oils from Western Siberia are presented. Use of them makes it possible to choose the most efficient and rational ways of extraction, transportation and oil processing.

Keywords: computer simulation, forecasting, associated petroleum gas, oil refining, fractional composition of oil.

Новиков Александр Автономович – доктор химических наук (2002 г.), профессор, член-корреспондент Российской Академии Естествознания, заведующий кафедрой химии Югорского государственного университета (2004–2013 гг.), проректор по научной работе ЮГУ (2013–2015 гг.). Научно-педагогическая деятельность Новикова А. А. связана с физической и инженерной химией процессов нефте- и газопереработки, нефтехимии. Новиков А. А. является одним из создателей общей методологии комплексного компьютерного анализа промышленных процессов нефте- и газопереработки, которая используется в научно-прикладных работах по повышению эффективности действующих производств, при подготовке инженеров-химиков и в специальных курсах повышения квалификации инженерно-технического персонала промышленных предприятий.

В России попутный нефтяной газ (ПНГ) начали сжигать на факелах в 1960-е годы в период открытий крупных залежей нефти в Западной Сибири. Сегодня этот метод утилизации признан самым неэффективным и экологически опасным, однако он до сих пор применяется не только в России, но и во всем мире. Система штрафов за сжигание ПНГ более 5 % от объема добычи, введенная в России еще в 2012 г., дала положительные результаты, однако к 2020 году сжигание сократилось лишь до 18 % от объема добываемого ПНГ. Проблема утилизации ПНГ остается на сегодняшний день одной из самых актуальных. Полезную утилизацию, в принципе, можно осуществить двумя способами: переработкой на газоперерабатывающих заводах, поскольку ПНГ представляет собой ценное углеводородное сырье, или его использованием

для внутрипромысловых нужд. И то, и другое, безусловно, способствует решению экологических проблем.

Первой стадией превращения ПНГ в жидкое топливо и другие химические продукты является получение так называемого синтез-газа (смеси монооксида углерода и водорода). Получение синтетических углеводородов из синтез-газа представляет собой сложный процесс (процесс Фишера-Тропша), сочетающий в себе каталитические и полимеризационные стадии: адсорбцию реагентов на поверхности катализатора; образование активных частиц; рост углеводородной цепи; обрыв цепи; десорбцию продуктов с поверхности катализатора; вторичные процессы.

Традиционные технологические схемы утилизации ПНГ, к сожалению, характеризуются низкой селективностью. В течение последних лет активно ведется разработка новых, более эффективных катализаторов, совершенствуется конструкция реакторов [1]. При этом для оценки эффективности катализатора, оптимизации и прогнозирования процесса все чаще используют методы математического моделирования, включающего в себя как термодинамический, так и кинетический анализ [2-4]. Работы А.А. Новикова фактически явились пионерскими в области общей методологии комплексного компьютерного анализа промышленных процессов нефте- и газопереработки. Так, в работе [5] проведены моделирование и сравнительный анализ проточной и проточно-циркуляционной схем двухстадийного синтеза жидких углеводородов из ПНГ. Показано, что применение циркуляции ПНГ существенно повышает выход жидких углеводородов. Действительно, использование циркуляционных технологических схем существенно повышает их селективность по целевому продукту, а значит, и экономическую привлекательность.

Кроме того, был предложен модульный компьютерный комплекс [6], позволяющий прогнозировать эффективность процессов переработки ПНГ и управлять реакторными блоками. В качестве исходных данных в комплексе использовались температура, давление, скорость и состав потока синтез-газа, скорость и состав теплоносителя, характеристики катализатора, параметры используемого реактора. Расчеты показали явные преимущества проточного реактора, введение которого снимало основные противоречия, присущие циркуляционным схемам: приближение состава циркуляционного потока к равновесному и, как результат, снижение производительности катализатора.

При разработке общей методологии компьютерного анализа процессов на основе синтез-газа автором описан механизм реакции гидрирования монооксида углерода на активных центрах катализатора [7]. Показано, что основным фактором, определяющим селективность реакций гидрирования СО, является форма активации молекул СО и Н₂, определяемая природой и степенью восстановления атомов металла в составе катализатора, структурой активного центра и характером взаимодействия с промоторами, а также внешними условиями синтеза, в первую очередь температурой и давлением в системе.

Созданный автором компьютерный комплекс технологического сопровождения промышленного синтеза метанола позволил разработать нестационарную модель синтеза на низкотемпературных Zn-Cu-катализаторах [8]. В рамках этой модели проведены анализ и оптимизация технологических параметров промышленного синтеза метанола и активности катализатора.

На протяжении последних десятилетий ключевым центром добычи нефти в Российской Федерации является Западно-Сибирский регион, а именно Ханты-Мансийский автономный округ и северная часть Томской области. В связи с этим важнейшее значение имеет оценка физико-химических свойств и состава нефтей Западной Сибири для установления и систематизации данных о зависимости между этими параметрами с целью выбора наиболее эффективных и рациональных способов их добычи, транспортировки и переработки.

На основании результатов анализа кривых истинных температур кипения (ИТК) установлено, что нефти Томской области и нефти ХМАО принципиально отличаются по фракционному составу. Однако нефти Томской области характеризуются повышенным содержанием дистиллятных фракций. Полученные данные о физико-химических свойствах нефтей Западной Сибири свидетельствуют о повышенных значениях плотности и показателя преломления у

нефтей Томской области. При этом средняя молекулярная масса выше у нефтей месторождений ХМАО. Таким образом, на основании экспериментальных и расчетных данных о групповом углеводородном составе и физико-химических характеристиках исследуемых нефтей (рис. 1 и 2) установлено, что нефти ХМАО богаче алифатическими соединениями, а нефти Томской области – ароматическими, что, в свою очередь, отражается на их физических свойствах [9].

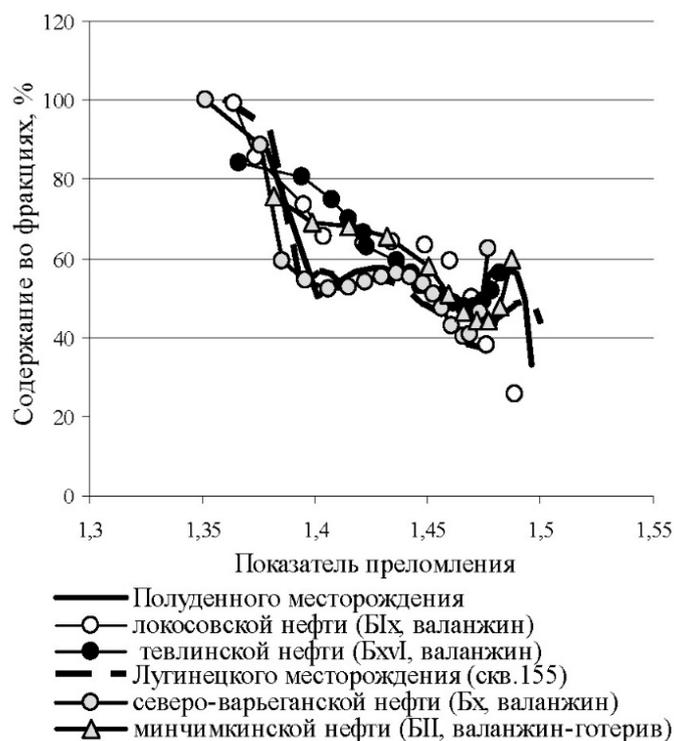


Рисунок 1 – Зависимость показателя преломления нефтей от содержания в них парафиновых углеводородов

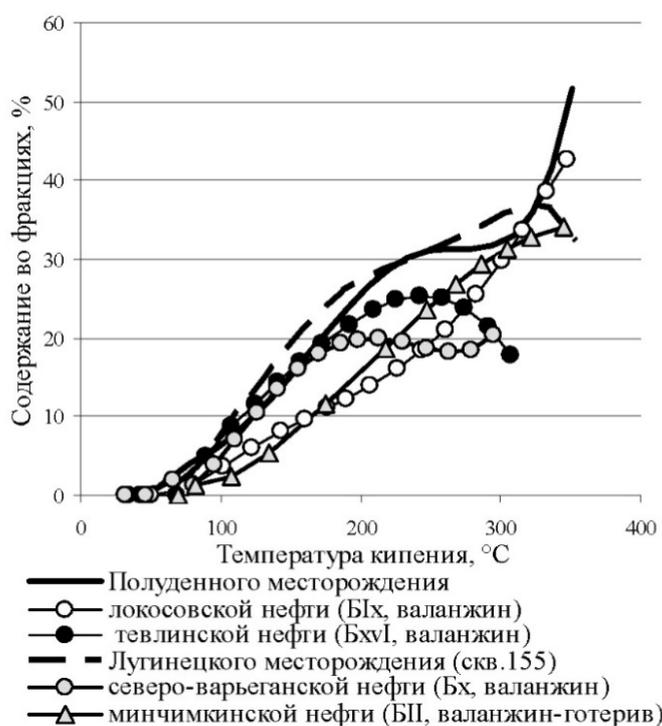


Рисунок 2 – Содержание ароматических углеводородов в различных фракциях нефтей

В рамках исследования взаимосвязи состава нефтей и их физико-химических параметров особое практическое значение имеет разработка и оптимизация методов расчета группового углеводородного состава широких нефтяных фракций. Так, в работах [10, 11] на примере шести нефтей месторождений Западной Сибири, характеристика которых представлена в таблице 1, проведен сравнительный анализ экспериментального (лабораторного) и расчетного методов определения группового углеводородного состава. В качестве расчетного выбран метод n-d-M, основанный на значениях показателя преломления, плотности, молекулярной массы фракции и содержания в ней серы.

Таблица 1 – Физико-химические параметры нефтей

Месторождение	Плотность при 20°C, г/см ³	Молекулярная масса, г/моль	Потенциальное содержание фракций, % мас.			
			НК-200°C	200-350°C	350-400°C	400-500 °C
Лугинецкое	0,8281	172	8,9	30,9	9,0	15,1
Северо-Варьеганское	0,8200	190	36,7	29,1	8,3	13,2
Полуденное	0,8498	181	28,9	33,2	10,0	15,4
Тевлинское	0,8508	212	26,2	28,0	9,4	17,5
Локосовское	0,8583	190	21,7	26,7	9,9	20,0
Минчимкинское	0,8950	368	13,3	21,1	7,9	16,0

Полученные результаты указали на существенное рассогласование исследуемых методов, что в первую очередь связано с классическим представлением данных для широких нефтяных фракций. По этой причине предложено представлять фракционный состав нефти в виде узких нефтяных фракций, что позволяет рассматривать их как последовательно-параллельные ряды со стыкующимися интервалами температур кипения в общих пределах 28–300 °C (таблица 2).

Таблица 2 – Групповой углеводородный состав на примере нефти
Лугинецкого месторождения

Диапазон температур кипения, °C	Выход от нефти, % мас.	Содержание углеводородов, % отн.		
		Арены	Нафтены	Парафины
28-60	5,5	0	11	89
60-95	6,7	2	41	57
95-122	5,5	6	38	56
122-150	5,9	10	34	56
150-200	10,4	21	28	51
200-250	9,1	17	38	45
250-300	12,5	20	33	47

Такой подход делает возможным последовательный расчёт содержания в нефтях ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов в ряду увеличения температуры кипения от 28 до 300 °C. Дополнительная модификация метода n-d-M путем коррекции констант эмпирических формул расчета группового состава нефтей позволила добиться удовлетворительных результатов расчета содержания ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов.

Как упоминалось выше, исследование состава и физико-химических свойств нефтей и их фракций является первым шагом на пути к поиску эффективных способов переработки углеводородного сырья. В последние годы наряду с классическими для нефтепереработки термическими и термокаталитическими технологиями активно развиваются альтернативные подходы к превращению компонентов нефтей и их фракций в ценные нефтепродукты. Так, в работе [12] исследовано изменение состава нефти в условиях трибохимического воздействия. Приведен гипотетически возможный механизм химических превращений аренов, парафинов, нафтенов и изопарафинов на оксиде алюминия при трибохимическом воздействии. Также изучаются превращения углеводородов в процессе гидродинамической кавитационной обработки. Показано, что такое воздействие на тяжелые нефтяные остатки в присутствии воды и

оксида алюминия снижает температуру конца кипения получаемого продукта за счет деструкции высокомолекулярных компонентов с образованием светлых фракций [13]. Более детальный анализ влияния механохимического воздействия на превращения нефтяных остатков в присутствии оксида алюминия показывает, что в экспериментально установленных оптимальных условиях проведения процесса (концентрация оксида алюминия – 4 % мас., продолжительность механоактивации – 400 с) наблюдается значительное увеличение плотности и вязкости получаемого продукта по сравнению с исходным сырьем (таблица 3). При этом методом хромато-масс-спектрометрии установлено, что содержание n-алканов снижается на 0,3 % мас., а ароматических углеводородов увеличивается практически на ту же величину. Следует отметить, что, несмотря на общее отрицательное влияние механообработки на состав сырья, в ходе процесса образуется некоторое дополнительное количество низкокипящих фракций со значительным снижением температуры начала кипения продукта по сравнению с исходным сырьем.

Таблица 3 – Изменение состава и физико-химических свойств мазута в процессе механохимического воздействия

Параметр	Исходный мазут	Продукт превращения мазута
Плотность при 20 °С, кг/м ³	905,77	941,59
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	144,75	610,62
Содержание n-алканов, % мас.	8,282	7,981
Содержание аренов, % мас.	1,299	2,272

На основании полученных данных выявлены основные направления превращений углеводородов нефти в процессе механохимической активации: деструкция насыщенных углеводородов, алкилирование ароматических соединений, дегидрирование алкилзамещенных аренов [14].

Для понимания химизма процесса механоактивации проведено лабораторное моделирование превращений углеводородов нефти на примере смеси химически чистых этилбензола и н-декана в условиях, аналогичных предыдущему исследованию. На основании комплексных данных о составе образующихся продуктов предложен механизм превращений углеводородов при механохимическом воздействии, основанный на свободно-радикальных реакциях, инициированных разрывом связей С-С в молекулах n-алканов. При этом процессы деструкции и конденсации протекают в равной степени, а основной реакцией является свободно-радикальное алкилирование ароматических углеводородов продуктами деструкции парафинов [15].

Литература

1. Синева, Л. В. Перспективные тенденции в катализе газохимических процессов: кобальтовые катализаторы синтеза Фишера-Тропша / Л. В. Синева, В. З. Мордкович – Текст : непосредственный // Научный журнал Российского газового общества. – 2019. – № 1. – С. 42–57.
2. Новиков, А. А. Прикладная кинетика процессов на основе синтез-газа / А. А. Новиков. – Томск : Издательство Томского университета, 2001. – 156 с. – Текст : непосредственный.
3. Новиков, А. А. Физико-химическое моделирование оптимальных технологий на основе синтез-газа / А. А. Новиков – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2006. – № 4. – С. 74–79.
4. Новиков, А. А. Анализ эффективности переработки попутного нефтяного газа при промышленном транспорте скважинной продукции / А. А. Новиков, Н. В. Чухарева – Текст : непосредственный // Нефтегазовые технологии. – 2007. – № 1. – С. 2–5.
5. Новиков, А. А. Оценка эффективности способов переработки попутных нефтяных газов месторождений Западной Сибири / А. А. Новиков, И. М. Федяева – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2010. – № 4. – С. 73–80.

6. Новиков, А. А. Циркуляционные технологические схемы химической переработки попутного нефтяного газа / А. А. Новиков, И. М. Федяева, Л. Т. Мариамидзе – Текст : непосредственный // Вестник ЮГУ. – 2012. – № 3. – С. 45–49.
7. Новиков, А. А. Оценка эффективности химической переработки попутных нефтяных газов нефтяных месторождений ХМАО-Югры / А. А. Новиков, Л. Т. Назаренко. – Текст : непосредственный // Научный журнал Российского газового общества. – 2015. – № 1. – С. 36–39.
8. Новиков, А. А. Прогнозирование эффективности модифицированных технологий переработки природных и попутных газов / А. А. Новиков, Л. Т. Назаренко. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 10–13.
9. Новиков, А. А. Сравнительный анализ свойств нефтей месторождений Западной Сибири / А. А. Новиков, И. М. Федяева. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2010. – № 4. – С. 81–83.
10. Новиков, А. А. Групповой состав нефтей Западной Сибири / А. А. Новиков, А. Р. Кухмазова. – Текст : непосредственный // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 11. – С. 277–280.
11. Новиков, А. А. Модификация метода определения структурно-группового состава нефти / А. А. Новиков, А. Р. Кухмазова. – Текст : непосредственный // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 6. – С. 208–210.
12. Превращения углеводородов нефти на оксиде алюминия в условиях трибохимического воздействия / Д. В. Дудкин, М. Г. Кульков, А. А. Якубенко, А. А. Новиков. – Текст : непосредственный // Технологии нефти и газа. – 2014. – № 2. – С. 39–46.
13. Изменение химического состава тяжелых нефтяных остатков при гидродинамическом кавитационном воздействии / Д. В. Дудкин, А. А. Якубенко, А. А. Новиков [и др.]. – Текст : непосредственный // Технологии нефти и газа. – 2013. – № 5. – С. 3–8.
14. Переработка нефтяных остатков в условиях механохимического воздействия / Д. В. Дудкин, М. Г. Кульков, Е. Н. Шестакова [и др.]. – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – № 4. – С. 34–38.
15. Превращения углеводородов нефти при механохимическом воздействии / Д. В. Дудкин, М. Г. Кульков, Е. Н. Шестакова [и др.]. – Текст : непосредственный // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – № 2. – С. 39–43.

УГОЛОВНО-ПРАВОВЫЕ
И КРИМИНОЛОГИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ
ПРЕСТУПНОСТИ

А. В. Звонов, С. С. Цапанова

**ПОЛИТИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ
НА ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УГОЛОВНЫХ НАКАЗАНИЙ
В УСЛОВИЯХ ВВЕДЕНИЯ РЕЖИМА ВОЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ**

Основной задачей современного Российского государства является охрана и защита жизни, здоровья и законных интересов граждан. Реализация поставленной задачи отчасти достигается посредством системы уголовных наказаний, на которую оказывают влияние различные факторы. В статье рассматриваются политические факторы, которые обусловлены особенностями организации политической власти, и правовые факторы как юридическая форма реализации общественных отношений в различных сферах жизнедеятельности в условиях введения военного положения. Целью исследования является анализ влияния политических и правовых факторов на формирование системы уголовных наказаний в условиях военного положения. В работе использовались методы сравнения и анализа. В заключении автор приходит к выводу о сильном влиянии режима военного положения на правовые и политические факторы, под воздействием которых, в свою очередь, формируется система уголовных наказаний.

Ключевые слова: политические факторы, правовые факторы, система уголовных наказаний, режим военного положения, уголовная политика.

A. V. Zvonov, S. S. Tsapanova

**POLITICAL AND LEGAL FACTORS INFLUENCING THE FORMATION
OF THE SYSTEM OF CRIMINAL PENALTIES IN THE CONDITIONS
OF THE INTRODUCTION OF MARTIAL LAW**

The main task of the modern Russian state is the protection and protection of life, health and legitimate interests of citizens. The implementation of this task is partly achieved by means of the criminal punishment system, which is influenced by various factors. The article deals with political factors that are caused by the peculiarities of the organization of political power and legal factors as a legal form of the implementation of public relations in various spheres of life in the conditions of martial law. The purpose of the study is to analyze how political and legal factors influence the formation of the system of criminal penalties under martial law. The methods of comparison and analysis were used in the work. In conclusion, the author comes to the conclusion about the strong influence of the martial law regime on legal and political factors, under the influence of which, in turn, the system of criminal penalties is formed.

Keywords: political factors, legal factors, system of criminal penalties, martial law regime, criminal policy.

В последние десятилетия уголовная политика государства направлена на приведение национального уголовного законодательства в соответствие с международными правовыми актами для достижения целей уголовного наказания. При этом система уголовных наказаний не формируется одномоментно, это сложный и продолжительный процесс, на который оказывают влияние различные факторы. Система уголовных наказаний начала формироваться сотни лет назад.

«Русская Правда» закрепляла смертную казнь (кровную месть), а также систему штрафов.

С образованием и укреплением Русского централизованного государства уголовные наказания претерпели изменения и стали носить более суровый и устрашающий характер. Судебники 1497 и 1550 годов закрепили широкое применение смертной казни.

В дальнейшем прослеживалось только ужесточение наказания и порядка его исполнения, что было закреплено в «Соборном уложении» 1649 года. Данный документ закрепил такие виды наказаний как: смертная казнь, которая в зависимости от совершенного преступления исполнялась разными способами, телесные меры (в том числе членовредительские), тюремное заключение, ссылка. Наказания данного периода характеризовались своей неопределенностью это в первую очередь выражалось в не ограниченном сроке наказания. «Соборное уложение» зачастую использовало формулировку «...на сколько государь укажет».

При Петре I была предпринята первая попытка систематизации уголовного закона. Был подготовлен документ «Артикул воинский» 1715 года, в основу которого легло «Соборное уложение». Расширился перечень наказаний, за которые следовало применение смертной казни, также применялись телесные наказания, тюремное заключение; стали применяться наказания в виде каторжных работ, ссылки на галеры. Сохранялась тенденция устрашения населения суровостью наказания.

Уголовное законодательство Нового времени характеризуется смягчением наказания и кодификацией уголовно-правовых норм. Первым кодифицированным актом является «Уложение о наказаниях уголовных и исправительных» 1845 года. Данный акт систематизировал систему наказаний: К исправительным наказаниям относились: лишение всех особенных прав и преимуществ (почетных и дворянских титулов, чинов, знаков отличия, права поступать на службу, записываться в гильдии, быть свидетелем и опекуном); ссылка; отдача в исправительные арестантские роты; заключение в тюрьме, крепости, смирительном или работном доме; арест; выговор в присутствии суда; денежные взыскания; внушения, телесные наказания. Указанные виды наказаний применялись исключительно только в пределах установленной уголовным законодательством санкции.

Затем было утверждено Уголовное уложение 1903 года, в котором отразились изменения, произошедшие в России, однако характер и техника нормативных установлений несмотря на смену общественно-политического строя в 1917 году, не утратили актуальности и оказали существенное влияние на содержание нормативных актов советского периода [12, с. 22].

В период Первой мировой войны уголовное законодательство менялось, подстраиваясь под потребности общества, связанные с участием в войне: была усилена (вплоть до смертной казни) уголовная ответственность за деяния, связанные с уклонением от военной службы, за иные преступления, в том числе и в сфере экономики (уклонение от заказов, сокрытие ряда товаров и сырья).

К особенностям кодифицированного уголовного законодательства Российской империи следует отнести его суровость в отношении посягательств на царя и царскую власть. Так, по Уложению 1845 года злоумышление посягательства на жизнь, здоровье и честь наказывалось смертной казнью (ст. 241), аналогичные нормы были предусмотрены в Уложении 1903 года. Уложением 1903 года предусматривалась ответственность и за «политические» преступления: заключением в крепость каралось участие в скопище, собравшемся для выражения неуважения к верховной власти, порицания образа правления, сочувствия бунту или бунтовщикам, ссылкой – произнесение речи, составление, хранение, правка сочинений, возбуждающих к неповиновению власти (ст. 129, 132).

В советский период в соответствии с Уголовным кодексом 1922 года устанавливались следующие наказания: изгнание из пределов РСФСР на срок или бессрочно; лишение свободы со строгой изоляцией или без таковой; принудительные работы без содержания под стражей; условное осуждение; конфискация имущества – полная или частичная; штраф; поражение прав; увольнение от должности; общественное порицание; возложение обязанности загладить вред [8].

К 1926 году система уголовных наказаний была расширена и включала в себя следующие виды наказаний: объявление врагом трудящихся с лишением гражданства союзной рес-

публики и, тем самым, гражданства Союза ССР и обязательным изгнанием из его пределов; лишение свободы в исправительно-трудовых лагерях в отдаленных местностях Союза ССР; лишение свободы в общих местах заключения; исправительно-трудовые работы без лишения свободы; поражение политических и отдельных гражданских прав; удаление из пределов Союза ССР на срок; удаление из пределов РСФСР или из пределов отдельной местности с обязательным поселением в других местностях или без этого или с запрещением проживания в отдельных местностях либо без такого запрещения; увольнение от должности с запрещением занятия той или другой должности или без такого запрещения; запрещение занятия той или иной деятельностью или промыслом; общественное порицание; конфискация имущества – полная или частичная; денежный штраф; возложение обязанности загладить причиненный вред; предостережение [9].

К 1960 система наказаний претерпела еще ряд изменений, которые нашли отражение в Уголовном кодексе:

К лицам, совершившим преступления, могут применяться следующие наказания: лишение свободы; исправительные работы без лишения свободы; лишение права занимать определенные должности или заниматься определенной деятельностью; штраф; увольнение от должности; возложение обязанности загладить причиненный вред; общественное порицание; конфискация имущества; лишение воинского или специального звания. А также в качестве исключительной меры наказания – смертная казнь [10].

На различных этапах исторического развития России следует отметить тенденции развития системы уголовных наказаний. Первые источники, закрепившие виды наказаний в основном носили имущественный характер. Затем курс был взят на изоляцию и применение смертной казни. Перечень преступлений, за которые она применялась с течением времени расширялся, и наблюдалась тенденция на ужесточение наказаний. Под влиянием различных политических условий и факторов курс на ужесточение и смягчение видов наказаний периодически менялся. И только со второй половины XX века можем отметить устойчивую практику применения «альтернативных мер воздействия».

Формирование современной системы уголовных наказаний началось с принятия уголовного кодекса Российской Федерации 1996 года. Уголовный закон закрепил 13 видов уголовных наказаний. В данную систему законодатель включил: штраф; лишение права занимать определенные должности или заниматься определенной деятельностью; лишение специального, воинского или почетного звания, классного чина и государственных наград; обязательные работы; исправительные работы; ограничение по военной службе; ограничение свободы; принудительные работы; арест; содержание в дисциплинарной воинской части; лишение свободы на определенный срок; пожизненное лишение свободы; смертная казнь [1].

Некоторые виды наказаний были ранее известны уголовному праву и получили дальнейшее закрепление. Например, такие как: лишение свободы, исправительные работы, лишение права занимать определенные должности или заниматься определенной деятельностью, штраф, лишение воинского или специального звания, смертная казнь. При этом отмечается тенденция к расширению современной системы уголовных наказаний и дополнение ее наказаниями не связанными с лишением свободы. Так, в Уголовный кодекс 1996 года были введены следующие виды наказаний: в 2005 году обязательные работы [2], в 2010 году – ограничение свободы [3], а с 2017 года – принудительные работы [4, 5]. Также с учетом данных изменений системы уголовных наказаний были также приняты Концепция развития уголовно-исполнительной системы Российской Федерации до 2020 года [6], а затем до 2030 года [7], которые предопределяют изменение уголовно-исполнительной политики и перестроение всей системы исполнения наказаний. Принятие данных документов направлено в целом на сокращение общей численности осужденных, а также на превалирование применения наказаний альтернативных лишению свободы.

По данным судебного департамента, в 2009 году к уголовным наказаниям, не связанным с лишением свободы, осуждены 605,9 тыс. лиц из 892,3 тыс. всего осужденных, в 2010 году –

579,1 тыс. из 845 тыс., в 2011 году – 555,1 тыс. из 782,2 тыс., в 2012 году – 532,9 тыс. из 739,2 тыс., в 2013 году – 525,8 тыс. из 735,5 тыс., в 2014 году – 509,7 тыс. из 719,3 тыс., в 2015 году – 522,4 тыс. из 733,6 тыс., в 2016 году – 534,8 тыс. из 741,3 тыс., в 2017 году – 496,7 тыс. из 697 тыс., в 2018 году – 467,8 тыс. из 658,2 тыс., в 2019 году – 423 тыс. из 598,2 тыс., в 2020 году – 381,2 тыс. из 531 тыс. [13].

Данная статистика свидетельствует о медленном, но целенаправленном снижении общего количества осужденных и о явном преобладании альтернативных наказаний лишению свободы.

Таким образом, следует подчеркнуть, что политические факторы оказывают существенное влияние на формирование, законодательное закрепление и реализацию системы уголовных наказаний и в целом на уголовную политику государства. Рассмотренные различные исторические периоды, отличающиеся государственным и политическим устройством, оказывают влияние на уголовные наказания, на их ужесточение или либерализацию. Однако, не смотря на общую либерализацию уголовных наказаний, характерную для современной уголовной политики, наблюдаются отдельные случаи ужесточения некоторых видов уголовных наказаний, например, за коррупционные преступления.

Отметим что, политические факторы оказывают всесторонне влияние на систему уголовных наказаний. Однако указанные примеры характерны для мирного времени, в условиях войны они приобретают специфический характер, отражающий экстремальность условий.

Сформированная политическая система обуславливает и иные указанные нами факторы, в частности правовые.

Одним из ярких примеров правовых факторов, влияющих на изменение системы наказаний в России связан с применением исключительной меры наказания – смертной казни. Стремление Российской Федерации войти в Совет Европы привело к необходимости подписания и ратификации Протокола № 6 от 28 апреля 1983 г. к Европейской конвенции от 4 ноября 1950 г., о защите прав человека и основных свобод, касающейся отмены смертной казни в мирное время, и установлении моратория на исполнение смертных приговоров [11, С. 85].

В соответствии с названным международно-правовым актом Россия была вынуждена сократить применение смертной казни, а в последующем совсем отказаться от ее применения. Несмотря на то, что смертная казнь законодательно закреплена по сей день, фактически данный вид наказания не применяется, а также предусмотрено, что смертная казнь в порядке помилования может быть заменена пожизненным лишением свободы или лишением свободы на срок двадцать пять лет [1].

Произведенный анализ действовавших и действующих уголовных наказаний позволяет заключить, что на различных исторических этапах формирования уголовного права виды наказаний определялись государственным устройством, организацией политической власти и имели правовую регламентацию. В свою очередь, происходящие революции и войны оказывали сильнейшее влияние на политическую сферу, что отражалось на системе уголовных наказаний и их применении на различных исторических этапах.

Литература

1. Уголовный кодекс Российской Федерации : федеральный закон от 13 июня 1996 г. № 63-ФЗ : в редакции от 28 июля 2012 г. № 141-ФЗ. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства РФ. – 1996. – № 25. – Ст. 2954 ; 2012. – № 31. – Ст. 4330.
2. О введении в действие положений Уголовного кодекса Российской Федерации и Уголовно-исполнительного кодекса Российской Федерации о наказании в виде обязательных работ : федеральный закон от 28 декабря 2004 г. № 177-ФЗ. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2004. – 30 декабря.
3. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с введением в действие положений Уголовного кодекса Российской Федерации и Уголовно-исполнительного кодекса Российской Федерации о наказании в виде ограничения сво-

боды : федеральный закон от 27 декабря 2009 г. № 377-ФЗ. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2009. – 30 декабря.

4. О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 7 декабря 2011 г. № 420-ФЗ. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2011. – 9 декабря.

5. О внесении изменений в статью 8 Федерального закона «О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации» и статью 6 Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О судебных приставах» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» : федеральный закон 30 декабря 2012 г. № 307-ФЗ. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2013. – 11 января.

6. О внесении изменения в статью 8 Федерального закона «О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации» : федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 431-ФЗ. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2013. – 30 декабря.

7. О Концепции развития уголовно-исполнительной системы Российской Федерации до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 14 октября 2010 г. № 1772-р. – Текст : непосредственный // Собрание законодательства РФ. – 2010. – № 43. – Ст. 5544.

8. Об утверждении Концепции развития уголовно-исполнительной системы РФ на период до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 29 апреля 2021 г. № 1138-р // Собрание законодательства РФ. – 2021. – № 20. – Ст. 3397.

9. О введении в действие Уголовного Кодекса РСФСР : Постановление ВЦИК от 1 июня 1922 г. – Текст : непосредственный // СУ РСФСР. – 1922. – № 15. – Ст. 153.

10. О введении в действие Уголовного Кодекса РСФСР редакции 1926 г. 6 Постановление ВЦИК от 22 ноября 1926 г. – Текст : непосредственный // СУ РСФСР. – 1926. – № 80. – Ст. 600.

11. Уголовный кодекс РСФСР : утверждено ВС РСФСР 27.10.1960. – Текст : непосредственный // Ведомости ВС РСФСР. – 1960. – № 40. – Ст. 591.

12. Звонов, А. В. Факторы формирования системы уголовных наказаний в современных условиях: краткий аналитический обзор / А. В. Звонов, О. Н. Дядькин. – Текст : непосредственный // Криминологический журнал Байкальского государственного университета экономики и права. – 2016. – Т. 10, № 1. – С. 82–89.

13. Уголовное право России. Практический курс / Под общ. ред. А. И. Бастрыкина; под науч. ред. А. В. Наумова. 3-е изд., перераб. и доп. М., 2007. 808с.

14. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2009 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=840> (дата обращения: 06.10.2021).

15. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2010 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=837> (дата обращения: 06.10.2021).

16. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2011 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=1272> (дата обращения: 06.10.2021).

17. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2012 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=1776> (дата обращения: 06.10.2021).

18. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2013 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=2362> (дата обращения: 06.10.2021).

19. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2014 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=2883> (дата обращения: 06.10.2021).

20. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2015 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=3418> (дата обращения: 06.10.2021).

21. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2016 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=3834> (дата обращения: 06.10.2021).

22. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2017 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=4572> (дата обращения: 06.10.2021).

23. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2018 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=4894> (дата обращения: 06.10.2021).

24. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2019 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=5259> (дата обращения: 06.10.2021).

25. Основные статистические показатели состояния судимости в России за 2020 год. – Текст : электронный // Судебный департамент при Верховном Суде РФ. – URL: <http://www.cdep.ru/index.php?id=79&item=5669> (дата обращения: 06.10.2021).

С. А. Корнеев

**СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВАЯ ПРИРОДА ПРИНУДИТЕЛЬНЫХ МЕР
МЕДИЦИНСКОГО ХАРАКТЕРА В СООТВЕТСТВИИ
С УГОЛОВНЫМ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВОМ РОССИИ И МОНГОЛИИ**

Предметом исследования является социально-правовая природа института принудительных мер медицинского характера в соответствии с уголовным законодательством России и Монголии.

Цель. Настоящее исследование предполагает определение сущности принудительных мер медицинского характера, а также научное обоснование необходимости разграничения уголовной ответственности и иных мер уголовно-правового воздействия, применяемых к лицам, совершившим запрещенное уголовным законом деяние.

Методология. Методологическая основа настоящего исследования представлена диалектическим методом научного познания. В процессе исследования использовались также применяемые в гуманитарных науках частнонаучные методы познания, а именно: при определении сущности принудительных мер медицинского характера – индуктивный, дедуктивный, системно-структурный и контент-анализа; в процессе исследования положений уголовного законодательства Монголии о регламентации принудительных мер медицинского характера – сравнительно-правовой метод.

Результаты. Проанализировано уголовное законодательство Российской Федерации и Монголии, изучены доктринальные исследования по заявленной тематике, сформулирована и научно обоснована социально-правовая сущность принудительных мер медицинского характера.

Ключевые слова: уголовно-правовое воздействие; уголовная ответственность; иные меры уголовно-правового характера; принудительные меры медицинского характера; меры принуждения; уголовное законодательство Монголии.

S. A. Korneev

**THE SOCIO-LEGAL NATURE OF COMPULSORY MEDICAL MEASURES
IN ACCORDANCE WITH THE CRIMINAL LEGISLATION
OF RUSSIA AND MONGOLIA**

The subject of this study is the institute of compulsory medical measures.

Goal. This study involves determining the essence of compulsory medical measures in accordance with the criminal legislation of the Russian Federation and Mongolia, as well as scientific justification of the need to distinguish between criminal liability and other measures of criminal legal influence applied to persons who have committed an act prohibited by criminal law.

Methodology. The methodological basis of this study is presented by the dialectical method of scientific cognition. In the course of the research, private scientific methods of cognition used in the humanities were also used, namely: in determining the essence of compulsory medical measures – inductive, deductive, system-structural and content analysis; in the process of studying the provisions of the criminal legislation of Mongolia on the regulation of compulsory medical measures—a comparative legal method.

Results. The criminal legislation of the Russian Federation and Mongolia is analyzed, doctrinal studies on the declared topic are studied, the socio-legal essence of compulsory medical measures is formulated and scientifically substantiated.

Введение

Действующий Уголовный кодекс РФ (далее – УК РФ) детально определяет уголовное наказание и его виды. Сущность же принудительных мер медицинского характера (далее – ПММХ), их задачи, социально-правовая природа, место в общей структуре уголовно-правового воздействия нормами уголовного закона должным образом не регламентированы. Безусловно, данная тематика неоднократно являлась предметом доктринальных исследований, в том числе фундаментального характера, однако не утратила своей актуальности сегодня. К сожалению, в теории уголовного права нет единого или преобладающего мнения по существу обозначенных проблем, что подтверждает существующую потребность углубленного доктринального анализа института принудительных мер медицинского характера, регламентированного как отечественным, так и зарубежным законодательством.

Сравнительное правоведение играет ключевую роль в разработке научно обоснованной концепции правовой политики. В связи с этим, особый интерес представляет изучение теоретико-прикладного опыта формирования института ПММХ в демократической стране с романо-германской правовой системой, испытывавшей значительное влияние от советской системы права, партнера Российской Федерации в части углубления и совершенствования взаимного сотрудничества в области правовой помощи и правовых отношений по гражданским и уголовным делам – Монголии [2].

Результаты и обсуждение

ПММХ законодательно закреплены в УК РФ как иные меры уголовно-правового характера (гл. 15 УК РФ). Они могут быть назначены судом лицу, страдающему психическим расстройством в рамках освобождения от уголовной ответственности (п. «а» ч. 1 ст. 97 УК РФ), освобождения от наказания (п. «б» ч. 1 ст. 97 УК РФ), либо наряду с наказанием (п. «в», «д» ч. 1 ст. 97 УК РФ). Анализ указанных норм свидетельствует, что сущность ПММХ на законодательном уровне четко не определена, вследствие чего полагаем, что данный пробел может быть восполнен только с учетом имеющихся доктринальных исследований.

Высказываемые суждения относительно содержания категории «ПММХ» могут быть сгруппированы таким образом, что ПММХ – это:

- собирательный институт уголовного права, к содержанию которого, помимо законодательно определенных мер, необходимо относить отсрочку отбывания наказания лицам, страдающим наркоманией, ввиду наличия медицинского характера [10, с. 183];
- институт, тождественный наказанию [13, с. 46];
- иная уголовно-правовая мера государственного принуждения к лечению, предусмотренная уголовным законом, назначаемая судом на основании обвинительного приговора или постановления конкретному лицу, указанному в ч. 1 ст. 97 УК РФ, от имени российского государства [4, с. 59];
- иные, обособленные от уголовной ответственности, меры уголовно-правового характера [11, с. 17];
- ни форма реализации уголовной ответственности, ни «иная мера», а меры безопасности, которые применяются в связи с совершением психически больным лицом запрещенного уголовным законом общественно опасного деяния [1, с. 12].

Думается, что большинство из представленных мнений носят дискуссионный характер. Так, небезупречным выглядит представление ПММХ в качестве собирательного института уголовного права, в объем которого необходимо относить меры уголовно-правового воздействия, заключающие в себе медицинский критерий (характер). Отсрочка отбывания наказа-

ния больным наркоманией не может быть признана иной мерой уголовно-правового характера, в частности, ПММХ по ряду причин:

- во-первых, учитывая формальный критерий, перечень видов ПММХ четко определен нормой УК РФ, является исчерпывающим и не подлежит расширительному толкованию, в то время как отсрочка отбывания наказания больным наркоманией законодательно отнесена к видам освобождения от наказания (ст. 82¹ гл. 12 УК РФ);
- во-вторых, основанием применения «отсрочки» является юридический факт в виде совершения преступления;
- в-третьих, отсрочка отбывания наказания может быть реализована только в отношении лица, которое способно осознавать свои действия и руководить ими в процессе совершения преступления;
- в-четвертых, лишения и ограничения, испытываемые лицом при применении отсрочки отбывания наказания, реализуются в течение определенного законом срока (не более 5 лет (ч. 1 ст. 82¹ УК РФ) и лишь формально зависят от состояния здоровья лица, совершившего преступление, и иных его индивидуальных особенностей.

наконец, в-пятых, лечение от наркомании, медицинская реабилитация в рамках реализации «отсрочки» являются добровольным желанием лица, совершившего преступление, тогда как меры уголовно-правового воздействия, закрепленные в главе 15 УК РФ, по своей сущности не предусматривают свободу выбора и носят исключительно принудительный характер.

Сложно согласиться и с мнением авторов, считающих, что ПММХ, или, в частности, ПММХ, применяемые в отношении «ограниченно вменяемых» лиц, – это материальное выражение уголовной ответственности:

- 1) с учетом современной общепризнанной (в том числе на законодательном уровне) теории субъекта уголовной ответственности аксиомичным является утверждение, что уголовная ответственность в отношении лиц, страдающих психическим расстройством, недопустима. Душевнобольной, совершивший общественно опасное деяние, по объективным причинам не в состоянии осознать, понять, за что он претерпевает лишения и правоограничения, поэтому и применение к нему мер уголовной ответственности, в том числе наказания, невозможно ввиду заранее известной их бессмысленности и безрезультативности;
- 2) выбранное решение свидетельствует об образовании коллизий в уголовном праве. Не понятен принцип деления законодательно закрепленных в разделе VI УК РФ ПММХ на разноплановые, обособленные друг от друга меры уголовно-правового воздействия. Такого рода дробление нарушает социально-правовую природу рассматриваемого института. Так, его содержанием, согласно представленной точке зрения, будут являться отличные друг от друга лишения и ограничения, испытываемые «преступником» в рамках реализации уголовной ответственности и лицом, страдающим психическим расстройством, в процессе применения иной меры уголовно-правового характера;
- 3) при назначении уголовного наказания непосредственно учитывается характер, степень общественной опасности преступления, личность виновного, смягчающие или отягчающие наказание обстоятельства и влияние назначенного наказания на исправление осужденного, на условия жизни его семьи (ч. 3 ст. 60 УК РФ). При применении же ПММХ подавляющее большинство перечисленных обстоятельств не имеет юридического значения, поскольку ПММХ применяются только в отношении лиц, страдающих психическим расстройством, а вид и условия принудительного лечения зависят исключительно от состояния здоровья – степени психического расстройства лица, совершившего запрещенное уголовным законом деяние.

Представление сущности ПММХ в качестве иной уголовно-правовой меры государственного принуждения к лечению, предусмотренной уголовным законом и назначаемой судом на основании обвинительного приговора или постановления конкретному лицу, является дискуссионным и нуждается в дополнительном обосновании. Действительно, рассматриваемая дефиниция формально соответствует положениям действующего уголовного законода-

тельства, однако не раскрывает, не определяет истинную сущность рассматриваемого института. Вследствие этого, вопрос о социально-правовой природе ПММХ остается открытым.

Оценка сущности ПММХ в качестве мер безопасности является достаточно спорной, на что многократно обращалось внимание в специализированных научных исследованиях.

Во-первых, законодатель намеренно отказался обозначать в УК РФ категорию «меры безопасности», хотя такая дефиниция была известна ранним источникам советского уголовного права. В настоящее же время используется категория меры государственного принуждения. Указанные термины не являются тождественными, так как первые направлены на источник опасности, а вторые подразумевают возникновение ограничений прав и свобод.

Во-вторых, «безопасность» – это состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества, государства от внутренних и внешних угроз [8]. Исходя из этого, вряд ли недопустимо сводить ее к тем мерам воздействия, которые применяются в отношении лиц, страдающих психическим заболеванием, даже в случае совершения ими деяния, запрещенного уголовным законом. Таким образом, в действительности здесь имеет место подмена термина «иные меры уголовно-правового характера», то есть меры, не являющиеся наказанием, уголовной ответственностью, но применяемые в рамках уголовного закона, словом «безопасность», хотя даже лексическое значение этого слова не соответствует сущности мер, предусмотренных действующим УК РФ.

Исходя из этого, мы присоединяемся к мнению группы ученых, которые считают, что ПММХ являются иными, обособленными от уголовной ответственности, мерами уголовно-правового характера. Как справедливо отмечает Р. И. Михеев, поведение лица, страдающего психическим расстройством, детерминировано не окружающей его внешней средой и сложившейся в действительности обстановкой во время совершения общественно опасного деяния, а его болезненным субъективным истолкованием [7, с. 45].

Действительно, лицо, страдающее психическим расстройством, утрачивает социально-психологическую способность действовать осмысленно. Данной категории не свойственна свобода выбора «модели» поведения, возможность поступить иначе утрачивается не по их воле, что и влечет за собой исключение ответственности. Более того, такое лицо лишается существенно значимых индивидуальных и общественных связей, что не позволяет согласовать свое поведение с социальными и правовыми требованиями общества. Уголовная же ответственность распространяется исключительно в отношении лиц, совершивших преступление, которые в состоянии дать отчет в содеянном перед государством в лице уполномоченных органов и понести неблагоприятные последствия в результате применения мер государственного принуждения. Лицо, страдающее психическим расстройством, выполнить ряд указанных обязанностей не может.

При назначении ПММХ наряду с уголовным наказанием либо в процессе исполнения (отбывания) наказания социально-правовая природа рассматриваемой меры уголовно-правового воздействия принципиально не меняется. Как отмечают отдельные исследователи, при психическом заболевании, не исключающем вменяемости, связь с внешним миром сохраняется, но с определенными искажениями. Так, рассматриваемая категория лиц по объективным причинам не в состоянии в силу своих особенностей оказать сопротивление в ситуации, в том числе конфликтной; выбрать одобряемую в обществе, приемлемую для социума модель поведения; адаптироваться к внешней среде ввиду наличия препятствий для развития социально полезных черт личности. Как правило, «ограниченно вменяемый» человек склонен к произвольным, неподуманным, противоправным и от него зависимым поступкам [3, с. 243].

Действительно, в этом случае данные меры определяются в обвинительном приговоре суда, сопровождаются отрицательной оценкой со стороны государства преступного деяния и т. д. Однако в отличие от наказания указанные меры не несут в себе его главного, сущностного признака – элемента кары, воздаяния, и преследуют совершенно иные цели [9].

Полагаем, что в этом случае реализацию ПММХ необходимо рассматривать параллельно, обособленно, самостоятельно от наказания. Достижение целей наказания по истечении

назначенного судом срока не свидетельствует об излечении либо улучшении психического состояния лица, совершившего деяние, запрещенное уголовным законом. Равно как реализация целей института ПММХ не отождествляется с целевым предназначением уголовного наказания. Ремиссия психического расстройства лица может представлять собой лишь условие для прекращения применения к нему ПММХ, направления уголовного дела для производства предварительного расследования в общем порядке, возобновления исполнения назначенного судом наказания (ст. 103 УК РФ). Прав А. Д. Кононов, говоря, что применение ПММХ необходимо рассматривать как в период отбывания наказания, так и после его отбытия [6, с. 26].

Справедливой видится и позиция Е. В. Ильюк: назначение ПММХ одновременно с наказанием вызвано не принципом вины, а целями безопасности общества, людей и самого лица, страдающего от психического расстройства. Эти лица, как правило, не в полной мере осознавали общественную опасность своего деяния или не могли руководить своими действиями, либо в полной мере не осознавали, не понимали ни общественной опасности, ни возможности наступления общественно опасных последствий [5, с. 586].

Итак, анализ отечественного уголовного законодательства, специализированной литературы, позволяет сделать вывод о том, что вопросы, касающиеся сущности ПММХ, их целей, задач, социально-правовой природы, места в общей структуре мер уголовно-правового воздействия, действительно обладают повышенной степенью актуальности и важности в современной доктрине отечественного уголовного права.

Как нам кажется, не менее злободневной видится востребованность решения ряда обозначенных вопросов в уголовном законодательстве Монголии. Анализ норм УК Монголии, регламентирующих ПММХ, свидетельствует о:

- отсутствию официальной дефиниции ПММХ, что затрудняет восприятие рассматриваемого института как в теории уголовного права, так и в правоприменительной деятельности;
- противоречивой сущности ПММХ, в связи с чем, их социально-правовая природа воспринимается неоднозначно;
- нарушении правил законодательной техники, а именно правил изложения нормативного материала в разделе, посвященном мерам принуждения (ст. 7.2 УК Монголии) [12, с. 32];
- внутренней рассогласованности института ПММХ (ст. 7.4 УК Монголии) [12, с. 33].

Остановимся на каждом из обозначенных вопросов более детально. Так, в соответствии с уголовным законодательством Монголии преступлением признается виновно совершенное общественно опасное действие или бездействие, предусмотренное Особенной частью УК (ст. 2.1 УК Монголии). Согласно общепризнанным в доктрине уголовного права постулатам лицо, страдающее психическим расстройством, не в состоянии по объективным причинам осознать незаконность своих действий или бездействий, ввиду чего сложно назвать эту деятельность преступной, а совершенное им деяние преступлением.

Целями уголовной ответственности в Монголии являются кара, восстановление прав, нарушенных преступлением, и возмещение ущерба, предупреждение совершения новых преступлений, а также ресоциализация человека, совершившего преступление (ст. 5.1 УК Монголии). Логично предположить, что ПММХ не являются материальным выражением уголовной ответственности, в том числе по причине преследования иных конечных результатов – излечение лица, совершившего общественно опасное деяние, улучшение его психического состояния. Однако в соответствии с ч. 2 ст. 5.1 УК Монголии уголовная ответственность состоит из наказаний и принудительных мер. К последним относятся меры, применяемые как без назначения наказания (условное осуждение), так и наряду с ним (принудительные меры в виде возложения обязанностей и ограничения прав; принудительные меры медицинского характера; принудительные меры в виде конфискации имущества) (ст. 7.2 УК Монголии). В то же время уголовная ответственность применяется к лицу, достигшему ко времени совершения преступления возраста, с которого наступает уголовная ответственность, и являющемуся вменяемым (ч. 3 ст. 5.1 УК Монголии).

Таким образом, анализ норм нормативно-правового акта, определяющих содержание уголовной ответственности, свидетельствует о противоречивой сущности ПММХ. С одной стороны, это отличная от уголовной ответственности мера государственного принуждения, имеющая собственные цели, задачи, основание применения. С другой – ПММХ, наряду другими мерами уголовно-правового воздействия, находящимися в иной плоскости юридического содержания (условное осуждение, уголовно-правовая обязанность, ограничение прав и конфискация имущества), представляют собой самостоятельную форму реализации уголовной ответственности, назначаемую в карательных, компенсационных и превентивных целях в отношении психически нездорового лица, совершившего преступление.

Думается, рассматриваемый дуализм вызван внутренней рассогласованностью института ПММХ. Так, в соответствии с уголовным законом Монголии, ПММХ назначаются в отношении лица, совершившего деяние, запрещенное уголовным законом, которое:

- во время или после его совершения находилось в состоянии невменяемости;
- страдает алкогольной или наркотической зависимостью.

Полагаем, что в первом случае, ПММХ являются обособленной от уголовной ответственности мерой государственного принуждения. Во-первых, с учетом современной общепризнанной (в том числе на законодательном уровне) теории субъекта уголовной ответственности аксиомичным является утверждение, что уголовная ответственность в отношении лиц, страдающих психическим расстройством, недопустима. Во-вторых, согласно положениям нормативно-правового акта, при устранении невменяемости в ходе принудительного лечения, назначенного судом, ПММХ отменяются, и лицо привлекается к уголовной ответственности на общих основаниях (ч. 2, ч. 4 ст. 74 УК Монголии). Данный факт в очередной раз подтверждает самостоятельность, уникальность рассматриваемых мер, так как их реализация происходит параллельно, обособлено от наказания и уголовной ответственности.

В-третьих, при назначении ПММХ в отношении лица с «психическим недугом» наряду с уголовным наказанием, либо в процессе исполнения (отбывания) наказания (ч. 6 ст. 74 УК Монголии) социально-правовая природа рассматриваемой меры уголовно-правового воздействия принципиально не меняется по причинам, рассмотренным нами ранее.

Во-втором же случае, ПММХ, с точки зрения законодателя, являются формой реализации уголовной ответственности. Так, назначаемые в отношении лица, совершившего преступление и страдающего алкогольной, либо наркотической зависимостью, меры медицинского характера, в соответствии с УК Монголии, являются *дополнительным видом наказания* (*курсив наш – С.К.*) (ч. 2 ст. 6.4 УК Монголии), что свидетельствует об отождествлении наказания и ПММХ.

Вышеизложенное свидетельствует как о нарушении соответствующих правил законодательной техники при формировании нормы, регламентирующей виды принудительных мер, так и о внутренней рассогласованности института ПММХ.

Прежде всего, ПММХ применяются к лицам, которые по объективным причинам не подлежат уголовной ответственности, в чем и выражается их социально-правовое назначение. Допустимость обратного, то есть реализация обозначенных мер в рамках уголовной ответственности, по сути, есть нарушение указанной социально-правовой сущности. В данном случае стирается грань между наказанием и ПММХ. Более того, последние становятся наказанием, которое применяется дополнительно к основному, что с концептуальной точки зрения в корне не верно.

Полагаем, что выходом из сложившейся ситуации является трансформация, реформирование мер, применяемых к лицам, страдающим алкогольной или наркотической зависимостью. В частности, необходимо определить данную меру не в качестве ПММХ, которая может исполняться наряду с наказанием, а как дополнительное (субсидиарное) по отношению к наказанию обязательство в рамках не уголовного, а уголовно-исполнительного права. Таким образом, процедура исполнения назначенного наказания должна включать в себя уголовно-

исполнительные меры, которые применяются, в том числе к лицам, обладающими определенными заболеваниями.

Безусловно, предложенная обязанность является принуждением, однако принуждением, которое осуществляется в рамках режима исполнения наказания. В уголовном же праве должна быть четка систематизация мер уголовно-правового воздействия исходя из их сущности:

- меры уголовной ответственности, применяемые в отношении лица, признанного виновным в совершении преступления, в том числе страдающего алкогольной или наркотической зависимостью;
- иные меры уголовно-правового характера (меры принуждения), куда, безусловно, включаются ПММХ, назначаемые лицу, не способному по определенным в законодательстве причинам нести уголовную ответственность.

Заключение и выводы

ПММХ по своей сущности являются иными, обособленными от уголовной ответственности, мерами уголовно-правового характера. Данные меры применяются не за совершение преступления, а в связи с его совершением. В ходе производства по уголовному делу названные лица испытывают определенные лишения и правоограничения, но по состоянию здоровья они не способны в полной мере осознавать и воспринимать данные негативные последствия своего поведения. В связи с изложенным можно констатировать в таких случаях факт отсутствия субъективного аспекта уголовной ответственности и, следовательно, самой уголовной ответственности.

Литература

1. Васеловская, А. В. Принудительное лечение в медицинской организации, оказывающей психиатрическую помощь в стационарных условиях, по Уголовному кодексу Российской Федерации : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата юридических наук / А. В. Васеловская. – Томск, 2020. – 12 с. – Текст : непосредственный.
2. Договор между Российской Федерацией и Монголией о правовой помощи и правовых отношениях по гражданским и уголовным делам (ред. от 12.09.2002). – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122001/ (дата обращения: 18.09.2021).
3. Дубинин, Н. П. Генетика, поведение, ответственность: о природе антиобщественных поступков и путях их предупреждения / Н. П. Дубинин, И. И. Карпец, В. Н. Кудрявцев. – Москва : Политиздат, 1982. – 304 с.
4. Ефремова, И. А. Понятие и признаки принудительных мер медицинского характера / И. А. Ефремова. – Текст : непосредственный // Известия Юго-западного государственного университета. Серия: история и право. – 2021. – № 4. – С. 53–62.
5. Ильюк, Е. В. Принудительные меры медицинского характера как мера безопасности / Е. В. Ильюк. – Текст : непосредственный // Уголовное право: стратегия развития в XXI веке : материалы XVII Международной научно-практической конференции. – Москва, 2020. – С. 583–589.
6. Кононов, А. Д. Актуальные проблемы уголовной ответственности лиц с психическим расстройством, не исключающим вменяемости, и применения к этим лицам принудительных мер медицинского характера : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата юридических наук / А. Д. Кононов. – Москва, 2019. – 31 с. – Текст : непосредственный.
7. Михеев, Р. И. Невменяемый. Социально-правовой очерк / Р. И. Михеев. – Владивосток : Издательство Дальневосточного университета, 1992. – 286 с. – Текст : непосредственный.

8. О безопасности : федеральный закон от 28 декабря 2010 г. № 390-ФЗ. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2010. – 29 декабря.

9. О практике применения судами принудительных мер медицинского характера : постановление Пленума Верховного Суда Российской Федерации от 7 апреля 2011 г. № 6. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2011. – 20 апреля.

10. Савин, А. А. Принудительные меры медицинского характера в системе уголовно-правовых мер воздействия / А. А. Савин. – Текст : непосредственный // Вестник Академии следственного комитета Российской Федерации. – 2020. – № 1. – С. 181–184.

11. Скрипченко, Н. Ю. Понятие и виды иных мер уголовно-правового характера / Н. Ю. Скрипченко. – Текст : непосредственный // Вестник института: преступление, наказание, исправление. – 2011. – № 2. – С. 16–21.

12. Уголовный кодекс Монголии / перевод с монгольского Б. Галбадрах, А. Вандан-Иш. – Омск : Омская академия МВД России, 2020. – 144 с. – Текст : непосредственный.

13. Якушин, В. А. Наказание и иные меры уголовно-правового воздействия : монография / В. А. Якушин. – Тольятти : Издательство ВУиТ, 2018 – 337 с. – Текст : непосредственный.

В. Ф. Лапшин

СУДЕБНЫЙ ШТРАФ КАК УГОЛОВНО-ПРАВОВАЯ МЕРА ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИНУЖДЕНИЯ

Предмет исследования: содержание штрафа как иной меры уголовно-правового характера, исполнение которой формирует основание для освобождения от уголовной ответственности.

Цель исследования: определить научную состоятельность диссертационного исследования, проведённого Михайловым Д. О. по теме: «Судебный штраф в уголовном праве России», а также теоретическую и практическую значимость полученных результатов исследования.

Перечень методов и объектов исследования. Для получения результатов исследования использовались методы познания, применяемые в гуманитарных (юридических) науках. Метод контент-анализа применялся при исследовании содержания норм Уголовного кодекса РФ, которые определяют сущность судебного штрафа, основание и порядок его применения, особенности освобождения от уголовной ответственности в связи с исполнением судебного штрафа. Диалектический метод использовался при изучении мнений по вопросам признания судебного штрафа в качестве «иной меры» уголовно-правового характера и (или) основания для освобождения от уголовной ответственности. Логический и системно-структурный методы были применены при исследовании выводов и предложений, сформулированных автором по итогам исследования.

Выводы по результатам исследования: 1) диссертация Михайлова Д. О. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития отечественной юридической науки; 2) диссертационное исследование, выполненное по теме: «Судебный штраф в уголовном праве России», в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук (специальность 12.00.08 – уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное право).

Ключевые слова: судебный штраф, освобождение от уголовной ответственности, гуманизация уголовного законодательства, уголовная политика, стратегия развития уголовного законодательства России.

V. F. Lapshin

JUDICIAL FINE AS A CRIMINAL LAW MEASURE OF STATE COERCION

Subject of research: the content of a fine as another measure of a criminal-legal nature, the execution of which forms the basis for exemption from criminal liability.

Purpose of the study: to determine the scientific viability of the dissertation research conducted by D.O. Mikhailov. on the topic: "Judicial fine in the criminal law of Russia", as well as the theoretical and practical significance of the research results.

List of methods and objects of research. To obtain the research results, the methods of cognition used in the humanities (legal) sciences were used. The method of content analysis was used in the study of the content of the norms of the Criminal Code of the Russian Federation, which determine the essence of a court fine, the basis and procedure for its application, and especially the release from criminal liability in connection with the execution of a court fine. The dialectical method was used in the study of opinions on the recognition of a court fine as a "other measure" of a crim-

inal-legal nature and (or) a basis for exemption from criminal liability. Logical and systemic-structural methods were applied in the study of the conclusions and proposals formulated by the author based on the results of the study.

Conclusions based on the research results: 1) D.O. Mikhailov's dissertation. is a scientific and qualifying work, which contains a solution to a problem that is important for the development of domestic legal science; 2) the dissertation research carried out on the topic: "Judicial fine in the criminal law of Russia" fully complies with the requirements for dissertations for the degree of candidate of sciences (specialty 12.00.08 – criminal law and criminology; penal law).

Keywords: court fine, exemption from criminal liability, humanization of criminal legislation, criminal policy, strategy for the development of criminal legislation in Russia.

Введение

Настоящая работа подготовлена на основе отзыва ведущей организации о диссертации Михайлова Дмитрия Олеговича «Судебный штраф в уголовном праве России», представленной на соискание учёной степени кандидата юридических наук по специальности 12.00.08 – уголовное право и криминология; уголовно-исполнительное право. Диссертация выполнена на кафедре уголовного права в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет правосудия» и успешно защищена «21» сентября 2021 года на заседании Диссертационного совета Д 170.003.01 [1].

Результаты и обсуждение

Актуальность избранной темы заключается в том, что правовая природа судебного штрафа в настоящее время остаётся крайне неопределённой даже на уровне соответствующих положений уголовного закона. Отсутствие ясности относительно содержания данной меры уголовно-правового воздействия порождает значительные трудности при решении вопросов о целесообразности применения судебного штрафа и его отграничения от штрафа как одного из видов уголовных наказаний.

Увеличение количества средств уголовно-правового воздействия, которые не предполагают изоляцию осуждённого от общества, продиктовано проведением современной политики гуманизации уголовного законодательства. Идея о том, что количественный и качественный рост преступности в обществе невозможно эффективно пресечь суровыми мерами уголовной ответственности, породила необходимость поиска средств либерального воздействия на преступность, которые обеспечивали бы выполнение задач, перечисленных в ч. 1 ст. 2 Уголовного кодекса РФ (далее – УК). Судебный штраф относится к числу именно этих новейших мер либерального воздействия в результате применения которых исключается негативное социально-психологическое влияние криминальной субкультуры на лицо, совершившее преступление, но обеспечивается, теоретически, эффективное предупредительное воздействие как на преступника, так и на общество в целом.

Однако, в соответствии с действующим законодательством природа судебного штрафа является двойственной: он одновременно является и видом освобождения от уголовной ответственности (ст. 762 УК), и видом института иных мер уголовно-правового характера (гл. 152 раздела VI УК). Такой феномен не был известен ни русскому, ни советскому уголовному праву. Подобная новизна крайне осложняет как доктринальное осмысление сущности судебного штрафа, так и решение вопросов о его использовании представителями правоохранительных и судебных органов. Кроме этого, несмотря на достаточно продолжительное существование судебного штрафа в российском уголовном праве, отдельными авторами и в настоящее время приводятся небезосновательные аргументы о необходимости отказаться от данной меры уголовно-правового воздействия.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость научного исследования уголовно-правового института судебного штрафа и формулирования предложений по его юридическому совершенствованию. По этим причинам актуальность и теоретико-прикладное значение подготовленного Д. О. Михайловым диссертационного исследования сомнений не вызывают.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации: объект и предмет диссертации определены вполне удачно. Это позволяет наряду с другими составляющими достичь поставленной цели исследования, которая заключается в разработке и аргументации научных положений, раскрывающих закономерности формирования и перспективы развития законодательства о судебном штрафе, а также направления повышения эффективности его применения при освобождении от уголовной ответственности [1, с. 5].

Избранная методология соответствует особенностям объекта и предмета исследования. Автором использованы разнообразные методы научного познания, которые обеспечили всесторонность, полноту и качество проведения представленной научной работы [1, с. 6].

Сформулированные в диссертации выводы и предложения в большей части являются достоверными и обоснованными, что обусловлено верным определением теоретической и правовой основы проведённого исследования [1, с. 6–7].

Работу Д. О. Михайлова выгодно отличает глубокий анализ нормативных актов Российской Федерации, трудов отечественных учёных, посвящённых оценке и решению политико-правовых проблем гуманизации уголовного законодательства, содержания уголовной ответственности, освобождения от уголовной ответственности и наказания, применения отдельных видов иных мер уголовно-правового характера, толкования соответствующих уголовно-правовых норм и др.

Автором подверглись комплексному изучению следующие эмпирические данные:

- 1) показатели судебной статистики, обобщённые Судебным департаментом при Верховном Суде Российской Федерации о применяемых судами мерах уголовно-правового характера в период с 2016 г. по 2020 г.;
- 2) материалы, находящиеся в Государственном архиве РФ, которые содержат сведения о практике применения Указа Президиума ВС СССР от 08.02.1977;
- 3) результаты социологического опроса, проведённого среди судей федеральных судов общей юрисдикции, работников правоохранительных органов, образовательных и научных учреждений, обучающихся по программе аспирантуры. Общее количество респондентов составило 250 человек.

Таким образом, представленная эмпирическая основа [1, с. 7] может характеризоваться всесторонностью и полнотой, что обеспечивает возможность формулирования научно-обоснованных выводов и предложений относительно заявляемого предмета диссертационного исследования.

Представленные в диссертации научные положения и выводы отражены в 9 публикациях, 6 из которых – в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий, рекомендованных ВАК России для опубликования основных положений диссертационных исследований [2, с. 11; с. 18–19]. Основные результаты, выводы, научно-практические рекомендации, сформулированные в исследовании, доведены диссертантом до научной общественности путём выступлений на одной международной и двух всероссийских научно-практических конференциях. Результаты диссертации внедрены в научно-исследовательскую деятельность Центра исследований проблем правосудия Российского государственного университета правосудия (РГУП), в образовательный процесс РГУП и практическую деятельность органов прокуратуры и судов, расположенных на территории республики Крым в составе РФ.

Структура исследования представляется логичной и методологически обоснованной. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к подобному виду работ, характеризуется внутренним единством. Однако, в части компоновки представленных материалов исследования обращает на себя внимание явная диспропорция объёмов первой

[1, с. 13–131] и второй [1, с. 132–181] глав диссертации. Полагаем, что такое решение не продиктовано необходимостью и (или) трудностью обосновать результаты ретроспективного анализа юридических предпосылок введения судебного штрафа в отечественное уголовное право.

Автореферат и опубликованные соискателем работы соответствуют теме и содержанию диссертации. В автореферате и опубликованных работах достаточно полно отражены основные выводы и предложения, которые изложены в тексте диссертационного исследования [2].

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, сомнений не вызывают. Об этом свидетельствуют самостоятельный характер представленного научного труда, значительное количество использованных при проведении исследования публикаций, анализ весьма сложных доктринальных вопросов, лежащих в плоскости заявленного предмета научного исследования.

Своё конкретное выражение научная новизна находит в результатах обстоятельного анализа судебного штрафа, применяемого к лицу, которое признано виновным в совершении запрещённого уголовным законом деяния. Автор справедливо отмечает неоднозначность восприятия судебного штрафа не только правоприменителем, но и законодателем. К сожалению, вопросы понимания и рационального применения судебного штрафа не были устранены даже после ряда разъяснений, которые представлены Пленумом Верховного Суда РФ (постановление от 29.11.2016 № 56).

Одним из достоинств представленного исследования является авторская попытка определить перспективы применения судебного штрафа с учётом возможного введения в уголовный закон категории «уголовный проступок» [1, с. 8, 176 и др.]. Несомненно, что такая новелла (если это решение всё же будет принято) потребует пересмотра некоторых мер уголовно-правового принуждения, которые будут применяться только за совершение запрещённых уголовным законом деяний, но не обладающих достаточной общественной опасностью. Исходя из этого, авторские предложения во многом преопределяют:

- 1) место судебного штрафа в общей системе мер уголовно-правового воздействия, применяемых в отношении лиц, признанных виновными в совершении уголовно-наказуемых деяний;
- 2) превентивную функцию судебного штрафа, реализация которой обеспечит решение задач, заявленных в ч. 1 ст. 2 УК.

Заслуживает поддержки аргументированная автором идея о дифференцированном применении судебного штрафа, а именно о возможности его назначения только за совершение запрещённых уголовным законом деяний, личность потерпевшего от которых по объективным причинам не может быть индивидуализирована. Здесь же вполне логичным и обоснованным видится вывод-исключение, касающийся недопустимости применения судебного штрафа к лицам, виновным в совершении преступлений коррупционной направленности, хотя и не характеризующихся повышенной общественной опасностью [1, с. 10, 184].

Все перечисленные предложения, в целом, представляют собой определённую научную ценность для последующих исследований в области заявленной проблематики. Результаты диссертации Д.О. Михайлова могут способствовать решению задачи совершенствования нормативно-правового регулирования в части определения сущности судебного штрафа, его места в системе мер уголовно-правового воздействия и обеспечения предупреждения совершения новых преступлений, средством которого в отдельных случаях является взыскание сумм судебного штрафа с лица, признанного виновным в совершении преступления, а в возможной перспективе – уголовного проступка.

Высоко оценивая качество результатов исследования, следует обратить внимание автора на некоторые положения и выводы, которые, по нашему мнению, носят дискуссионный характер, а потому нуждаются в дополнительном обосновании и (или) уточнении в процессе устной защиты диссертации.

Во-первых, автор справедливо указывает на правовой «дуализм» судебного штрафа, однако, по нашему мнению, уходит от конкретного ответа на вопрос о должной сущности судебного

штрафа. Предлагаемое авторское определение судебного штрафа как «композиционной меры» [1, с. 184] не может должным образом отразить социально-правовую природу меры государственного принуждения, предусмотренного действующим уголовным законом.

Во-вторых, довольно сомнительным видится утверждение автора в части указания на реализацию посредством судебного штрафа «фискального» и «правовосстановительного» начала уголовного права [1, с. 177, 184]. В отличие от гражданского, налогового и некоторых иных отраслей системы российского права уголовное право не имеет (не должно иметь) указанные начала. Применение наказания и иных мер уголовной ответственности не предполагают компенсацию вреда, причинённого потерпевшему в результате совершения преступления. Такая задача решается путём применения гражданско-правового института возмещения вреда из внедоговорных обязательств (гл. 59, 60 Гражданского кодекса РФ), то есть восстановление нарушенных прав потерпевшего виновным или третьими лицами. Напротив, задачей уголовного права является предупреждение преступлений, что не предполагает восстановление уже нарушенных прав потерпевшего.

Аналогичным образом нами строится опровержение возможности признания фискального начала в уголовном праве. Кроме того, ставить перед правоприменителем задачу пополнения государственного бюджета путём применения к преступнику имущественных мер уголовно-правового принуждения создаст условия для легитимизации откупа от уголовной ответственности, что создаст угрозу существенного роста преступности. Разумеется, что рассматривать преступность в качестве источника материальных доходов противоречит не только государственным (превентивным) интересам, но и этическим нормам любого цивилизованного общества.

В-третьих, не отличается научной новизной идея о создании для возмещения/компенсации причинённого потерпевшим вреда «специальных фондов», формирование которых осуществляется за счёт лиц, признанных виновными в совершении преступления, а средством их регулярного пополнения являются применяемые уголовно-правовые меры имущественного характера [1, с. 9, 146, 150]. Нами уже обращалось внимание на неоднозначность решения о межотраслевом правовом регулировании вопросов возмещения вреда, причиняемого неправомерными, в том числе и преступными, деяниями. Здесь же дополнительно отметим, что особенности осуществления «восстановительного правосудия», организации и обеспечения денежных выплат потерпевшим также не являются предметом уголовно-правовой регламентации.

В-четвёртых, полагаем, что соискателю целесообразно представить дополнительное обоснование необходимости криминализации уклонения от уплаты судебного штрафа [1, с. 10, 185, 247–248]. В подобном решении нами усматривается логическое противоречие, поскольку автор не исключает возможности признания судебного штрафа «основанием для освобождения от уголовной ответственности». В этом случае трудно понять, в чём заключается необходимость формирования самостоятельного состава преступления (предлагаемые дополнения в ст. 314 УК), тогда как в соответствии с ч. 2 ст. 1044 УК в случае неуплаты судебного штрафа в установленный судом срок судебный штраф отменяется, и лицо привлекается к уголовной ответственности по соответствующей статье Особенной части УК.

По нашему мнению, дополнительная криминализация уклонения от уплаты судебного штрафа является излишней и не соответствующей современной российской политике гуманизации уголовного законодательства. Указание автором на возможность аналогии об ответственности за уклонение от применения принудительных мер медицинского характера (ч. 3 ст. 314 УК) нам видится ошибочной по меньшей мере в виду явных социально-правовых различий, существующих между судебным штрафом и принудительными мерами медицинского характера.

Тем не менее, без дискуссионных положений немислима ни одна научная работа. Полемика присуща любому исследованию, что подчеркивает его высокую степень актуальности и важности предложений по разрешению затронутых проблем. Применительно к диссертации Д. О. Михайлова следует учитывать, что многие из перечисленных замечаний носят частный характер и не оказывают существенного влияния на высокую оценку проведенного исследования.

Значимость полученных автором диссертации результатов характеризуется как высокая. Логически выверенный план позволил выполнить исследование, в котором последовательно представлены результаты анализа вопросов теоретического характера и материалы, имеющие очевидную прикладную направленность. Грамотное использование методов научного поиска, оригинальность и обоснованность полученных результатов позволяют сделать вывод об их теоретической и практической значимости.

Ценность рассматриваемого исследования заключается в получении новых научных знаний по определению сущности, основания и условий для применения судебного штрафа как специфической меры уголовно-правового воздействия. Исследование Д. О. Михайлова безусловно содержит в себе решение задачи, имеющей значение для развития уголовно-правовой доктрины, прежде всего, тех её разделов, которые затрагивают вопросы научного обоснования формулирования уголовно-правовых норм о судебном штрафе.

На основании изучения текста диссертации, автореферата и списка научных работ, опубликованных соискателем в процессе проведения исследования, можно заключить, что диссертация Д. О. Михайлова:

- 1) написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в гуманитарную (юридическую) науку;
- 2) содержит сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов и рекомендации по использованию научных выводов;
- 3) прошла необходимую апробацию в научных публикациях. .

Заключение и выводы

1. Диссертация Д. О. Михайлова является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития отечественной юридической науки.

2. Диссертационное исследование, выполненное по теме: «Судебный штраф в уголовном праве России», в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, которые предусмотрены в п. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённом постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения учёных степеней».

3. Автор диссертации, Михайлов Дмитрий Олегович, заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата юридических наук по специальности 12.00.08 – уголовное право и криминология, уголовно-исполнительное право.

Литература

1. Михайлов, Д. О. Судебный штраф в уголовном праве России : диссертация на соискание ученой степени кандидата юридических наук / Д. О. Михайлов. – Москва, 2021. – 246 с. – Текст : непосредственный.

2. Михайлов, Д. О. Судебный штраф в уголовном праве России : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата юридических наук / Д. О. Михайлов. – Москва, 2021. – 19 с. – Текст : непосредственный.

НАШИ АВТОРЫ

Бороненко Марина Петровна Кандидат технических наук Доцент Института нефти и газа Югорского государственного университета Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 329) E-mail: MarinaB7@yandex.ru	Marina P. Boronenko Candidate of Technical Sciences Associate Professor for the Institute of Oil and Gas, Yugra State University Phone +7 (3467) 377-000 (ext. 329) E-mail: MarinaB7@yandex.ru
Галимов Энгель Рафикович Доктор технических наук Заведующий кафедрой «Материаловедение, сварка и производственная безопасность» Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева Тел.: +7 (843) 231-97-60 E-mail: +79871726737@mail.ru	Engel R. Galimov Doctor of Technical Sciences Head of the Department of Materials Science, Welding and Industrial Safety, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev Phone +7 (843) 231-97-60 E-mail: +79871726737@mail.ru
Гимранов Ильдар Рашадович Начальник производственного отдела по эксплуатации газораспределительных станций ООО «Газпром трансгаз Казань» Тел.: +7 (917) 274-88-94 E-mail: ildar86-2003@mail.ru	Ildar R. Gimranov Head of the Production Department for the Operation of Gas Distribution Stations, Gazprom Transgaz Kazan Phone +7 (917) 274-88-94 E-mail: ildar86-2003@mail.ru
Долматов Алексей Викторович Кандидат технических наук Доцент Института цифровой экономики Югорского государственного университета Тел.: +7 (950) 500-13-90 E-mail: adolmatov@bk.ru	Alexey V. Dolmatov Candidate of Technical Sciences Associate Professor for the Institute of Digital Economy, Yugra State University Phone +7 (950) 500-13-90 E-mail: adolmatov@bk.ru
Емелюшин Алексей Николаевич Доктор технических наук Профессор Института металлургии, машиностроения и материалобработки Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова Тел.: +7 (904) 973-79-98 E-mail: emelushin@magtu.ru	Emelyushin Alexey Nikolaevich Doctor of Technical Sciences Professor for the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov Phone +7 (904) 973-79-98 E-mail: emelushin@magtu.ru

<p>Звонов Андрей Викторович</p> <p>Кандидат юридических наук</p> <p>Начальник кафедры криминологии и организации профилактики преступлений Юридического факультета Академии Федеральной службы исполнения наказаний России; Доцент кафедры уголовно-правовых дисциплин Юридического института Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых</p> <p>E-mail: zvonov_av@mail.ru</p>	<p>Andrey V. Zvonov</p> <p>Candidate of Law Sciences</p> <p>Head of the Department of Criminology and Organization of Crime Prevention for the Faculty of Law, Academy of the Federal Penitentiary Service of Russia; Associate Professor of the Department of Criminal Law Disciplines for the Law Institute, Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov</p> <p>E-mail: zvonov_av@mail.ru</p>
<p>Исаева Оксана Леонидовна</p> <p>Студент Высшей инженеринговой школы Института нефти и газа Югорского государственного университета</p> <p>Тел.: +7 (950) 532-97-25</p> <p>E-mail: isoksi06@gmail.com</p>	<p>Oksana L. Isaeva</p> <p>Student of the Higher School of Engineering for the Institute of Oil and Gas, Yugra State University</p> <p>Phone +7 (950) 532-97-25</p> <p>E-mail: isoksi06@gmail.com</p>
<p>Ключникова Регина Радиковна</p> <p>Магистрант Высшей инженеринговой школы Института нефти и газа Югорского государственного университета</p> <p>E-mail: gabdrakhimova_regina@mail.ru</p>	<p>Regina R. Klyuchnikova</p> <p>Master Student of the Higher School of Engineering for the Institute of Oil and Gas, Yugra State University</p> <p>E-mail: gabdrakhimova_regina@mail.ru</p>
<p>Корнеев Дмитрий Сергеевич</p> <p>Кандидат химических наук</p> <p>Старший научный сотрудник Института нефти и газа Югорского государственного университета</p> <p>Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 541)</p> <p>E-mail: korneevds90@mail.ru</p>	<p>Dmitry S. Korneev</p> <p>Candidate of Chemical Sciences</p> <p>Senior Researcher for the Institute of Oil and Gas, Yugra State University</p> <p>Phone +7 (3467) 377-000 (ext. 541)</p> <p>E-mail: korneevds90@mail.ru</p>
<p>Корнеев Сергей Александрович</p> <p>Преподаватель кафедры организации режима и надзора в уголовно-исполнительной системе Юридического факультета Академии права и управления Федеральной службы исполнения наказаний России</p> <p>Тел.: +7 (4912) 93-82-02</p> <p>E-mail: kornei_lam@mail.ru</p>	<p>Sergey A. Korneev</p> <p>Lecturer of the Department of Regime Organization and Supervision in the Penitentiary System for the Faculty of Law, Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service of Russia</p> <p>Phone +7 (4912) 93-82-02</p> <p>E-mail: kornei_lam@mail.ru</p>

Котванова Маргарита Кондратьевна	Margarita K. Kotvanova
Кандидат химических наук	Candidate of Chemical Sciences
Доцент Института нефти и газа Югорского государственного университета	Associate Professor for the Institute of Oil and Gas, Yugra State University
E-mail: kotvanova@mail.ru	E-mail: kotvanova@mail.ru
Лапшин Валерий Фёдорович	Valery F. Lapshin
Доктор юридических наук	Doctor of Law Sciences
Проректор по научной работе Югорского государственного университета	Vice-Rector for Research, Yugra State University
Тел.: +7 (3467) 377-000 (доб. 559)	Phone +7 (3467) 377-000 (ext. 559)
E-mail: kapitan-44@yandex.ru	E-mail: kapitan-44@yandex.ru
Морозов Михаил Ильич	Michael I. Morozov
Магистрант Института цифровой экономики Югорского государственного университета	Master Student for the Institute of Digital Economy, Yugra State University
Тел.: +7 (950) 53-53-668	Phone +7 (950) 53-53-668
E-mail: mmi211199@edu.ugrasu.ru	E-mail: mmi211199@edu.ugrasu.ru
Нефедьев Сергей Павлович	Sergey P. Nefedev
Кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
Доцент Новотроицкого филиала Национального исследовательского технологического университета Московского института стали и сплавов (НИТУ МИСиС)	Associate Professor of the Novotroitsky branch for the National University of Science and Technology, Moscow Institute of Steel and Alloys
Тел.: +7 (912) 797-13-16	Phone +7 (912) 797-13-16
E-mail: sergeynefedyeff@gmail.com	E-mail: sergeynefedyeff@gmail.com
Снитовский Юрий Павлович	Yury P. Snitovsky
Кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
Тел.: + (375) 17-334-82-55	Phone + (375) 17-334-82-55
E-mail: yu.snitovsky@tut.by	E-mail: yu.snitovsky@tut.by
Федяев Владимир Леонидович	Vladimir L. Fedyaev
Доктор технических наук	Doctor of Technical Sciences
Главный научный сотрудник Института механики и машиностроения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»	Chief Researcher, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"
Тел.: +7 (843) 231-97-61	Phone +7 (843) 231-97-61
E-mail: vlfed2020@gmail.com	E-mail: vlfed2020@gmail.com

Цапанова Светлана Сергеевна

Старший преподаватель кафедры управления и административно-правовых дисциплин Юридического факультета Владимирского юридического института Федеральной службы исполнения наказаний России

Тел.: +7 (4922) 45-44-98

E-mail: tsapanovass@yandex.ru

Svetlana S. Tsapanova

Senior Lecturer of the Department of Management and Administrative and Legal Disciplines for the Faculty of Law, Vladimir Law Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia

Phone +7 (4922) 45-44-98

E-mail: tsapanovass@yandex.ru

Научное издание

ВЕСТНИК ЮГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 3 (62)/2021

Цена свободная

16+

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73606 от 31 августа 2018 г.

Дата выхода в свет 07.12.2021

Формат 60x84 1/8. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 12,8. Тираж 1000 экз. Заказ № 264.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
628012, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Отпечатано в секторе редакционно-издательской работы
Научной библиотеки ФГБОУ ВО ЮГУ:
628012, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

Главный редактор – Лапшин Валерий Федорович,
тел. +7 (3467) 377-000 (доб. 559)