

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС  
«НАУКОЕМКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ  
ПРОЕКТЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ»**



МАТЕРИАЛЫ РАБОТ  
ПОБЕДИТЕЛЕЙ И ЛАУРЕАТОВ  
КОНКУРСА



Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2012

Всероссийский конкурс «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 336 с.

В сборнике публикуются материалы работ участников Всероссийского конкурса «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2012 года, ставших победителями и лауреатами конкурса. Работы отражают современный уровень прикладных научных исследований молодых ученых по различным направлениям науки и техники.

Представляет интерес для специалистов в различных областях знаний, учащихся, работников системы высшего образования и Российской академии наук, а также руководителей организаций, занимающихся вопросами внедрения актуальных научных разработок.

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Конкурс проведен в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт № 06.741.11.0019).

© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2012

В.Э. Гасумянц, Т.А. Итс, Д.Д. Каров  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

## ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ В СФЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМИ

Правительством Российской Федерации в последние годы принят ряд масштабных мер по развитию конкурсно-грантовой системы для поддержки исследовательской и инновационной деятельности молодежи, созданию условий для объединения усилий государства, бизнеса и научного сообщества, включения молодежи в инновационную деятельность. Одним из основных факторов мотивации научной деятельности молодых ученых является материальное стимулирование через гранты, стипендии, конкурсы. Особенно велика роль конкурсов инновационных проектов, в основе которых лежат достижения интеллектуального труда. Их стратегическая цель – стимулирование инновационного процесса в системе высшей и средней школы, в научных организациях, привлечение к инновационной деятельности творческой молодёжи. Среди принятых документов: указ «О премии Президента РФ в области науки и инноваций для молодых учёных», указы Президента РФ по материальной поддержке ученых России, молодых российских ученых – кандидатов наук и их научных руководителей, талантливой молодежи, постановления Правительства Российской Федерации по поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук и их научных руководителей, молодых российских ученых – докторов наук, ведущих научных школ

Стратегия государственной молодёжной политики утверждена распоряжением Правительства РФ от 18 декабря 2006 г. № 1760-р. Стратегия разработана на период до 2016 года и определяет совокупность приоритетных направлений, ориентированных на молодежь в возрасте от 14 до 35 лет, включающих задачи, связанные с участием молодежи в реализации приоритетных национальных проектов.

В сентябре 2005 года стартовал приоритетный национальный проект «Образование», который призван ускорить модернизацию российского образования. Одним из важнейших направлений этого проекта, которое должно сформировать основу для реализации инновационного потенциала российской молодёжи, является поддержка на конкурсной основе и поощрение талантливых молодых людей.

Направление приоритетного национального проекта «Образование» по государственной поддержке талантливой молодёжи предусматривает ежегодное определение 5350 юных талантов во всех регионах России. В соответствии с Указом Президента РФ «О мерах государственной поддержки талантливой молодёжи», Постановлением Правительства Российской Федерации от 27 мая 2006 г. N 311 «О премиях для поддержки талантливой молодёжи» 1250 ребят – победителей российских и призёры международных олимпиад – получают премии по 60 тыс. руб., и 4100

молодых дарований – победителей региональных и призёры российских олимпиад – получают премии по 30 тыс. руб.

Перечень олимпиад и иных конкурсных мероприятий, по итогам которых присуждаются премии для поддержки талантливой молодёжи, объявляется на основе взаимодействия Минобрнауки России с международными и общероссийскими общественными объединениями, федеральными органами исполнительной власти.

Также в рамках приоритетного национального проекта «Образование» действует Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.

Система мероприятий Программы построена на сочетании целевого финансового обеспечения в рамках конкретных мероприятий, направленных на сохранение и развитие кадрового потенциала государственного научно-технического сектора, и адресного финансового обеспечения исследований и разработок, осуществляемых молодыми учеными, аспирантами и студентами как самостоятельно, так и под руководством ведущих ученых России.

Также в Российской Федерации уже несколько лет действует Всероссийская программа Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям и Федерального агентства по образованию «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.). Программа УМНИК имеет целью стимулирование студентов, аспирантов и молодых ученых, имеющих собственные идеи, отличающиеся существенной новизной и возможностью коммерциализации своих разработок в разумные сроки. Кроме программы «УМНИК» существует также программа «Старт». Цель программы – создание и развитие малых инновационных предприятий, финансирование инновационных проектов, находящихся на начальной стадии развития.

Кроме того, проводятся различные региональные конкурсы грантов и проектов. Так, в Санкт-Петербурге существует целый ряд конкурсов грантов Правительства Санкт-Петербурга на соискание финансовой поддержки научной и инновационной деятельности молодежи:

- конкурс грантов для студентов и аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (в категориях «дипломный проект» и «кандидатский проект»);

- конкурсный отбор для предоставления субсидий в виде грантов молодым ученым, молодым кандидатам наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга;

- конкурс грантов для молодых научно-педагогических работников высших учебных заведений Санкт-Петербурга и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (по трем категориям: аспиранты и сотрудники, не имеющие ученую степень; докторанты и сотрудники, имеющие ученую степень; доктора наук). Конкурс проводится по четырем направлениям: технические науки;

естественные и математические науки; медицинские науки; гуманитарные и социально-экономические науки;

- конкурс бизнес-идей, научно-технических разработок и научно-исследовательских проектов среди студентов, аспирантов и молодых менеджеров (в возрасте от 18 до 30 лет) под девизом «Молодые. Дерзкие. Перспективные», проводящийся по трем номинациям («Бизнес-идеи», «Научно-технические разработки», «Научно-исследовательские проекты»).

Кроме конкурсов, действуют программы и мероприятия поддержки инновационной деятельности. В начале 2009 года стартовала программа Федерального агентства по делам молодежи «Зворыкинский проект», основная цель которой – дать возможность тысячам молодых людей реализовать свой научный потенциал в России, стать успешными и богатыми через коммерциализацию своих инновационных проектов. Задачи программы: создать национальную систему комплексного поощрения инновационной деятельности в стране, повысить ее привлекательность в молодежной среде; определить победителей – лауреатов национальной Зворыкинской премии в области инноваций, которые должны стать образцами успеха для молодежи; повысить статус людей, создающих инновации, в молодежной среде и в обществе в целом; выявить перспективные инновационные проекты и содействовать их продвижению и коммерциализации; увеличить количество зарегистрированных патентов, инновационных разработок, start up и новых инновационных бизнес-проектов; повысить количество конкурентоспособных инновационных товаров отечественного производства.

В рамках программы «Зворыкинский проект» Федеральное агентство по делам молодежи проводит конкурс молодежных инновационных проектов. Цели Конкурса – содействовать повышению активности молодых ученых, изобретателей и предпринимателей в области инновационной деятельности, повышению привлекательности инновационной деятельности для молодежи, формированию благоприятного общественного мнения об инновационном потенциале России, продемонстрировать уровень российских достижений в инновационной сфере. Участники конкурса – граждане Российской Федерации в возрасте до 30 лет и молодые ученые в возрасте до 35 лет, представляющие инновационные проекты. Конкурс проводится среди следующих типов проектов: 1) инновационная идея – проекты, находящиеся на самых ранних стадиях развития и представляющие результаты проведенных авторами «поисковых» научно-исследовательских работ; 2) инновационный проект – проекты, которые имеют высокую степень завершенности НИОКР, опытные образцы и проработанную стратегию коммерциализации разработки; 3) инновационный продукт – реализованные проекты, результатом которых стал выход на рынок нового товара (технологии, услуги), имеющего спрос у потребителей.

Кроме перечисленных выше существуют и другие конкурсы инновационных проектов, которые проходят в РФ в последние годы как на региональном, так и на федеральном уровнях:

- конкурс Русских инноваций – <http://www.inno.ru/about/history/>;
- конкурс на лучший инновационный проект СПб – <http://www.spbinno.ru/>;
- конкурс на лучшие инновационные проекты в сфере науки и высшего образования Санкт-Петербурга;
- программы поддержки студентов, аспирантов и молодых ученых Фонда некоммерческих программ «Династия» (<http://www.dynastyfdn.com/>);
- гранты РФФИ;
- различные целевые программы по поддержке молодых ученых.

Вышеизложенное позволяет заключить, что в последнее время молодым научно-активным исследователям предоставляется ряд новых возможностей для продвижения и инновационного внедрения своих проектов и разработок. Для максимально эффективной поддержки научно-инновационной деятельности студентов, аспирантов и молодых сотрудников система научно-исследовательской работы студентов (НИРС) вуза должна быть существенно модернизирована. Такая модернизация, например, осуществляется в СПбГПУ. Организация цепочки: НИР – результат – презентация результатов – публикация – участие во внутренних конкурсах СПбГПУ: «Студент года», «Аспирант года», «Инновационные научные работы и научно-технические проекты» предоставляет участникам широкие стартовые возможности для выхода на региональный и всероссийский уровни продвижения проектов.

Важнейшим компонентом для совершенствования качества подготовки творческих, компетентных специалистов, выявления одаренной молодежи является организация и проведение молодежных массовых и состязательных мероприятий.

Принято считать, что к числу массовых мероприятий системы НИРС относятся научные семинары и конференции различной тематики и вида (научные, теоретические, проблемные, практические, научно-практические, методические), дискуссии, диспуты, обсуждения, круглые столы. В массовых мероприятиях могут принимать участие студенты всех курсов. К числу состязательных мероприятий относят студенческие олимпиады (предметные, по специальностям, в последнее время еще и по направлениям), конкурсы (выпускных квалификационных работ по специальностям и направлениям, на лучшую НИР, на получение грантов для проведения исследований), смотры-конкурсы по НИРС, выставки НИРС. В состязательных мероприятиях, кроме предметных олимпиад, принимают участие преимущественно студенты старших курсов.

Сейчас на государственном уровне перед системой высшего образования в качестве приоритетной ставится задача выработать способы и механизмы формирования инновационного менталитета молодежи, привлечения студентов, молодых специалистов к работе в научно-технической инновационной сфере. В этом плане принят ряд мер, способствующих стимулированию инновационной активности студентов, аспирантов и молодых ученых. Приобретает определяющее значение системное выявление и поддержка наиболее одаренных студентов и аспирантов в вузах.

Кроме этого, переход на новый уровень – от исследований к наукоемкому бизнесу – требует от потенциальных участников быстрого приращения интеллектуального капитала, необходимого для достижения успеха. Это должны быть специфические знания и опыт не только в части коммерческой деятельности, но и в части создания и управления инфраструктурой, людскими и материальными ресурсами, т.е. заточенность на проектное управление.

Эти моменты и явились причиной того, что в последние годы обозначились новые тенденции в принципах проведения указанных мероприятий и формирования их тематических направлений.

Среди указанных тенденций можно отметить следующие.

1. Финансирование на конкурсной основе в рамках федеральной целевой Программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы целого ряда мероприятий по Направлению 2 «Обеспечение привлечения молодежи в сферу науки, образования и высоких технологий, а также закрепления ее в этой сфере за счет развитой инфраструктуры». Среди этих мероприятий:

- 2.1. Организация и проведение всероссийских и международных молодежных научных конференций и школ. Цель – эффективное освоение молодыми исследователями и преподавателями лучших научных и методических отечественных и мировых достижений.
- 2.2. Организация и проведение всероссийских и международных молодежных олимпиад и конкурсов. Цель – выявление талантов и способностей студентов, аспирантов и молодых исследователей к научной деятельности. В рамках этого мероприятия ежегодно проводится отбор следующих событий:
  - проведение международных и всероссийских олимпиад (всероссийской олимпиады среди студентов по нескольким междисциплинарным направлениям инновационного характера; проведение всероссийской олимпиады среди студентов по дисциплине или междисциплинарному направлению);
  - проведение всероссийских конкурсов научных работ студентов (конкурсов по нескольким междисциплинарным направлениям; конкурсов научных работ бакалавров; – научных работ магистров);
  - проведение конкурсов аспирантов и молодых исследователей (конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых), решающих задачи по направлениям высокотехнологичных и социально значимых секторов экономики. Проведение форума по одному или нескольким междисциплинарным направлениям с проведением по каждому и всероссийских студенческих олимпиад, и конкурсов научных работ студентов, и научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых.

2. Усиление акцентов на инновационную направленность молодежных конгрессных мероприятий и введение аккредитации части из них для получения возможности авторам лучших работ (проектов) претендовать на финансовую поддержку своих

исследований (разработок). Пример – Программа «УМНИК». Организация и проведение значительного числа таких мероприятий Всероссийского и регионального уровня по тематическим областям научных исследований и разработок технологического характера, входящих в Перечень критических технологий федерального уровня, поддерживается в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы».

При конкурсном отборе представленных на конференциях и форумах научно-технических работ (проектов), кроме обычных требований актуальности и новизны, личного вклада авторов, учитывается конкурентоспособность ожидаемых результатов проекта; инновационная привлекательность проекта для малого предпринимательства; направления и перспективы коммерциализации разработки; обоснованность выбора технологий реализации проекта; состояние разработки; исследования, необходимые для ее завершения. Предпочтение отдается проектам, полностью или частично внедренным в производство на российских заводах, предприятиях, в научно-исследовательских и коммерческих организациях, апробированным и одобренным на внутривузовских, межвузовских, региональных конкурсах, выставках, презентациях, научных конференциях, семинарах, школах и пр.

Задачи указанных мероприятий определяются как:

- выявление из числа участников конкурса наиболее активных и одаренных студентов, которые в ближайшем будущем составят научно-педагогическую и научно-техническую элиту системы образования;
- привлечение студентов, аспирантов и молодых ученых к изучению и решению важнейших современных естественно-научных и технико-технологических проблем;
- привлечение молодежи к реальному участию в процессах развития и модернизации наукоемких технологий в различных отраслях российского народного хозяйства;
- освоение студенческой молодежью методологии инновационных исследований и приобретение навыков опытно-конструкторских работ;
- формирование у студентов научного подхода к технико-экономическому обоснованию постановки инновационных научных работ и экономической оценке эффективности практического использования их результатов;
- концентрация научных способностей и творческих усилий молодежи на приоритетных направлениях инновационных естественно-научных и научно-технических исследований;
- привлечение студентов, аспирантов и молодых ученых региона для участия в выполнении крупных инновационных проектов, которые имеют комплексный межотраслевой характер и реализуют полный инновационный цикл выпуска наукоемкой продукции;

- осуществление мониторинга научных направлений и тематики исследований студентов и аспирантов;
- создание банков данных об инновационных естественно-научных, научно-технических и опытно-конструкторских разработках студенческой молодежи.

К числу важнейших факторов, способствующих формированию и развитию инновационной способности российского общества, воспроизводству творческих личностей в области науки и техники относится инновационное высшее образование.

Инновационная педагогика ориентирована на формирование инновационной способности личности – способности к продуктивной творческой деятельности. Надо отметить, что в отечественной системе высшего профессионального образования образовательные технологии, ныне называемые инновационными, имеют давнюю и богатую историю. К таким технологиям относятся так называемая технология «обучения через исследование» и, более широко – технологии «проблемно-ориентированного», «проектного» и т.п. обучения.

Многолетний опыт деятельности ведущих вузов страны показал, что вовлечение студентов в поэтапно усложняющуюся поисковую деятельность: сначала учебно-научную, а затем и реально значимую научно-исследовательскую или инженерную работу является наиболее эффективным путем для формирования творческого специалиста.

Высшей и наиболее эффективной формой проблемного инновационного образования является НИРС, включенная в учебный процесс, предполагающая вовлечение студентов уже со второго-третьего курсов в поэтапно усложняющуюся исследовательскую работу в лабораториях вуза, академических и других НИИ и предприятий под руководством ведущих специалистов. В процессе НИРС, когда студент непосредственно участвует в исследованиях, и решается реальная научная или производственная задача, ответ на которую не знает ни студент, ни его руководитель, усиливается мотивация к творческой деятельности и особое значение приобретают мотивы самореализации, социальные мотивы, мотивы соревнования и др. При решении всех вопросов, связанных с привлечением молодежи к занятиям научно-исследовательской деятельностью, расширением кадрового потенциала образовательных и научных организаций, следует исходить из понимания того, что базой и основой формирования контингента научного и инженерного корпуса России является цепочка: научно-исследовательская работа студентов (НИРС) – обучение в аспирантуре – становление молодых ученых и специалистов.

Система НИРС является неотъемлемой частью учебного процесса и складывается из этапов вхождения в проблему, получения научного результата, его оформления, создания научных документов и введения информации в научный оборот. Без этих этапов научный результат не существует. Кроме этого, система НИРС – одно из важнейших средств повышения уровня профессиональной подготовки специалистов с высшим профессиональным образованием через освоение студентами в процессе обучения по учебным планам и сверх них основ профессионально-творческой

деятельности, методов, приемов и навыков выполнения научно-исследовательских, проектных и конструкторских работ.

Таким образом, система НИРС позволяет наиболее полно реализовать индивидуальный подход в обучении студентов, дифференцированность при подготовке специалистов. Обучение в вузе с систематическим методически обеспеченным целенаправленным участием студентов в научной и научно-технической деятельности – эффективные способ и средство формирования и развития у студентов творческой мотивации, ответственности, активной созидательной жизненной позиции.

Отметим важность перечисленных выше творческих конкурсов, в которых участвуют студенты в рамках НИРС, для формирования компетентного специалиста-инноватора. На подобных массовых и соревновательных мероприятиях студенты представляют результаты своих исследований в форме устных или/и письменных сообщений или в виде заявок, анонсирующих предполагаемые результаты (в конкурсе грантов). Также на основе полученных результатов студенты под руководством преподавателя готовят научные документы (части отчетов, научные статьи, тезисы), тексты устных выступлений, выступают на конференциях, участвуют в конкурсах научных работ и т.д.

Масштабные меры, принимаемые в последние годы государственными структурами РФ по поддержке исследовательской и инновационной деятельности студентов и молодых ученых, уже дают реальный положительный эффект. Однако только мер, предпринимаемых на государственном уровне, для решения этой проблемы недостаточно. Необходимо проведение работы на уровне непосредственного вовлечения молодежи (прежде всего, студенческой) в проведение научных исследований, формирование у нее на практике интереса к получению научных знаний, творческому развитию. Один из путей проведения такой работы – организация масштабных молодежных научных мероприятий различного типа (конференции, школы, конкурсы). В результате, проведение подобных мероприятий вносит большой позитивный вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов по приоритетным направлениям техники и технологий и в сфере инновационной деятельности. Проведенный на базе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Всероссийский конкурс «Наукоемкие инновационные проекты молодых ученых», работы победителей и лауреатов которого представлены в данном сборнике – одно из необходимых звеньев на пути формирования кадрового потенциала России в сфере науки и техники.

# РАБОТЫ ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТА»

К.Ю. Афанасьев (студент)

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Научный руководитель – Л.И. Молодежникова, ст. преподаватель каф. ТПТ, ТПУ.

## РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ОБЕССОЛИВАНИЯ СТОКОВ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТЭЦ

### Реферат

*Ключевые слова:* аппарат погружного горения, тепловой баланс, материальный баланс, водоподготовительная установка, погружная горелка, скруббер Вентури, циклон-каплеуловитель, сушильная установка, сульфат натрия, установка мгновенного испарения.

Объектом исследования являются схемы термического обезвреживания сточных вод водоподготовительной установки ТЭЦ, включающие аппарат погружного горения (АПГ), установку мгновенного испарения (УМИ), систему газоочистки и сушильную установку.

**Цель работы:** разработка и оптимизация схемы обессоливания сточных вод, образованных при обмывке и регенерации катионитных и анионитных фильтров водоподготовительной установки ТЭЦ с возможностью получения высококонцентрированного сульфата натрия.

#### **Основные задачи работы:**

- сравнительный анализ существующих методов обессоливания сточных вод;
- разработка нескольких вариантов схем обессоливания;
- оптимизация разработанных схем;
- проектирование основных компонентов оптимизированной схемы для ТЭЦ, использующей натрий-катионитные фильтры;
- технико-экономический анализ.

**Методы проведенных исследований:** литературный обзор, анализ сточных вод ТЭЦ и выбор наиболее опасной, сравнительный анализ методов обессоливания, математическое моделирование, разработка и оптимизация.

**Основные результаты НИР** – разработка и оптимизация системы термического обезвреживания, конструирование и расчет основного оборудования, входящего в систему обезвреживания, подбор вспомогательного оборудования, технико-экономический анализ, разработка автоматической системы регулирования, моделирование процессов, происходящих в аппарате погружного горения, создание компьютерных моделей теплообменного оборудования.

## Введение

В настоящее время, говоря о промышленности и, в особенности, об энергетическом секторе, все чаще встает вопрос о выработке мер по энерго- и ресурсосбережению.

Политика энерго- и ресурсосбережения ставит перед собой такие цели как:

- эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов;
- максимальное использование вторичных энергоресурсов (ВЭР), которые в дальнейшем могут быть использованы для получения энергии или другой экономической выгоды;
- эффективное использование территории промышленных объектов без неконтролируемого разрастания полигонов для отходов производства.
- рациональное использование водных ресурсов.

Также внимание должно уделяться и экологическому аспекту данной проблемы.

В целях защиты окружающей среды (ЗОС) работа промышленности должна быть организована так, чтобы образующиеся отходы превращались в новые продукты. Охрана природы требует, чтобы производство совершенствовалось, а отходы утилизировались; все процессы создавались на основе малоотходной и безотходной технологии. Применение малоотходной и безотходной технологии позволит не только решить проблему ЗОС, но одновременно обеспечит высокую экономическую эффективность производства [1].

Безотходная технология является наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия предприятий. Под понятием «безотходная технология» следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах, который на данном этапе развития общества должен включать: совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов и сбросов вредных веществ и отходов в окружающую среду; обеззараживание отходов; замену не утилизируемых отходов на утилизируемые т.д.

Пассивные методы защиты окружающей среды включают комплекс мероприятий по ограничению выбросов/сбросов с последующей утилизацией или захоронением отходов. К их числу относится очистка сточных вод и газовых выбросов от вредных примесей, захоронение токсичных и радиоактивных отходов и т.д.

Водоемы и водотоки представляют собой сложные экологические системы существования биоценоза – сообщества живых организмов. Эти системы создавались в течение длительного времени эволюции. Водоемы являются не только сборниками воды, в которых вода усредняется по качеству, но и в них непрерывно протекают процессы изменения состава примесей – приближение к равновесию, которое может быть нарушено в результате многих причин, но особенно в результате сброса сточных вод [2].

Наиболее неблагоприятными видами являются сточные воды, образованные при регенерации и обмывке катионитных и анионитных фильтров водоподготовительной установки, непосредственный сброс которых в водоемы невозможен из-за резкопеременных значений рН, выходящих за пределы 6,5-8,5, оптимальных для воды в водоемах, а также высокого содержания в них грубодисперсных примесей и солей. Очистка таких вод должна сводиться к удалению основной части солей, грубодисперсных примесей и коррекции их рН в соответствии с условиями, предъявляемыми санитарными нормами, регулируемыми сбросы сточных вод в водоемы.

Удаление грубодисперсных примесей и регулирование рН не представляют труда, но снижение концентрации истинно-растворенных примесей должно сводиться к повторному проведению тех же самых процессов, которые использовались на водоподготовительных установках. Это, в конечном счете, приведет к резкому возрастанию количества сбрасываемых солей со значительным увеличением суммарных затрат на очистку воды [2].

Выходом из этого положения может быть применение выпарных аппаратов для концентрирования и глубокого упаривания сточных вод.

Рассматривая проблемы энерго-ресурсосбережения и экологии в едином ракурсе, выходом из этого положения может быть разработка и оптимизация новых схем обессоливания, которые позволят не только очистить стоки, но и получить вторичный материальный ресурс. При этом должны быть максимально использованы вторичные энергоресурсы, водные ресурсы и территория ТЭЦ.

Цель работы: разработка и оптимизация схемы обессоливания сточных вод, образованных при обмывке и регенерации катионитных и анионитных фильтров водоподготовительной установки ТЭЦ с возможностью получения высококонцентрированного сульфата натрия.

Основные задачи работы:

- сравнительный анализ существующих методов обессоливания сточных вод;
- разработка нескольких вариантов схем обессоливания;
- оптимизация разработанных схем;
- проектирование основных компонентов оптимизированной схемы для ТЭЦ, использующей натрий-катионитные фильтры;
- технико-экономический анализ.

Результаты данной работы позволят создать безотходную установку обессоливания сточных вод, которые сейчас без обработки сбрасываются в пруды-накопители шлама, повысить экологические и технико-экономические показатели станции, а также даст возможность получить концентрированный сульфат натрия, который может найти широкое потребление в различных отраслях промышленности.

## 1. Сравнительный анализ методов обессоливания

Получение обессоленных вод может осуществляться на основе любых известных методов деминерализации: физико-химических (электродиализ, обратный осмос, ионный обмен и др.), холодильных (вымораживание на теплопередающей поверхности, под вакуумом, контактное вторичными хладагентами, кристаллогидратный) и дистилляционных.

В настоящее время обессоленную воду на большинстве крупных предприятий получают с применением метода ионного обмена в специальных ионообменных фильтрах из поверхностных вод, затрачивая при этом большие количества дорогостоящих ионообменных смол и реагентов.

Если исходная вода имеет повышенное содержание ионов сильных кислот ( $>5$  мг-экв/кг), испарительные установки по своим технико-экономическим показателям выгоднее, чем установки химического обессоливания [3]. Данную зависимость можно увидеть на рисунке 1.

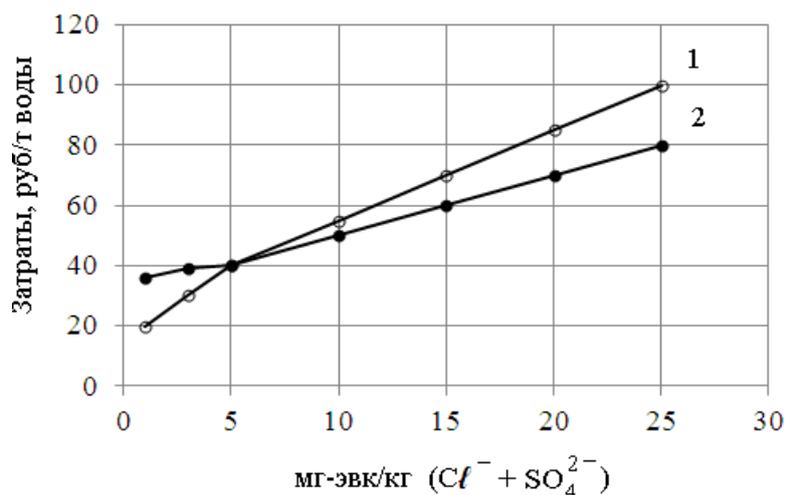


Рис. 1. Сравнение затрат на химическое (1) и термическое (2) обессоливание

Удаление грубодисперсных примесей и регулирование рН не представляют труда, но снижение концентрации истинно-растворенных примесей должно сводиться к повторному проведению тех же самых процессов, которые использовались на водоподготовительных установках. Это, в конечном счете, приведет к резкому возрастанию количества сбрасываемых солей со значительным увеличением суммарных затрат на очистку воды.

Выходом из этого положения может быть применение выпарных аппаратов для концентрирования и глубокого упаривания сточных вод.

Процесс выпаривания применяется для достижения различных целей – опреснение воды, разделение смесей, концентрирование растворов и т.д. Отсюда наличие большого числа различных типов и модификаций выпарных установок.

Классификация современных испарительных установок может быть проведена по следующим основным признакам:

1. принципу действия;
2. гидродинамике режима;
3. способу использования теплоты вторичного пара;
4. роду теплоносителей, обогревающих поверхности;
5. конструктивному исполнению;
6. по способу организации движения раствора.

Наиболее подходящие для выпаривания сточных вод испарительные установки условно можно разделить на установки, в которых раствор контактирует с поверхностью нагрева и установки, в которых раствор не контактирует с поверхностью нагрева. В установках первого типа образуются отложения солей с соответствующим снижением плотности теплового потока и производительности установок. При этом неизбежны периодические остановки на чистку поверхности нагрева, снижающие технико-экономические показатели и усложняющие эксплуатацию установок. Степень концентрирования раствора в них существенно ограничена из-за резкого увеличения отложений с ростом концентрации раствора.

Одним из путей уменьшения отложений солей на поверхностях нагрева установок концентрирования минерализованных вод является использование аппаратов погружного горения (АПГ), при этом стоит отметить эффективность использования установок мгновенного испарения (УМИ) при малых концентрациях за счет возможности использования низкотемпературных вторичных энергоресурсов (ВЭР).

## **2. Графоаналитический метод определения областей использования аппаратов для термической обработки растворов**

В целях рационального использования теплоэнергетических ресурсов при термической обработке жидкостей чрезвычайно важно знать области применения теплоиспользующих установок, в которых процесс выпаривания растворов становится эффективным и экономичным.

При удалении паровой фазы концентрация раствора будет непрерывно увеличиваться. Изменение содержания воды в растворе  $y$  по отношению к массовой концентрации раствора  $x$  можно представить в виде зависимости:

$$y=f(x).$$

В процессе выпаривания раствора содержание воды уменьшается и в конечном результате достигается соотношение:

$$y=100(G_{ж}/G_{т}), \quad (1)$$

где  $G_{ж}$ ,  $G_{т}$  – масса растворителя и растворенного вещества, кг.

Масса воды в остатке упаренного раствора:

$$G_{ж} = G_{пр} - G_{т},$$

где  $G_{пр}$  – масса продукта (концентрата), кг.

Подставляя это значение  $G_{ж}$  в (1), получаем:

$$y = G_{ж} / G_{т} = (G_{пр} - G_{т}) / G_{т} = G_{пр} / G_{т} - 1.$$

Для любого раствора при концентрации  $x$ , %, содержание растворенного вещества определяется по формуле:

$$G_{т} = 0,01 G_{пр} x.$$

Далее получаем:

$$y = (100 - x) / x.$$

Из этого уравнения мы видим, что каждой концентрации  $x$  соответствует определенное значение  $y$  при условии, что выпаривание ведется без уноса раствора с паровой фазой. Поэтому, задаваясь концентрацией растворенного вещества в конечном растворе, можно графически получить кривую (рисунок 2), характеризующую зависимость  $y = f(x)$ .

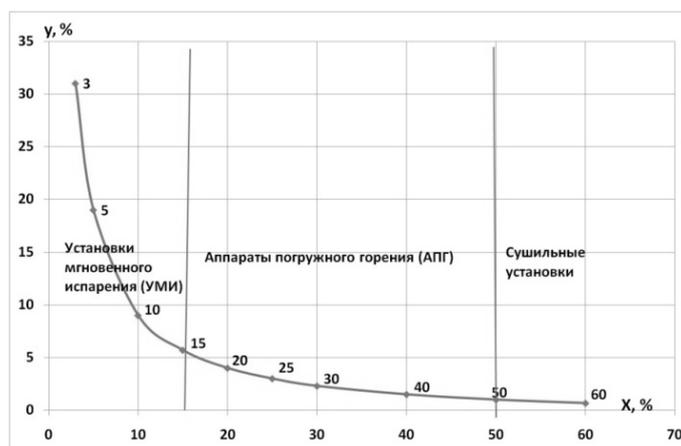


Рис. 2. График определения областей использования выпарных установок

Из графика на рисунке 2 видно, что выбор того или иного выпарного аппарата зависит от той концентрации раствора, которую мы хотим получить и от конечного содержания воды в растворе, соответственно, эффективно и экономично получить высококонцентрированный насыщенный продукт можно только в аппарате погружного горения с последующей сушкой, также стоит отметить эффективность применения установок мгновенного испарения для концентрирования раствора до 10-15%, учитывая, что работать они могут на низкотемпературных вторичных энергоресурсах.

В этих аппаратах создаются хорошие условия теплообмена между нагретыми газами и жидкостью, так как при барботаже нагретые газы распыляются в виде пузырьков и образуют большую межфазную поверхность. Интенсивное перемешивание раствора ускоряет процесс нагрева.

Включение АПГ в состав оборудования технологической схемы ТЭЦ позволит кардинально решить такие задачи как:

- полностью прекратить сброс загрязненных сточных вод водоподготовительной установки в природные водоемы и пруды-накопители шлама;
- сократить потребление свежей воды из природных источников;
- создать благоприятные санитарно-гигиенические условия на электростанции;
- регулировать расход воды в системах оборотного водоснабжения за счет стабильности параметров;
- снизить капитальные затраты на установку очистных сооружений;
- получить экономический эффект при утилизации сточных вод [5].

### 3. Оптимизация схем термического обезвреживания с использованием испарительных установок

В ходе работы были разработаны и проанализированы четыре схемы для упаривания сточных вод, образующихся после регенерации и обмывки катионитных и анионитных фильтров водоподготовительной установки ТЭЦ. Среднее солесодержание исходных стоков составляло  $27,4 \text{ кг/м}^3$ , в том числе  $8,5 \text{ кг/м}^3$  хлористого натрия и  $18,5 \text{ кг/м}^3$  сульфата натрия. Количество анионов сильных кислот превышает  $35 \text{ гэкв/кг}$ . Принятый состав стоков характерен для большинства ТЭЦ, использующих натрий-катионитные фильтры.

Топливо — природный газ Уренгой-Сургут-Челябинск.

Производительность схемы по исходному продукту  $L=15000 \text{ кг/ч}$ . В аппарат поступает раствор следующего состава:  $0,85\% \text{ NaCl}$ ,  $1,85\% \text{ Na}_2\text{SO}_4$ ,  $0,025\%$  другие соли,  $97,3\% \text{ H}_2\text{O}$  с температурой  $30^\circ\text{C}$ . После многоступенчатого выпаривания и сушки должен образоваться  $97\%$  сульфат натрия.

Рассмотренные схемы представлены на рисунках 3 – 6.

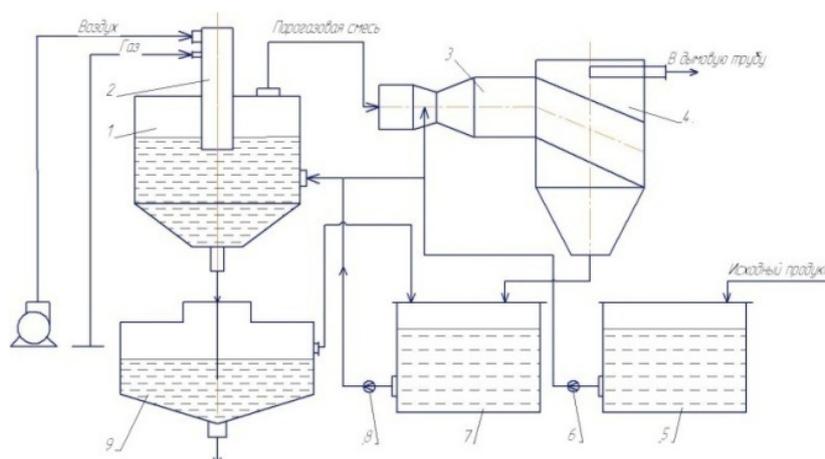


Рис. 3. Схема №1

Недостатком первой схемы является ее замкнутость, т.е. происходит постоянное неравномерное изменение содержания солей без вывода очищенной воды. Также

отсутствует сушильная установка. Соответственно отсутствует возможность получения очищенной воды и конечного высококонцентрированного сульфата натрия, а значит стоимость реализации 45%-ого раствора сульфата натрия будет ниже.

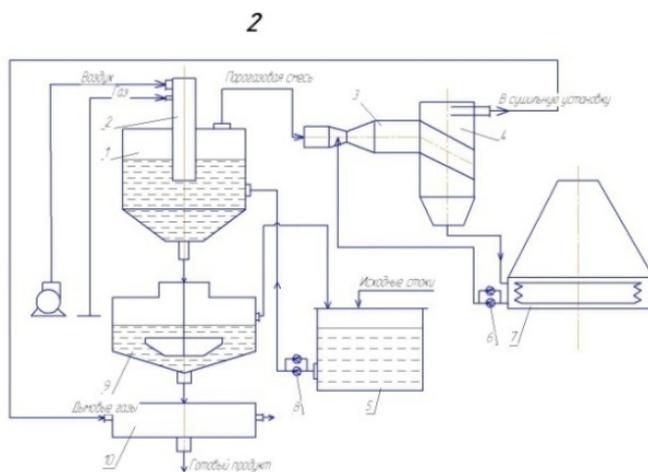


Рис. 4. Схема №2

К минусам второй схемы можно отнести не использование теплоты уходящей парогазовой смеси, использование которой позволило бы нагревать воду для ГВС, а значит – снизить потребление природного газа. В схеме уже присутствует сушильная установка для получения готового порошкообразного сульфата натрия.

В третьей схеме был устранен недостаток предыдущей, и теплота уходящей парогазовой смеси используется для нагрева воды в системе ГВС. При этом недостатком всех трех схем является большой расход природного газа в АПП.

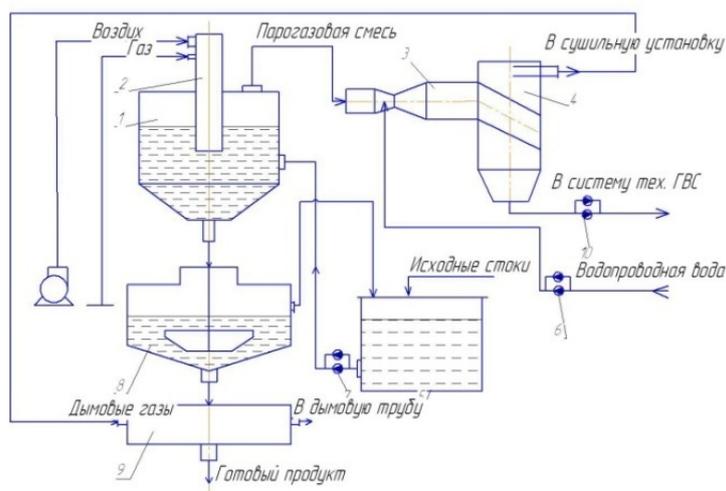


Рис. 5. Схема №3

Отличительной особенностью четвертой схемы является использование на первой степени упаривания аппарата мгновенного вскипания. Как видно из графика

(рисунок 2) экономично упаривать в опреснительной установке возможно до концентрации 5%, соответственно расход природного газа на АПГ снижается в 2.7 раза.

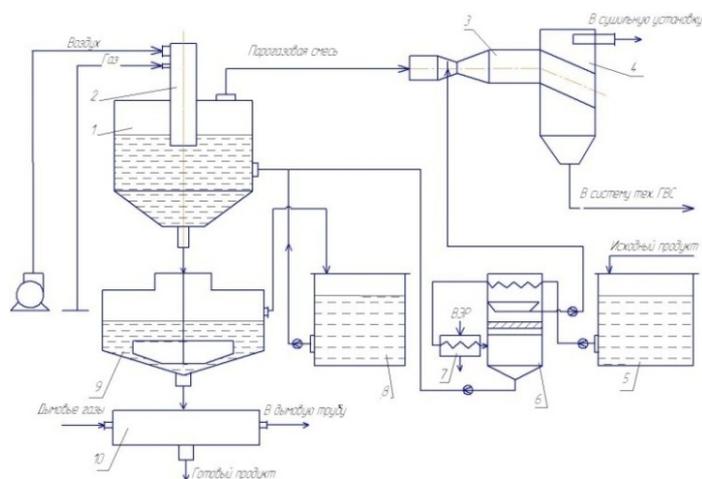


Рис. 6. Схема №6

Выбор системы газоочистки производился с целью достижения наиболее интенсивного тепло- и массообмена для утилизации теплоты парогазовой смеси, эффективного пылеулавливания, а также малой металлоемкости, в результате чего были рассмотрены различные виды скрубберов и конденсаторов и выбран скоростной газопромыватель, состоящий из скруббера Вентури и циклона-каплеуловителя.

Для повышения качества получаемого сульфата натрия предложено использовать барабанную сушилку, источником теплоты для которой будут служить уходящие газы АПГ, это позволит получить экономический эффект при реализации  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Параметры рассмотренных схем приведены на рис. 7, рис. 8.

Далее приведем сравнение рассмотренных схем с помощью критериев оптимальности.

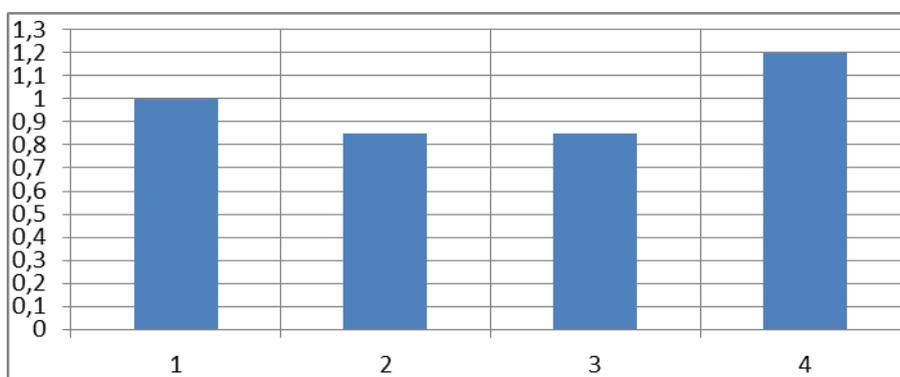


Рис. 7. Удельный коэффициент геометрической компактности

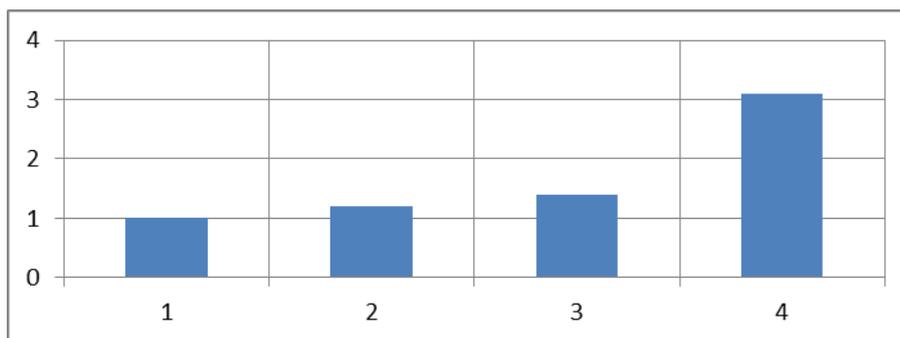


Рис. 8. Удельный критерий оптимизации Кирпичева

Наиболее важными экономическими критериями оптимальности являются годовая прибыль и срок окупаемости. Результаты экономического расчета рассматриваемых схем приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экономический расчет рассмотренных схем.

Расходы, млн. руб./год				
	№1	№2	№3	№4
Природный газ	16,102	16,102	16,102	5,964
Электроэнергия	0,238	0,238	0,238	0,238
Заработная плата	0,54	0,54	0,54	0,54
Страховые фонды	0,162	0,162	0,162	0,162
Амортизация	0,139	0,161	0,161	0,158
Всего	17,180	17,203	17,203	7,061
Доходы млн. руб./год				
Реализация сульфата натрия	9,791	13,46	13,46	13,46
Регенерация теплоты (ГВС)	0	0	4,503	1,668
Охрана и рациональное использование водных ресурсов	0,55	0,55	0,55	0,55
Всего	10,341	14,01	18,513	15,678
Капитальные затраты, млн. руб.	2,779	3,229	3,229	3,154
Срок окупаемости, лет	нет	нет	2,5	0,4
Годовая прибыль, млн. руб.	нет	нет	1,310	8,616

Из таблицы и диаграмм (рис. 7, 8) видно, что наиболее экономически выгодной является четвертая схема, которая выигрывает за счет меньшего расхода природного газа. Первая и вторая схема невыгодны, так как у них отсутствует возможность полезного использования теплоты уходящей парогазовой смеси. Третий вариант является промежуточным и менее материалоемким, чем четвертый, но все же, проигрывает по годовой прибыли и окупаемости.

В результате, как наиболее оптимальная, была выбрана 4-ая схема.

В выбранной схеме подлежащие выпариванию стоки из сборника 5 насосом 7 подают в аппарат мгновенного вскипания 6, который работает за счет ранее не используемых вторичных энергоресурсов, далее раствор с повышенной концентрацией поступает в АПГ 1 с газовой погружной горелкой 2. В скруббер Вентури 3 на промывку и охлаждение уходящей из аппарата парогазовой смеси подается сконденсированная вода из аппарата мгновенного вскипания, которая циркулирует с помощью насоса. Отделение стоков от парогазовой смеси происходит в циклоне 4. Нагретая до  $70^{\circ}$  вода вместе с конденсатом из циклона 4 подается в систему ГВС. Частично охлажденные дымовые газы идут в сушильную установку 9, после чего выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу. Упаренный раствор подается из АПГ в отстойник 6, снабженный механической мешалкой. Осветленный маточный раствор из верхней части отстойника переливается в сборник 5 и снова поступает на выпаривание, а образовавшийся на дне выпаренный сульфат натрия периодически выводится через нижний патрубок в сушильную установку 9, использующую в качестве теплоносителя уходящие газы АПГ.

#### **4. Автоматизация теплообменника установки мгновенного испарения**

Полная схема упаривания сточных вод водоподготовительной установки ТЭЦ представлена на рисунке 6.

Установка мгновенного испарения (УМИ) (6) служит в качестве первой степени концентрирования раствора, после чего он поступает в аппарат погружного горения (1).

Теплообменник (7) предназначен для нагрева за счет уходящих газов исходных стоков перед УМИ для их дальнейшего испарения.

Тепловая нагрузка теплообменника должна обеспечивать заданную температуру воды на выходе из подогревателя. Поэтому необходимо постоянное регулирование расхода дымовых газов, поступающих от вторичных источников, а также необходим постоянный контроль за температурой и расходом воды до и после подогревателя. Оптимизировать эти процессы возможно путем создания системы автоматического контроля и регулирования температуры теплоносителя на входе в установку мгновенного испарения (УМИ).

Функциональная схема контроля и регулирования температуры теплоносителя на входе в установку мгновенного испарения приведены на рисунке 9. На выбранной схеме видно, что уходящие газы вторичных источников проходят через регулирующий вентиль, затем измеряется их температура, после чего уходящие газы поступают в ТА.

Вода из УМИ проходит через измеритель расхода и измерители температуры, которые установлены до и после ТА. Сигналы от измерительных устройств и датчика температуры прямой сетевой воды поступают на регулирующее устройство, которое, в зависимости от температуры воды и уходящих газов, при помощи исполнительного механизма регулирует подачу уходящих газов, поддерживая заданную температуру воды.

Предложенное решение позволит использовать в качестве теплоносителя для УМИ различные вторичные энергетические ресурсы с переменной температурой, так как тепловой баланс контролируется автоматически.

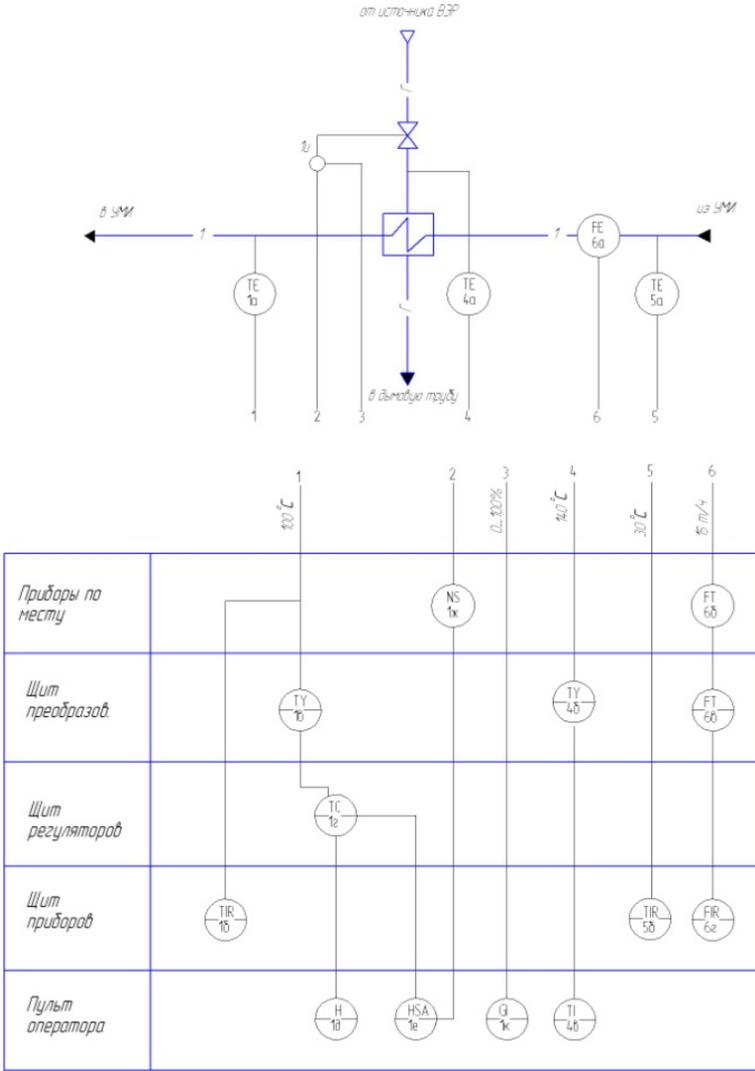


Рис. 9. Функциональная схема автоматического контроля и регулирования температуры теплоносителя на входе в установку мгновенного испарения

## Заключение

В ходе работы был проведен анализ видов сточных вод, источниками которых являются теплоэлектростанции. Выявлено, что одними из наиболее нежелательных видов сточных вод являются сбросы водоподготовительных установок. Для очистки данных стоков были рассмотрены различные способы обессоливания.

В итоге было разработано несколько схем и в результате оптимизации и технико-экономического анализа выбрана схема с использованием установки мгновенного испарения и аппарата погружного горения, которая позволит не только обессоливать воду, образованную при регенерации и обмывке катионитных и анионитных фильтров водоподготовительной установки ТЭЦ, но и получать высококонцентрированный сульфат натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Включение АПГ в состав оборудования технологической схемы ТЭЦ позволит кардинально решить следующие задачи:

- Полностью прекратить сброс загрязненных сточных вод водоподготовительной установки в природные водоемы и пруды-накопители шлама;
- Сократить потребление свежей воды из природных источников;
- Создать благоприятные санитарно-гигиенические условия на производстве;
- Регулировать расход воды в системах оборотного водоснабжения за счет стабильности параметров;
- Снизить капитальные затраты на сооружение очистных сооружений;
- Получить экономический эффект при утилизации сточных вод.

В ходе проектирования компонентов схемы был произведен расчет установки мгновенного испарения (тепловой расчет, расчет конденсаторов и переточных устройств), аппарата погружного горения (расчет материального и теплового балансов, математическое моделирование и определение габаритных размеров парогазового пространства), определены основные параметры и габаритные размеры сушильной установки, а также разработана система автоматического регулирования температуры теплоносителя на входе в УМИ.

Выбор системы газоочистки производился с целью достижения наиболее интенсивного тепло- и массообмена для утилизации теплоты парогазовой смеси, эффективного пылеулавливания, а также малой металлоемкости, в результате чего был выбран скоростной газопромыватель, состоящий из скруббера Вентури и циклона-каплеуловителя.

Для повышения качества получаемого сульфата натрия предложено использовать барабанную сушилку, источником теплоты для которой будут служить уходящие газы АПГ, это позволит получить экономический эффект при реализации  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Срок окупаемости наиболее экономичной схемы упаривания составит 5 месяцев.

Полученный в результате выпаривания сульфат натрия может найти широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности, он один из основных компонентов шихты в производстве стекла.

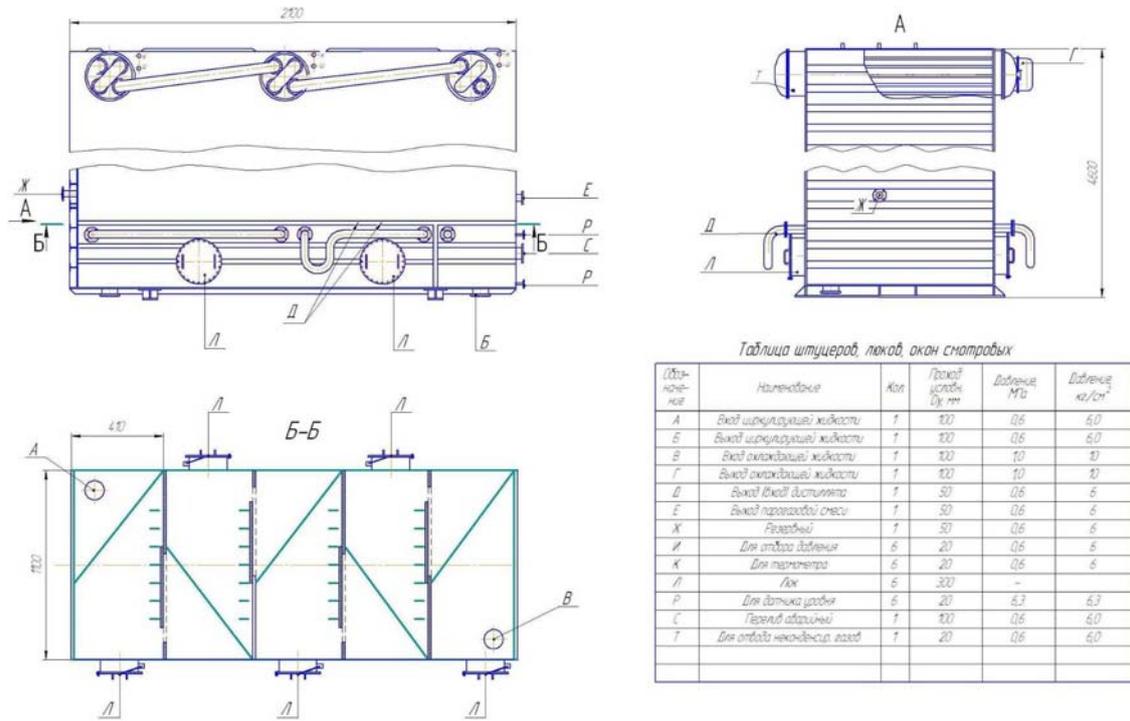
За счет утилизации 25% теплоты уходящей парогазовой смеси в системе газоочистки при нагреве водопроводной воды от 5 до 70 °С удастся компенсировать 15 м<sup>3</sup>/ч технической горячей воды в системе водоснабжения.

Разработанная система термического обезвреживания сточных вод может быть применена не только на ТЭЦ, но и на многих других промышленных предприятиях. Внедрение подобной технологии будет эффективно для переработки стоков электрообессоливающих установок нефтеперерабатывающих заводов, и даст возможность получения хлорида натрия, сточных вод кожевенного производства с получением хрома и других промышленных предприятий. Все предложенные решения позволят эффективно использовать вторичные энергоресурсы и территорию ТЭЦ без бесконечного роста прудов-накопителей шлама, рационально использовать водные ресурсы, а значит, повысятся экологические и технико-экономические показатели станции.

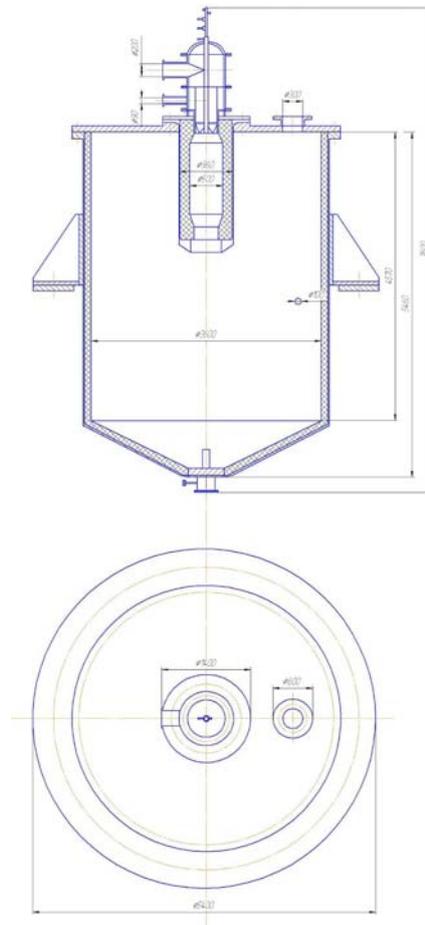
#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Защита биосферы от промышленных выбросов: учебное пособие / А. И. Родионов, Ю. П. Кузнецов, Г. С. Соловьев. — М.: КолосС: Химия, 2005. — 387 с.
2. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций: учебное пособие / Л. А. Рихтер, Э. П. Волков, В. Н. Покровский. — М.: Энергоиздат, 1981. — 295 с.
3. Вихрев В. Ф. Водоподготовка: учебное пособие / В. Ф. Вихрев, М. С. Шкроб. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1973. — 416 с.
4. Аппараты погружного горения: учебное пособие для вузов / А. Н. Алабовский, П. Г. Удыма. М.: Изд-во МЭИ, 1994. — 255 с.
5. Афанасьев К. Ю. Вариант термического обезвреживания сточных вод водоподготовительной установки АЭС // Известия вузов. Физика. 2012. №2/2. С. 150 – 152.

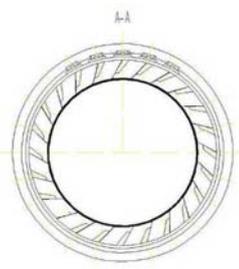
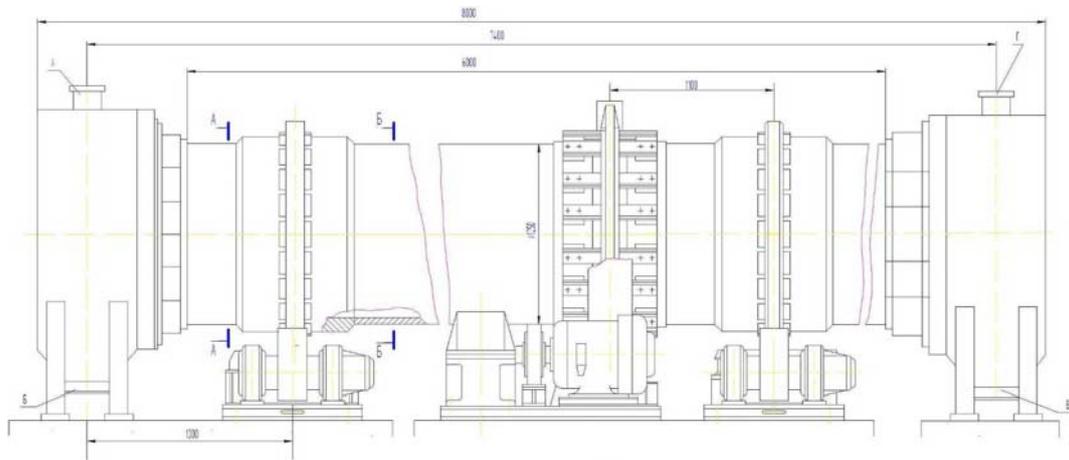
### Приложение 1. Чертеж установки мгновенного испарения



### Приложение 2. Чертеж аппарата погружного горения



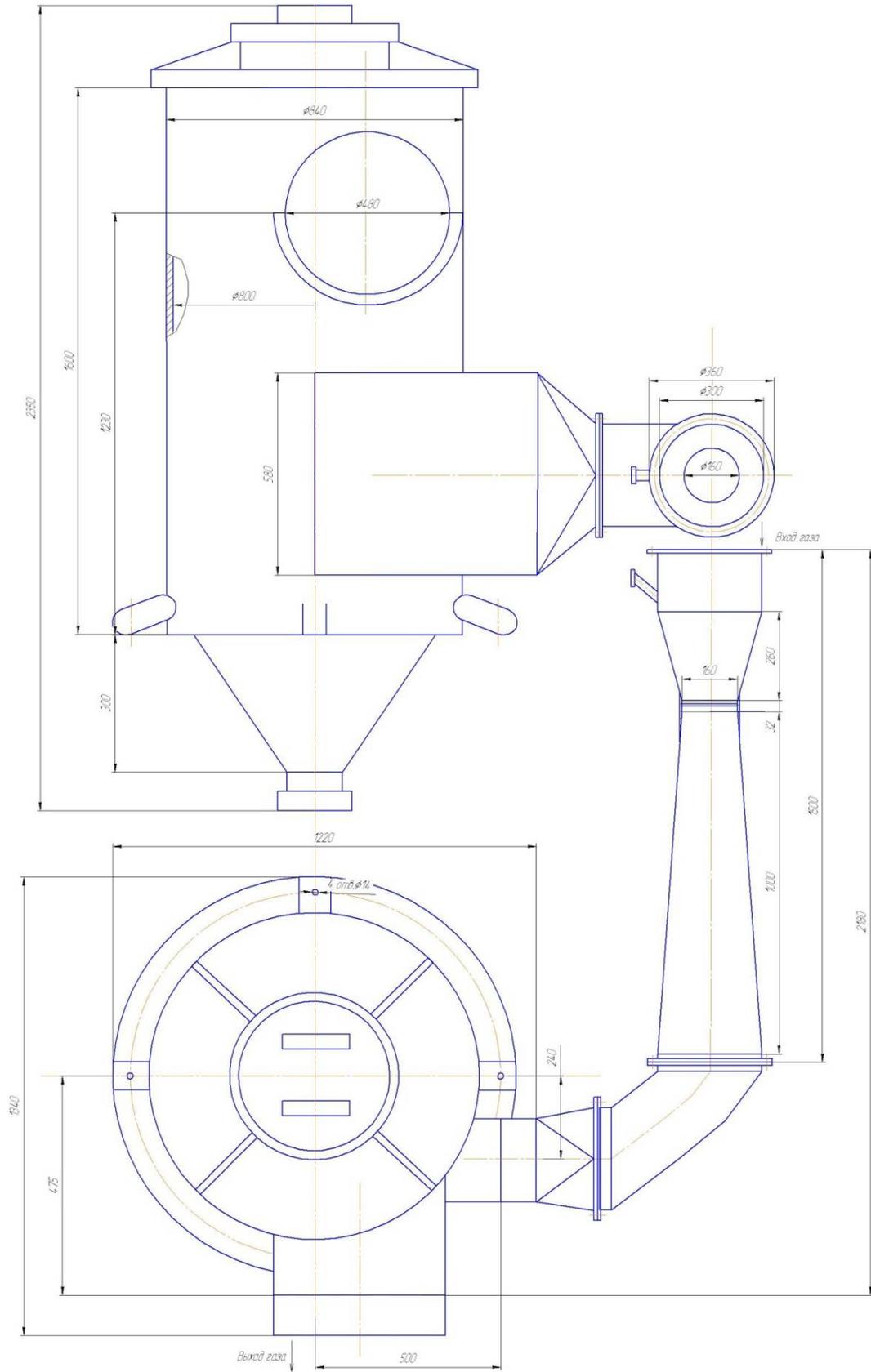
### Приложение 3. Чертеж барабанной сушилки



Мат.	Измерение	Мат.	Ди. мм
1	Вал ШД	1	60
2	Вал ШД	1	30
3	Вал ШД	1	60
4	Вал ШД	1	30

Наименование	Техническое описание	Материал
Двигатель	Электродвигатель	сталь
Ролик	Ролик	сталь

Приложение 4. Чертеж системы очистки парогазовой смеси



А.К. Воробьева (студент, магистрант 1 года обучения)  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»  
Научный руководитель – С.В. Мятаж, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВПО «НГТУ»,  
доцент каф. ЭТК

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАССАЖИРСКОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

*Ключевые слова:* электротехнический комплекс, транспорт, общественный, рельсовый, трубопроводная эстакада, прочность конструкции, тяговый расчет, энергопотребление

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным, опубликованным Межправительственной группой экспертов по изменению климата, сектор Транспорта занимает значительную долю в суммарных выбросах антропогенных парниковых газов [1]. Одной из эффективных практик смягчения воздействий на изменение климата по данному сектору признан переход с автомобильного транспорта на системы общественного. Возможности изменения технических решений действующих систем ГМПТ практически близки к нулю, тогда как новое проектирование предоставляет для этого все возможности.

Решение проблемы переполненности проезжей части улиц крупных городов и мегаполисов личным транспортом является одной из актуальных задач. На данном этапе требуется создание транспортной инфраструктуры, обеспечивающей экономичность строительства и эксплуатации, высокие скорости и экологическую чистоту.

Рост и концентрация населения в крупных городах приводит, с одной стороны, к необходимости уплотнять застройку, отнимая тем самым пространство у транспорта, а с другой – к интенсификации транспортной сети. Основным направлением решения этой проблемы на протяжении последних ста сорока лет было метростроение. Однако это весьма дорогостоящий резерв обеспечения городов транспортной сетью.

Полная изоляция надземной эстакадной путевой структуры от основного транспортного потока, может стать эффективной мерой в решении проблемы. Примеры подобных систем в мировой и отечественной практике известны: поезда на магнитной подушке, канатные дороги, обоснование инвестиционной эффективности которых разработаны для достаточно широкого числа проектов конкретных транспортных сообщений. Для подобных комплексов достаточен отвод земли шириной в обычную пешеходную тропу. Затраты металла, цемента и других важных ресурсов на их создание при этом гораздо ниже, чем на строительство объектов железнодорожного или автомобильного транспорта.

Рассматривая в рамках данной концепции развития транспортной сети выбор ТС, можно заметить, что такими значимыми преимуществами, как независимость от подобного рода загруженности города, высокая скорость движения, экологичность и бесшумность, обладает электрический рельсовый транспорт. Тенденция к замене более быстроходным, а значит и более производительным, уже существующего электрического транспорта сохранится в будущем.

Таким образом, задачей проектирования является создание концепции транспортной системы, сооружаемой над поверхностью земли с учетом диктуемых ростом скорости повышенных требований к прочностным и эксплуатационным характеристикам путевой структуры с применением современных конструкционных материалов. Результатами расчетной части проекта являются выбор двигателей ЭПС на основании требуемой мощности и тяговый расчет с определением скоростей движения и удельного расхода энергии. Полученные параметры необходимы для анализа целесообразности возведения и дальнейшего совершенствования разрабатываемого транспортного комплекса.

## **1. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ**

### **1.1. Анализ имеющихся решений в сфере городского транспорта**

Важную роль в развитии городов играет совершенствование общественного транспорта с целью создания конкуренции частным автомобилям [2].

В настоящее время при проектировании городов все чаще используют систему *Transit Oriented Development (TOD)* — строительство, ориентированное на общественный транспорт. TOD сокращает негативное воздействие на экологию в городах и останавливает от использования автомобилей, негативно влияющих на состояние воздуха. Это вопрос не только индивидуального удобства. От мобильности жителей зависит экономика мегаполиса.

В мировой и отечественной практике подавляющая часть пассажирских и грузовых перевозок осуществляется тепловой и электрической тягой. Электрическая тяга является более современным видом и должна, в конечном счете, полностью заменить тепловую. Отсутствие запасов топлива, малый вес на единицу мощности, централизованное электроснабжение дают электрической тяге ряд преимуществ, в значительной мере перекрывающих все существующие недостатки [3]. В современных условиях альтернативы использования электрической тяге не существует. Исходя из понятия ресурса, можно отметить, что рельсовый транспорт эксплуатируется в 3-4 раза дольше безрельсового, стоящего не намного дешевле, но требующего постоянной технической поддержки. Скорость общественного рельсового транспорта в среднем превышает скорость колёсного (автобусов на 10-20 км/ч) и поэтому такой транспорт конкурирует с частными автомобилями [2].

Инвестиции в жизненно необходимые, доступные городские рельсовые системы дают возможность отказаться от бензиново-нефтяной зависимости и, следовательно,

минимизировать влияние городов на изменение климата. Рельсовый транспорт не только экономит нефть, он помогает реструктурировать город таким образом, чтобы тот снизил потребление нефти и исключил необходимость использования частных автомобилей. Такое изменение приведёт к положительным результатам в будущем.

Общественный транспорт в городах можно разделить на два ключевых вида:

1. Транспорт, движущийся по дорогам общего пользования, не наделенный преимуществами перед частным транспортом: автобусы, маршрутные такси, троллейбусы (за исключением транспорта, маршрут которого проложен по выделенной полосе, отделенной от основного дорожного полотна дорожной разметкой, либо бортовым камнем).

Преимущества:

- относительная дешевизна прокладки и обслуживания маршрута, возможность быстрого изменения маршрута в случае каких-либо обстоятельств (ремонт дороги, пожелания пассажиров и т.д.);
- возможность проложить маршрут в непосредственной близости к зонам проживания и работы горожан.

Основные недостатки:

- усугубляющаяся год от года перегруженность дорожной инфраструктуры крупных городов;
- относительно малая пассажировместимость;
- невозможность в силу дорожных условий точно следовать графику;
- низкие экологические показатели.

2. Транспорт, движущийся по выделенной полосе, полностью отделенной от основного потока. Эти виды транспорта разделяются на подземные (метрополитен, метротрам), наземные (трамваи, электрички), надземные (монорельс, эстакадные трамваи и электрички).

Преимущества:

- независимость от загруженности городских улиц;
- высокая скорость движения;
- большая пассажировместимость;
- регулярность сообщения;
- экологичность (как правило, это электрический транспорт).

Основные недостатки:

- относительно высокая стоимость прокладки путей;
- зависимость прокладки маршрута от ландшафта и существующей инфраструктуры;
- в случае возникновения поломок путей или подвижного состава, останавливается вся ветка.

В силу преимуществ движущегося по выделенной полосе транспорта, проектный выбор делается в пользу именно этого вида. Рассматривая выбор между подземным, наземным и надземным транспортом, отметим, что решение поставленной

проблемы видится в освобождении дорог общего пользования, поэтому наземный вид транспорта как проектное решение не рассматривается.

Строительство метро в мире характеризуется неоправданно большой стоимостью: 1 км пути обойдется более чем в 50 млн. евро, вместе со станциями — 145 млн. евро (4,5-10 млрд. руб.).

Концепции надземных путевых структур напротив все чаще предлагаются во всем мире. Здесь вопрос высокой стоимости прокладки путей решается за счет совершенствования конструкции, а также применения инновационных материалов, направленного на снижение массивности как самой эстакады, так и подвижного состава, обеспечивая при этом более высокие скорости движения.

Можно отметить проект надземной путевой структуры, созданный на основе системы СТЮ. СПбГПХА им. А.Л.Штигица был разработан концепт городского транспортного средства «BIWAY» (рис. 1.1) — это городской общественный транспорт, способный двигаться по струнной эстакаде, используя преимущества выделенной полосы, а так же по дорогам общего пользования, в режиме маршрутного такси [4]. Найдена наиболее оптимальная схема перемещения дорога/эстакада.

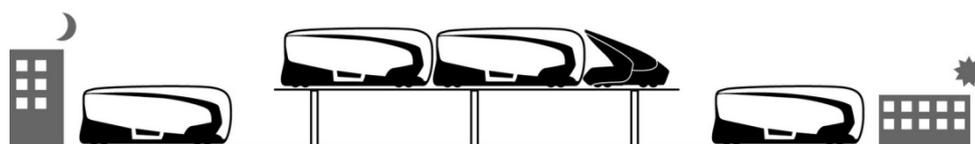


Рисунок 1.1 – Концепт городского транспортного средства «BIWAY»

В результате анализа предлагаемых в отечественной и мировой практике проектов, было принято решение использовать преимущества надземного вида городского пассажирского электрического транспорта и создать транспорт, способный двигаться по выделенной эстакаде.

## 1.2. Анализ конструкции пассажиротрубопровода

История трубопровода насчитывает более 5 тысяч лет. Изначально трубопровод использовался с целью перекачки жидкостей. Дальнейшая эволюция устройства подразумевает возникновение напора [5].

В начале XIX века учёными разрабатывалась идея специальных транспортных труб, в которых бы использовалась энергия воздуха для разного рода перевозок (табл. 1.1).

Идея трубопровод–транспорт–пассажиры/грузоперевозки актуальна на сегодняшний день (табл. 1.2). Одно из преимуществ — свойство трубы экранировать, защищать подвижной состав от внешней среды.

Таблица 1.1 – Примеры трубопроводных транспортных систем.

Период применения	Транспортная система	Принцип действия
Начало XIX века	Атмосферическая дорога	Дорожные рельсы проходят отдельно от трубы, в которой спрятан поршень,двигающий состав; вариант предполагает грузоперевозку
«То же»	Туннельные поезда	Тяговый орган и состав имеют единую колею; для данного типа перевозок использовались тоннели, по которым возили пассажиров.
«То же»	Пневмопочта	Используется для перевозки почтовых отправок как внутри отдельных зданий, так и по городским объектам
70-е г.г.	Пневмоконтейнерная система (США, Япония)	Капсулы опираются колёсами на рельсы, а создание вакуума перед ними толкает их теоретически со скоростью 640 км/ч вперёд по трёхметровой в диаметре трубе
Настоящее время	ТКПС*	Перемещение контейнерных тележек внутри трубопровода под давлением воздуха. ПС — отдельные контейнеры, соединённые друг с другом, оснащённые защитной манжетой. Грузоподъёмность: 4-6 т.

\* — Трубопроводные контейнерные пневмотранспортные системы

Таблица 1.2 – Прототипы разрабатываемой транспортной системы.

Название	FTS (Fast Tube System — англ. «скоростная трубопроводная система») [6], 2002г	ET3 (Evacuated Tube Transport Technologies –англ. «технологии транспортировки по вакуумной трубе») [7], 1980-2000 г.г.
Страна-разработчик	Англия	США
Описание конструкции	Сеть труб с проложенными в них железнодорожными рельсами, n-ое количество станций для приёма пассажиропотока, направляемого по трубам; две трубы для встречных направлений	Трасса состоит из двух труб для движения в двух направлениях.

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3
Электроподвижной состав	ЭПС – транспортная капсула (рисунок 1.3), снабжена системой подачи воздуха	ETT (Evacuated Tube Transport — англ. «вакуумный трубопроводный транспорт»); герметичные капсулы 180-190 кг на магнитной подвеске. Вместимость – 6 пасс.(370кг груза), D=1.3 м, l=4.9 м. Размещены магниты и проводящие обмотки для отклика на поля.
Система управления	Полностью автоматическая, средства управления в капсуле отсутствуют	Полностью автоматическая
Дополнительная информация	Безвоздушное пространство трубы обеспечивает скорость, бесшумность и отсутствие воздушного сопротивления	Системы регенерации воздуха, обеспечивают пассажиров кислородом. Вагоны не касаются стенок, аэродинамическое сопротивление сведено к нулю; затраты на перемещение аппарата в расчёте на 1 кг груза в десятки раз ниже, чем у обычного поезда. Начальная энергия, необходимая для разгона капсулы до высокой скорости, может быть почти полностью возвращена в сеть. Эвакуация: аварийные люки, встроенные в стенки трубы каждые 1,5 км.
Реализация системы	Не нашла реализации	В 2010 г. появилась информация, что идет работа над китайским вариантом ETT. К 2013 г. планируется создать небольшую модель вакуумного поезда, рассчитанную на достижение скорости 600-1000 км/ч, в последующие годы — фактически прообраз рабочего транспортного аппарата, с $V_{max} = 500-600$ км/ч.

### 1.2.1. Расчет и выбор параметров профиля

При оценке пространственного характера работы несущих конструкций эстакад и путепроводов существуют упрощенные методы расчета, реализуемые в некоторых случаях без использования ЭВМ.

На начальном этапе расчета пролетное строение принимается как массивный упругий брус со сплошным или с небольшими пустотами поперечным сечением, размеры которого значительно меньше длин пролетов. Под действием внешних нагрузок пролетное строение изгибается и закручивается, но его поперечные сечения не искривляются [8].

Из теории сопротивления материалов известно, что при решении вопроса о наиболее рациональном проектировании сечения следует стремиться к тому, чтобы при одной и той же площади получить наибольший момент сопротивления и момент инерции. Исследуем три вида сечения на максимальное значение нормального напряжения в поперечном сечении бруса при его изгибе: кольцо, сплошное и сечение прямоугольной коробчатой балки (рис. 1.2). При этом должно соблюдаться равенство их площадей. Каждой из форм поперечного сечения соответствует момент сопротивления сечения при изгибе. Профиль закрепляется на несущих опорах.

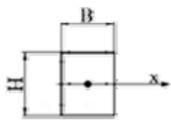
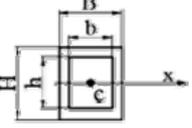
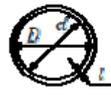
Форма поперечного сечения	Сплошное прямоугольное	Прямоугольное коробчатое	Кольцо
			
Габаритные размеры, мм	$H = 3000$ $B = 7,847$	$H = B = 2357$ $h = b = 2352$	$D = 3000$ $l = 5, d = 2990$
Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	$S = 2,354 \cdot 10^4$		
Момент сопротивления сечения при изгибе, мм <sup>3</sup>	$W = \frac{H^2 B}{6}$ $W = 1,177 \cdot 10^7$	$W = \frac{H^3 (1 - (\frac{h}{H})^4)}{6}$ $W = 1,846 \cdot 10^7$	$W = \frac{\pi \cdot D^3 (1 - (\frac{d}{D})^4)}{32}$ $W = 3,517 \cdot 10^7$
Макс. значение нормального напряжения в поперечном сечении, МПа	$\sigma_{max} = 25,002$	$\sigma_{max} = 15,947$	$\sigma_{max} = 8,369$

Рисунок 1.2 – Прочностная характеристика поперечных сечений балки

Таким образом, стремление при одной и той же площади получить наибольший момент сопротивления ведет к размещению большей части материала дальше от нейтральной оси. Этому условию в большей степени соответствуют конструкции, имеющие в поперечном сечении форму окружности, что подтверждается расчетами.

Для расчета пролетных строений применение также находит метод конечных элементов (МКЭ). Эффективность метода связана с возможностью наиболее просто учитывать особенности прикладываемых нагрузок, а также форму рассчитываемых конструкций [8].

Основная концепция метода заключается в дискретизации рассчитываемой конструкции, которая расчленяется на некоторое число элементов конечных размеров, деформированное состояние которых является простым. Дискретизация конструкции производится с учетом равенства энергий заданной системы и ее заменяющей модели. В зависимости от требуемой точности применяются три типа аппроксимации заданной системы: стержневая, двухмерными и трехмерными элементами. Связь между конечными элементами предполагается только в узловых точках, перемещения которых принимаются за основные неизвестные. Далее осуществляется построение матрицы жесткого конечного элемента и приведение заданной нагрузки к узловой для каждого элемента. В результате определяют функцию перемещений по всей области системы конечных элементов, а по ней — напряжения и деформации в интересующих местах конструкции, как показано на рисунке 1.3.

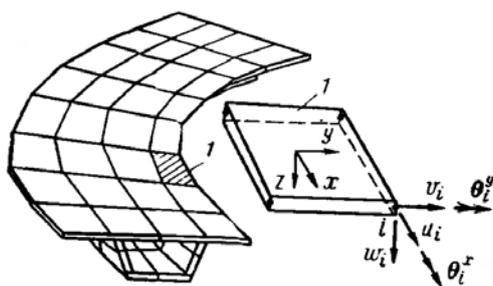


Рисунок 1.3 – Аппроксимация пролетного строения конечными элементами  
(1 – конечный элемент тонкой оболочки)

Подобный расчет по МКЭ может быть проведен с применением систем компьютерной математики АРМ FEM. Форма трубопровода с внешним диаметром 2 м позволяет обеспечить требуемую жесткость для движения транспортного средства массой 3 тонны при установке опор, поддерживающих «пассажира-трубопровод» с шагом 12м. Результаты приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты статического расчета (рисунок 1.4 и 1.5)

Наименование/ значение	Минимальное	Максимальное
Эквивалентное напряжение по Мизесу, SVM, [МПа]	0,142055	3,659527
Суммарное линейное перемещение, USUM [мм]	0	0,178044

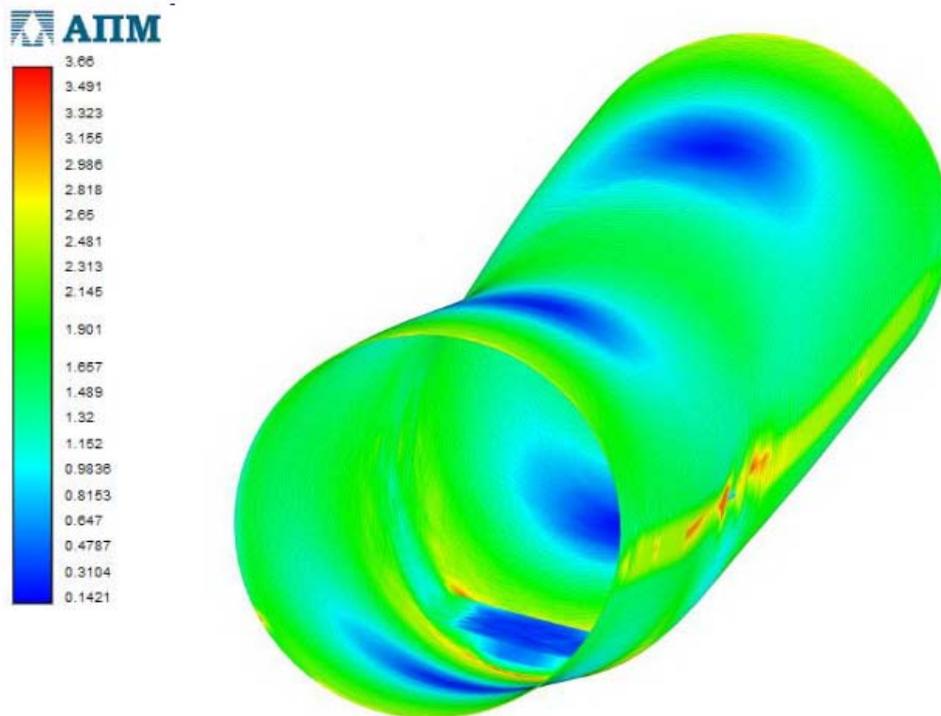


Рисунок 1.4 – Картина распределения напряжений в модели пассажиротрубопровода

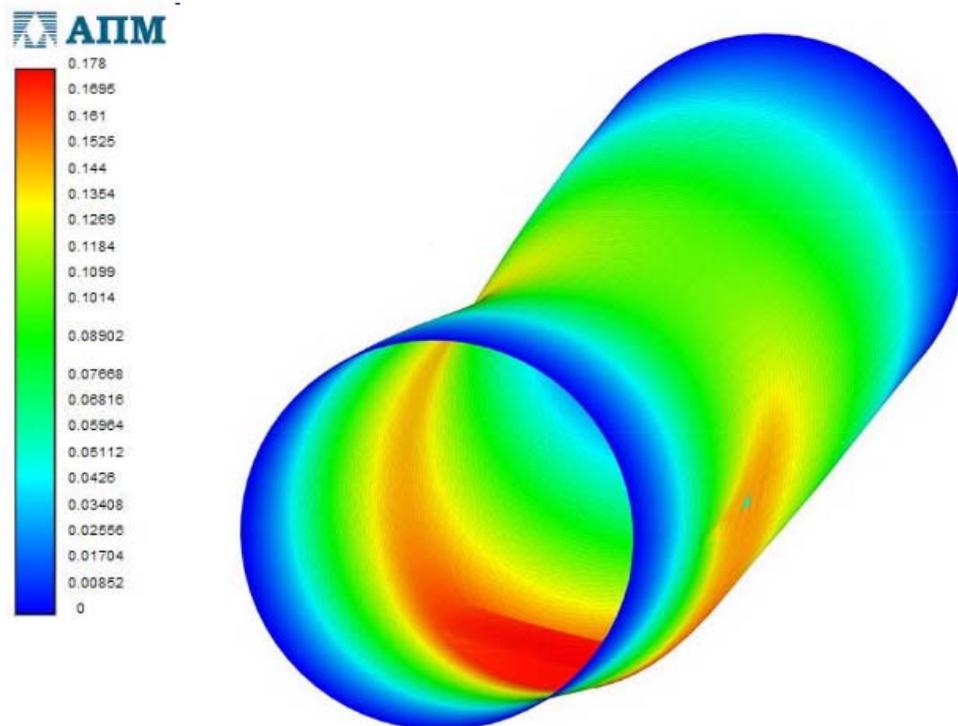


Рисунок 1.5 – Картина линейных перемещений модели пассажиротрубопровода под нагрузкой

### **1.2.2. Обзор конструкционных материалов**

Традиционное понимание эстакады сводится к представлению о следующей конструкции: установленные на фундамент металлические и железобетонные опоры с уложенными на них железобетонными балками, поддерживающими верхнее строение пути. Преимущества железобетонных изделий:

- долговечность. Отличаются исключительной долговечностью благодаря надежной сохранности арматуры, заключенной в бетон. Обладают высокими показателями сопротивления атмосферным воздействиям, что важно при строительстве открытых инженерных сооружений (эстакады, трубы, мосты).
- пожаростойкость. Конструкции обладают высокой огнестойкостью. Защитный слой бетона толщиной 1,5–2 см достаточен для обеспечения огнестойкости железобетонных конструкций при пожарах.
- сейсмостойкость. Благодаря монолитности жесткости отличаются весьма высокой сейсмостойкостью.
- высокие эксплуатационные качества. Железобетону легко могут быть приданы любые целесообразные конструктивные и архитектурные формы.

К недостаткам железобетонных конструкций можно отнести: относительно большой собственный вес, высокую тепло- и звукопроводность, возможность появления трещин до приложения эксплуатационной нагрузки (от усадки и собственных напряжений в железобетоне по технологическим причинам), а также от действия внешних нагрузок из-за низкого сопротивления бетона растяжению. Иногда дополнительно требуется обеспечить водонепроницаемость, водостойкость, морозостойкость, повышенную огнестойкость и коррозионную стойкость, малую массу, низкую тепло- и звукопроводность.

Проанализировав подобную систему, заметим, что, за счет массивности железобетонной конструкции, сложности производства работ при изготовлении предварительно напряженных конструкций, необходимости систематического контроля над правильностью расположения арматуры, недостатками оказываются техническая сложность и, в конечном счете, достаточно высокая стоимость подобного решения.

В связи с дальнейшим прогрессом науки, следует ожидать появления новых решений в области мостостроительной техники. Интересное суждение было высказано в работе А. Дитца [9]: «Наука и техника имеют подобно литературе и искусству свои модные фразы и ходовые выражения. Одним из самых модных в наше время является выражение «композиционные материалы», содержащее в новой форме очень старую и простую мысль о том, что совместная работа разнородных материалов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого и количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих».

В технике и строительстве усиленно исследуются так называемые волокнистые композиционные материалы, сочетающие пластичную матрицу и высокопрочные

волокна. Эти композиции, в частности стеклопластик, считаются наиболее перспективными, так как путем использования нитевидных волокон и направленного армирования возникает возможность получения материалов, отвечающих заданным, в случае проектирования пассажиротрубопровода, повышенным требованиям к надежности и минимизации веса полученной конструкции. В последнем традиционные железобетонные эстакады значительно уступают.

Исследования механических свойств стеклопластиков — композиций на основе армирующего стеклонаполнителя в виде ориентированных стеклянных нитей и различных связующих (синтетических смол) — как конструкционного материала показывают, что они обладают относительно высоким удельным сопротивлением разрыву, пониженной (по сравнению с металлами) чувствительностью к концентрации напряжений при действии переменных напряжений, малым разрывным удлинением и высокими демпфирующими свойствами [10]. Результаты исследований конструкционной прочности стеклопластиков, проведенных в Институте машиноведения АН СССР, и ряд других работ в этой области позволяют охарактеризовать *стеклопластики как материал, пригодный для изготовления напряженных деталей.*

### 1.3. Описание параметров транспортного средства

Габаритные размеры и характеристики разрабатываемого транспортного средства принимаем исходя из размеров пассажиротрубопровода (рис. 1.6, рис. 1.7, табл. 1.4) и принятой массы транспортного средства ( $m=5т$ ), изменяя размеры трамвайного вагона до приемлемых. Так как ПЕ – рельсовый транспорт, то конструкцией трубопровода предусмотрена площадка для рельсового полотна.

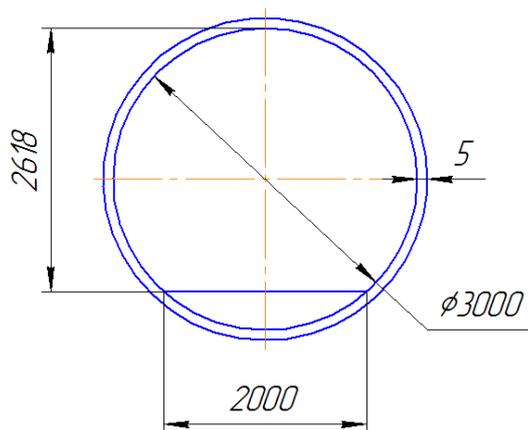


Рисунок 1.6 – Размеры пассажиротрубопровода

За основу проекта принята эстакада по форме трубы. Применение подобных профилей, значительно увеличивает несущую способность разрабатываемого объекта,

что дает возможность увеличить расстояние между опорами, одновременно сокращается вес конструкции, как следствие, улучшаются стоимостные показатели.

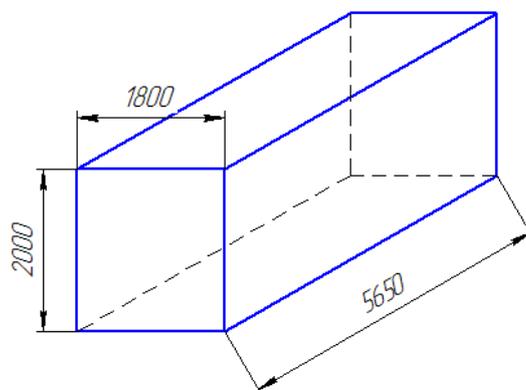


Рисунок 1.7 – Габаритные размеры транспортного средства

Таблица 1.4 — Характеристика электроподвижного состава.

Характеристика	Трамвай	Разрабатываемая ПЕ
Пассажировместимость, чел	135	22
Масса ТС, кг	19600	3350
Полная масса, кг	29725	5000
Высота, мм	3100	2000
Ширина, мм	2600	1800
Длина, мм	15000	5650
Диаметр колеса, мм	710	710
Максим. скорость, км/ч	75	90
Число двигателей	4	4
U на токоприемнике, В	550	550

В результате аналитического расчета было установлено, что форма пассажиротрубопровода с внутренним диаметром 3 м и толщиной стенки 5 мм позволяет обеспечить требуемую жесткость для движения транспортного средства при установке опор, поддерживающих его с шагом 24 м.

## 2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аналитический расчет показал, что мощность одного двигателя составляет  $P_{дв} = 11 \text{ кВт}$ . Это обеспечивает  $V_n = 16,92 \text{ км/ч}$ . Дальнейшее увеличение скорости поезда осуществляем за счет ослабления поля.

## 2.1. Расчет и построение кривых движения

Расчет и построение кривых движения производится на основании тяговых характеристик подвижного состава.

ГОСТ 8802-78 оговаривает технические условия эксплуатации трамвайных вагонов на условном маршруте с эквивалентным подъемом 0,003 и среднем расстоянии между пунктами 350м, длительности стоянки 10с и 10% запасе времени на разгон. Кривые движения поезда  $V(l)$ ,  $V(t)$  и  $t(l)$  строятся для обоих направлений движения. В прямом направлении графическим методом по реальному профилю строятся зависимости  $V(l)$  и  $t(l)$ , в обратном направлении расчетно-графическим способом по эквивалентному уклону строятся зависимости  $V(t)$  и  $V(l)$ . Полученные данные о движении поезда приведены в таблице 2.1. Кривые движения приведены в Приложении 1.

Таблица 2.1 – Данные о движении поезда.

Направление движения	$T_x, c$	$V_x, км/ч$	$a_n, м/с^2$	$a_r, м/с^2$
Прямое	31,8	39,5	1,66	1,6
Обратное	34,5	36,5	1,64	1,5

## 2.2. Определение расхода энергии на движение поезда

Одновременно с построением кривых  $V(t)$  строим кривые тока поезда  $I(t)$ , для чего используем полученные в работе кривые тока поезда в зависимости от скорости движения  $V(l)$  при тяге.

Результаты показали, что в прямом направлении время хода  $T_x$  составляет 31,8 с, ходовая скорость  $V_x=39,5$  км/ч, пусковое ускорение  $a_n=1,66$  м/с<sup>2</sup>, тормозное замедление  $a_r=1,6$  м/с<sup>2</sup>. Кривые движения в обратном направлении, рассчитанные графо-аналитическим методом, показывают, что время хода  $T_x=34,5$  с, ходовая скорость  $V_x=36,5$  км/ч, пусковое ускорение  $a_n=1,64$  м/с<sup>2</sup>, тормозное замедление  $a_r=1,5$  м/с<sup>2</sup>.

Сравнительная характеристика общих удельных расходов энергии приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Данные по расходам энергии поездами,  $\frac{Вт \cdot ч}{т \cdot км}$ .

Разрабатываемое ТС	Трамвай	Троллейбус	Метрополитен	ЭЖД
77,5 ... 78,2	80...110	140...170	35...45	45...60

## ВЫВОДЫ

1. В результате ретроспективного анализа автором установлено, что эффективным техническим решением устранения проблемы переполненности улиц мегаполисов является надземная эстакада.
2. Определен оптимальный вариант конструкции надземной путевой структуры – форма трубопровода, произведены прочностные аналитический и расчет с применением имитационных методов FEM, подтверждающие корректность выбранной формы.
3. Построена имитационная модель надземной эстакады трубопроводного типа, исследованы её механические свойства методом конечных элементов.
4. Разработано транспортное средство и определены его массогабаритные показатели в соответствии с принятыми параметрами конструкции путевой структуры.
5. Произведен тягово-энергетический расчет с построением кривых движения расчетно-графическим способом.
6. Проведен анализ полученных результатов удельного расхода энергии на движение ТС.
7. Определено направление дальнейшего исследования. Внимание направлено на повышение энергоэффективности транспортных комплексов путем совершенствования продольного профиля пути и применение полученных знаний в использовании технологии подземно-надземного перемещения вагонов по рельсовым путям, проложенным в горизонтальной и наклонной плоскостях, для модернизации трубного пассажирского транспортного комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Пачаури, Р. К., Райзингер, А., и основная группа авторов (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 стр.
2. Ньюман, П. WakeUp! Живая планета нуждается в помощи: Города будущего. Ч.7. – Режим доступа: <http://www.wakeup.ru/articles/18/130/>
3. Щуров Н.И. Теория электрической тяги [Текст] / Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 100 с.
4. Концепт городского транспортного средства BIWAY. – Режим доступа: <http://biwayconcept.blogspot.com/2010/02/biway.html>
5. Транспортная компания «Транспорт-Русь» / Информационная статья. Трубопровод тоже транспорт. – Режим доступа: <http://transportda.ru/article37.html#top>
6. Скоростной пассажирский трубопровод / Информационная статья. – Режим доступа: <http://transportda.ru/article37.html#top> по материалам: <http://membrana.ru/>
7. Evacuated Tube Transport Technologies: et3 Network: Space Travel on Earth. — Режим доступа: <http://et3.com/>

8. Гибшман М. Е., Попов В. И. Проектирование транспортных сооружений: Учебник для вузов. — 2-е изд., М.: Транспорт, 1988. 447 с.
9. Deitz A. Intern. Sei. Tech. 58, 1964
10. Серенсен С.В. Прочность материалов и элементов конструкций при статическом нагружении. Избр. Тр.: В 3-х т. Т.1, Киев, Наук. Думка, 1985

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

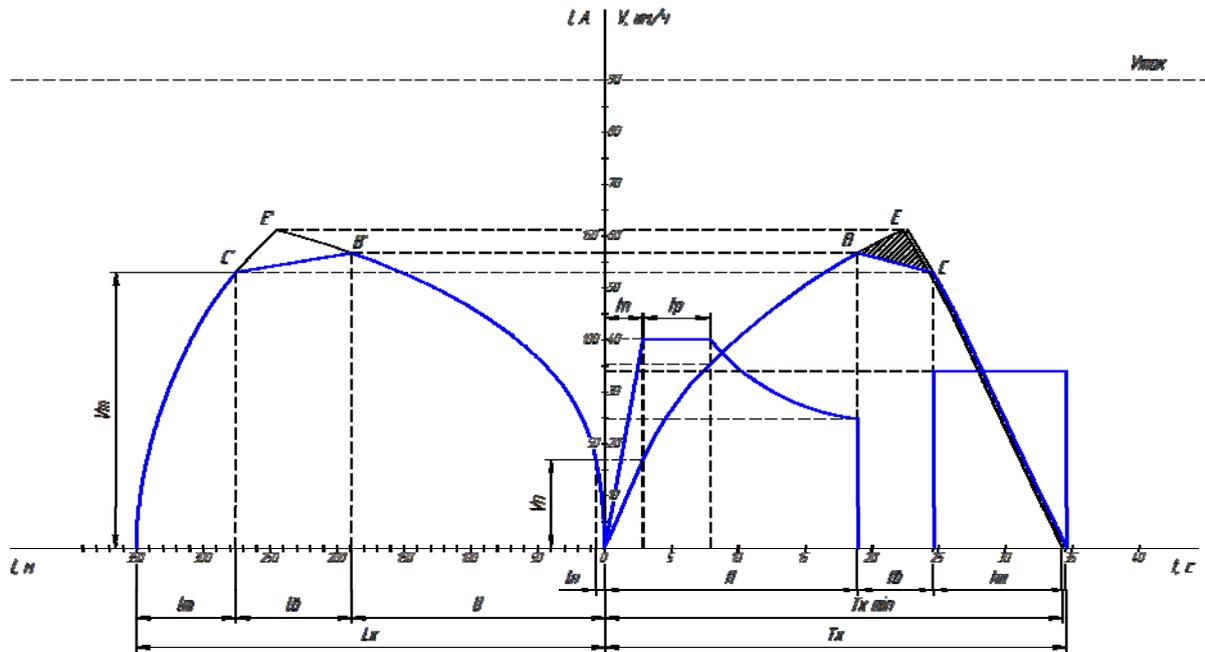


Рисунок П.1 – Кривые движения поезда  $V(t)$ ,  $V(l)$ ;  
кривые потребления тока двигателем  $I(t)$

П.И. Вайнмастер (студент, курс 1М)  
Новосибирский государственный технический университет  
Научный руководитель – Е.В. Рабинович, д.т.н., проф. кафедры Вычислительной  
техники, НГТУ

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ ПЛАСТА

### Реферат

*Ключевые слова:* гидравлический разрыв пласта (ГРП), сейсмические события, пространственная фильтрация, кластерный анализ, иерархическая кластеризация, оптимальное число кластеров, модель трещины ГРП, MATLAB.

Цель работы: разработка алгоритма и программного комплекса, позволяющих производить пространственную фильтрацию сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта, а также визуализацию модели трещины ГРП.

В работе рассмотрен процесс формирования трещины в ходе гидравлического разрыва пласта, сформулирована задача фильтрации сейсмических данных для построения аутентичной модели трещины ГРП. Рассмотрены возможные подходы к анализу данных, проведен обзор методов кластерного анализа. Выбраны инструментальные средства разработки, проведены разработка и тестирование алгоритма пространственной фильтрации.

Реализован программный комплекс, позволяющий производить фильтрацию сейсмических событий и визуализацию модели трещины, возникающей в процессе ГРП.

### Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) — один из эффективных и распространенных методов интенсификации добычи нефти при разработке низкопроницаемых зон и пропластков. Данный метод заключается в создании высокопроводимой трещины (или системы трещин) в целевом пласте для обеспечения притока добываемого флюида из продуктивной части пласта к забою скважины.

Определение геометрии трещины, возникающей при ГРП, является сегодня одной из сложных и актуальных задач. Так, знание геометрии трещины позволяет определить изменение продуктивности скважины и результаты воздействия на геологическую среду. В связи с этим, в последние годы все большее развитие получают системы сейсмического мониторинга.

Основные задачи, решаемые подобными системами – сбор данных о трещине, их обработка и интерпретация полученных результатов. И если в области сбора данных

в настоящее время получены вполне приемлемые результаты, то наиболее остро по-прежнему стоит вопрос обработки сейсмических данных.

Обработка данных, полученных в ходе гидравлического разрыва пласта, необходима, поскольку не все зарегистрированные сейсмические события принадлежат процессу формирования трещины. Связано это с тем, что сейсмодатчики подвержены воздействию естественных случайных шумов и помех, вызванных производимыми работами.

В настоящее время реализовано множество алгоритмов обработки сейсмических событий, и работы в данной области ведутся непрерывно. Многие из них реализуют фильтрацию, оставляя из множества «сырых» исходных данных только «полезные». Тем не менее, в большинстве случаев геометрия трещин ГРП, рассчитанная на основе полученных после фильтрации данных, отличается от фактической. В свою очередь, это сильно отражается на проектировании систем поддержания пластового давления и дальнейшей работе со скважиной.

Таким образом, проблема выделения микросейсмических данных на фоне шумов и помех является сегодня достаточно актуальной. Возникает потребность в увеличении точности построений, а, следовательно, и разработке новых алгоритмов фильтрации сейсмических событий.

В рамках данной работы разрабатывается система, реализующая описанные выше этапы обработки и интерпретации сейсмических данных.

Одним из направлений в области обработки сейсмических событий является пространственная фильтрация. Необходимо разработать алгоритм, реализующий данный тип фильтрации, а также модуль визуализации модели трещины ГРП.

## **1. Постановка задачи**

### ***1.1. Цель работы***

Для того чтобы использование методов интенсификации добычи нефти приносило экономическую рентабельность, необходимо составить правильный план мероприятий по работе со скважиной. В свою очередь, составление подобного плана требует от специалистов знания геометрии раскрывшейся в процессе ГРП трещины.

Целью данной работы является разработка алгоритма и программного комплекса, позволяющего производить пространственную фильтрацию сейсмических событий и визуализацию модели трещины ГРП.

### ***1.2. Задачи, подлежащие решению***

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть предметную область и определить возможные подходы к пространственной фильтрации;

- проанализировать исходные данные: определить их структуру и характеристики;
- разработать алгоритм пространственной фильтрации;
- разработать приложение для визуализации модели трещины на основе результатов фильтрации, а также реализовать удобный пользовательский интерфейс.

### ***1.3. Инструментальные средства разработки***

В качестве среды разработки решено было выбрать пакет MATLAB, включающий одноименный язык программирования, как наиболее современную и мощную вычислительную систему.

MATLAB – это программный продукт компании «The MathWorks, Inc.», предназначенный для инженерных, научных и прикладных вычислений, а также визуализации и анализа их результатов.

Данный продукт включает большое количество основанных на матрицах структур данных, широкий спектр функций анализа данных, а также удобные средства для разработки алгоритмов. Актуальным является и тот факт, что в составе пакета имеется большое число функций для построения графиков, что позволит в дальнейшем реализовать визуализацию разработанных моделей трещин ГРП.

## **2. Описание предметной области**

### ***2.1. Введение в предметную область***

Одной из важных проблем, связанных с внедрением технологии гидравлического разрыва пласта, является определение геометрии трещин, возникающих при ГРП. Во-первых, подобная информация необходима для проектирования систем поддержания пластового давления. Во-вторых, необходимо изучать результаты воздействия ГРП на геологическую среду. Наконец, модель трещины позволяет оценить продуктивность пласта и сделать выводы относительно рентабельности добычи в данной скважине.

Считается, что рост трещины происходит непосредственно во время операций по ГРП и сопровождается излучением сейсмических волн, связанных с раскрытием трещины. Для регистрации этих волн служат сейсмоприемники, которые, в свою очередь, передают записанные сейсмограммы на многоканальную сеймостанцию. По завершении ГРП сейсмограммы обрабатываются и определяются точки рассматриваемого пласта, в которых были зафиксированы резкие колебания амплитуды и другие аномалии. Полученные данные передаются на обработку, в результате которой и должна быть определена геометрия трещины ГРП.

Зарубежные и отечественные компании, а также научные институты, ведут многочисленные исследования в данном направлении, в которых инженерная интуиция все чаще вытесняется математическим моделированием с применением ЭВМ. Используются различные способы фильтрации и выделения микросейсмических данных, «ответственных» за образование трещин, на фоне шумов и помех. Тем не менее, в большинстве случаев эти методы не позволяют получить модель трещины, близкую к фактической [1].

Одним из методов обработки сейсмических данных является пространственная фильтрация. Данный тип фильтрации учитывает только пространственные характеристики точек внутри рассматриваемого пласта, зафиксированных сейсмоприемниками. К таким характеристикам относятся координаты расположения точек ( $X, Y, Z$ ), а также энергетическая характеристика точек – амплитуда ( $A$ ).

Суть пространственной фильтрации заключается в выделении естественных «сгустков» («гроздей», групп) точек и определении в каждом из них «ключевых» точек, необходимых для построения модели трещины. Кроме того, каждый из таких «сгустков» может быть интерпретирован как одиночная трещина, а все они образуют единую систему, образовавшуюся в процессе ГРП.

Формально задачу пространственной фильтрации можно описать следующим образом. Имея множество точек в ограниченной области, нам нужно выявить закономерности в наборе, попытаться произвести классификацию, основываясь на расположении точек внутри пласта. Необходимо также ответить на вопрос: имеет ли место одна трещина, либо целая система трещин?

Для решения поставленной задачи решено воспользоваться методами иерархического кластерного анализа. Во-первых, множество точек внутри пласта нам необходимо разбить на группы по их пространственному расположению (мера похожести). Во-вторых, количество групп для разбиения заранее неизвестно и, по сути, эквивалентно количеству трещин, возникших при ГРП.

## ***2.2. Иерархические методы кластерного анализа***

Принцип работы иерархических алгоритмов состоит в последовательном объединении (разделении) групп элементов, т.е. в создании иерархической структуры классов. В зависимости от того, выполняется объединение или разбиение групп, выделяют агломеративные и дивизионные иерархические алгоритмы [5].

Агломеративные алгоритмы реализуют стратегию «снизу вверх». В начале работы подобных алгоритмов все объекты являются отдельными кластерами. На первом шаге наиболее похожие объекты объединяются в кластер. На последующих шагах объединение продолжается до тех пор, пока все объекты не будут составлять один кластер.

Дивизионные методы являются логической противоположностью агломеративным. В начале работы алгоритма все объекты принадлежат одному

кластеру, который на последующих шагах делится на меньшие кластеры. В результате образуется последовательность расщепляющих групп.

Последовательность объединения (разделения) кластеров представляется в виде дендрограммы – древовидной диаграммы, содержащей  $n$  уровней, каждый из которых соответствует одному из шагов процесса иерархической кластеризации.

Пример дендрограммы для описанных выше групп методов представлен на рисунке 2.1.

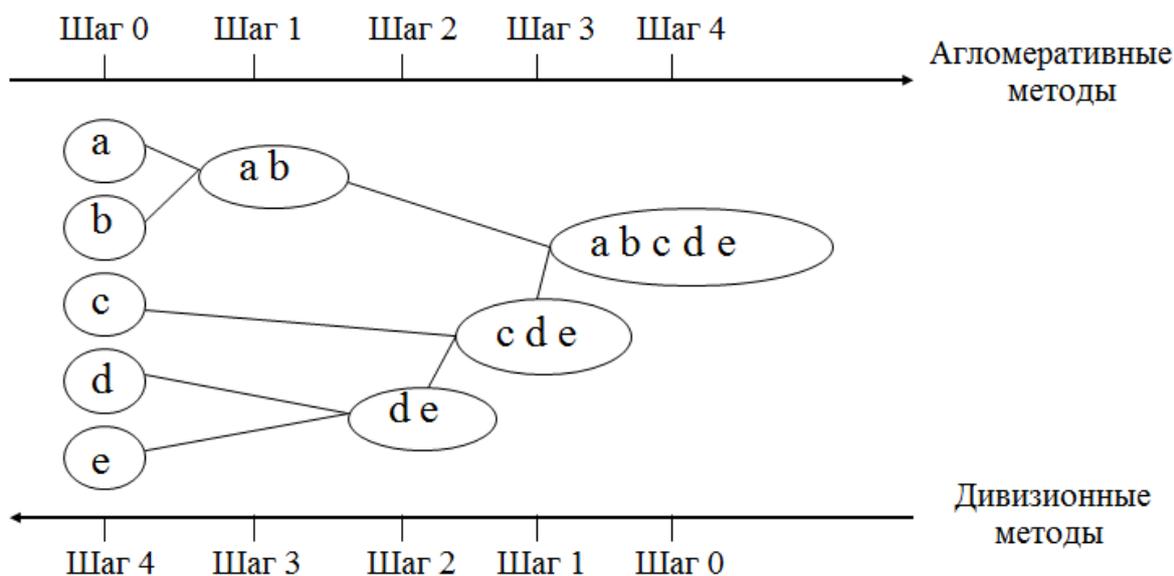


Рисунок 2.1 – Пример дендрограммы агломеративных и дивизионных методов

Удобство иерархических методов заключается в том, что на основе построенного дерева кластеров можно выбрать разбиение требуемой точности, используя в качестве критерия максимальное расстояние между кластерами.

К особенностям методов иерархической кластеризации относят проблему определения оптимального числа кластеров [6].

Данный вопрос будет рассмотрен более подробно при разработке алгоритма пространственной фильтрации, в разделе 4.

### 3. Описание исходных данных к работе

В качестве исходных данных к работе используется набор сейсмограмм для точек наблюдения за гидравлическим разрывом пласта.

Сейсмограмма (сейсмическая трасса) представляет собой запись сейсмических колебаний, зарегистрированных сейсмоприемником на поверхности рельефа при неизменном положении источника колебаний. Она представляет зависимость амплитуды колебания от времени.

Рассмотрим кратко процесс гидравлического разрыва пласта.

С помощью мощных насосных станций выполняется закачка в скважину жидкости разрыва (гель, вода либо кислота) при давлениях выше давления разрыва нефтеносного пласта. По стволу скважины жидкость проникает в область забоя, т.е. поверхность горных пород на максимальной глубине, до которой в настоящий момент скважина пробурена. В результате создаваемого давления происходит раскрытие трещин, распространяющихся от центра забоя к его краям. Для того чтобы вновь образованные трещины остались раскрытыми после снятия давления, в скважину закачивают специальный расклинивающий агент – проппант.

При проведении ГРП множество сейсмоприемников регистрируют колебания множества точек пласта, излучающих сейсмические волны. Запись сигналов производится за несколько минут до начала операций ГРП, во время непосредственного разрыва, и в течение нескольких минут после него. Сейсмические сигналы фиксируются многоканальной сеймостанцией.

На основании сейсмограмм восстанавливаются координаты «точек» внутри пласта, являющихся источниками микросейсмических колебаний. Среди множества точек нам необходимо выбрать те, которые с большой долей вероятности приняли участие в процессе формирования трещины ГРП. Для этого исходные данные нужно подвергнуть обработке.

Среди всех точек рассматриваемого пласта выбираются те, сейсмограммы которых содержат резкие колебания амплитуды, превышающие заданный порог. Наличие подобного «максимума» в сейсмограмме позволяет предположить, что данная точка – одна из «ответственных» за образование трещины ГРП. Стоит отметить, что предварительно сейсмограммы могут пройти также дополнительную обработку (например, частотно-временную фильтрацию).

В результате обработки исходных данных будет получен набор точек, на основании которых имеет смысл проводить пространственную фильтрацию – выделение кластеров и построение модели трещины ГРП. Каждая из таких точек будет иметь следующие характеристики:

- координата  $X$  относительно некоторого центра координат внутри пласта;
- координата  $Y$ ;
- координата  $Z$  (в данном случае – глубина, на которой расположена точка,  $H$ );
- максимальная амплитуда  $A$ , определенная по сейсмограмме данной точки;
- момент времени  $T$ , в который было зафиксировано данное значение амплитуды.

Таким образом, в качестве исходного материала для непосредственного выполнения пространственной фильтрации служит совокупность точек рассматриваемого пласта, имеющих характеристики  $(X, Y, H, A, T)$ .

Важно отметить, что наиболее сложным представляется определение геометрии трещин вокруг ствола скважины в непосредственной близости забоя, т.к. именно здесь располагается центр разлома. В связи с этим решено не учитывать точки, находящиеся в данной области, в ходе пространственной фильтрации.

Итак, пространственная фильтрация будет проведена на основе набора точек, представленных координатами  $(X, Y, Z)$ , а также имеющих характеристики в виде амплитуды  $A$ , зафиксированной на сейсмограмме, и момента времени  $T$ , в который данная амплитуда зафиксирована.

На основании анализа характеристик точек принято решение производить кластеризацию точек на основании параметров  $(X, Y, Z)$ , а параметр  $A$  использовать для определения толщины трещин ГРП как энергетическую характеристику. Параметр  $T$  при проведении пространственной фильтрации решено не использовать.

#### **4. Разработка алгоритма пространственной фильтрации сейсмических событий**

##### ***4.1. Общее описание разрабатываемого алгоритма***

Ключевым моментом разрабатываемого алгоритма является выделение групп точек пласта, представляющих собой образованные в процессе ГРП трещины. Для реализации данной задачи было решено использовать методы иерархического кластерного анализа. Теперь необходимо определить условия, в которых следует применять описанные методы.

Наиболее очевидным вариантом представляется выделение кластеров среди всей области точек ГРП, т.е. среди всей выборки исходных данных. Однако этот подход имеет несколько серьезных недостатков. Самым главным из них является тот факт, что при больших объемах исходных данных, когда рассматривается довольно большая область вокруг забоя скважины и точки прилегают друг к другу достаточно плотно, выделить четкие кластеры среди них будет нелегко.

При этом возникает сопутствующий вопрос, заключающийся в трудности визуализации подобных кластеров в виде трещин нефтеносного пласта. Причина тому – слишком большое число точек внутри кластеров. В нашем случае результат пространственной фильтрации должен дать четкое представление о геометрии трещины, о ее форме, поэтому визуализация результатов должна быть наглядной.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы. Во-первых, разрабатываемый алгоритм должен принимать во внимание все точки при разбиении области на кластеры. Во-вторых, для визуализации модели трещины число точек в кластерах требуется уменьшить, оставив только «ключевые».

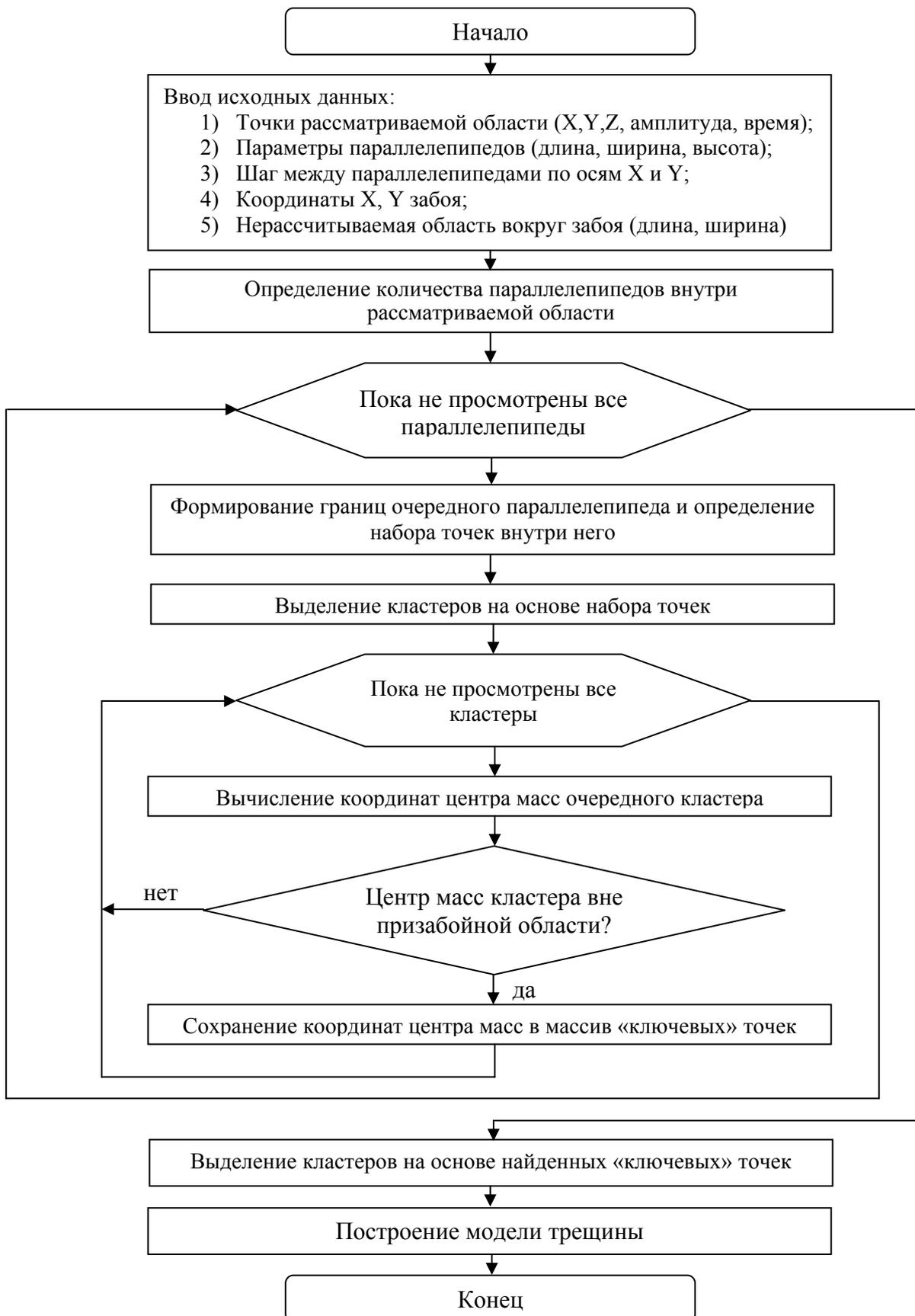


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма пространственной фильтрации

Одним из вариантов решения подобной проблемы является разбиение исходной области пласта на множество областей меньшего размера и выделение кластеров внутри каждой из них. При этом внутри каждой такой области имеет смысл сохранять только центры масс выделенных кластеров, не учитывая в дальнейшем исходные точки. На основе подобной информации можно будет построить наглядную модель, произведя повторную кластеризацию (на этот раз для всей области целиком), но используя в качестве исходных данных найденные в ходе предыдущего шага «ключевые» точки.

В первую очередь опишем, каким образом производится разбиение исходной области.

Было решено разделить область на одинаковые параллелепипеды, имеющие фиксированные параметры – длину, ширину и высоту. Выделение кластеров и расчет «ключевых» точек (центров масс кластеров) будут выполняться в каждом из них независимо друг от друга. Для обеспечения гибкости построения окончательных кластеров решено определить такие параметры, как шаг между параллелепипедами по оси X (по длине пласта) и шаг по оси Y (по ширине). Таким образом, параллелепипеды могут как находиться друг от друга на заданном расстоянии, не охватывая некоторые участки исходной области, так и накладываться друг на друга. Логично, что во втором случае количество «ключевых» точек по завершении просмотра всех параллелепипедов будет больше (будет больше и число самих параллелепипедов).

При проведении окончательной кластеризации, когда «ключевые» точки уже определены, необходимо выбрать призабойную область, точки которой не будут учитываться при дальнейших построениях. О необходимости выделения такой зоны уже было сказано в разделе 3. Определив параметры (длину и ширину) области вокруг забоя, можно переходить к завершающему этапу, выделяя окончательные кластеры и строя модель трещины.

Блок-схема описанного алгоритма приведена на рисунке 4.1.

Методы иерархической кластеризации будут применяться как при выделении кластеров внутри параллелепипедов, так и на окончательном этапе, при определении геометрии трещин. Наиболее важные вопросы, сопутствующие иерархической кластеризации, – выбор метрик для вычисления расстояний между объектами и расстояний между кластерами, а также вопрос определения оптимального числа кластеров на основе построенного разбиения.

## ***4.2. Способы определения оптимального количества кластеров***

### **4.2.1. Подход с использованием «жизненных циклов»**

Одним из распространенных подходов к определению оптимального числа кластеров является метод, основанный на вычислении «жизненных циклов» («lifetimes») кластеров [8].

Представим, что некоторый кластер был создан объединением двух объектов, находящихся на расстоянии  $d1$  друг от друга. Следующий кластер был создан на основе объектов, имеющих между собой дистанцию  $d2$ , большую, чем  $d1$ , но при этом минимальную среди остальных дистанций. Тогда «жизненным циклом» первого кластера называют величину, равную  $(d2-d1)$ .

Суть метода заключается в нахождении на иерархическом дереве кластеров максимального «жизненного цикла». Количество кластеров, существующих одновременно в течение него, и является оптимальным. При этом величиной порога для «среза» кластерного дерева может быть любое значение из найденного «жизненного цикла».

Пример дендрограммы с указанием «жизненных циклов» некоторых кластеров приведен на рисунке 4.2. На рисунке 4.3 представлен результат кластеризации.

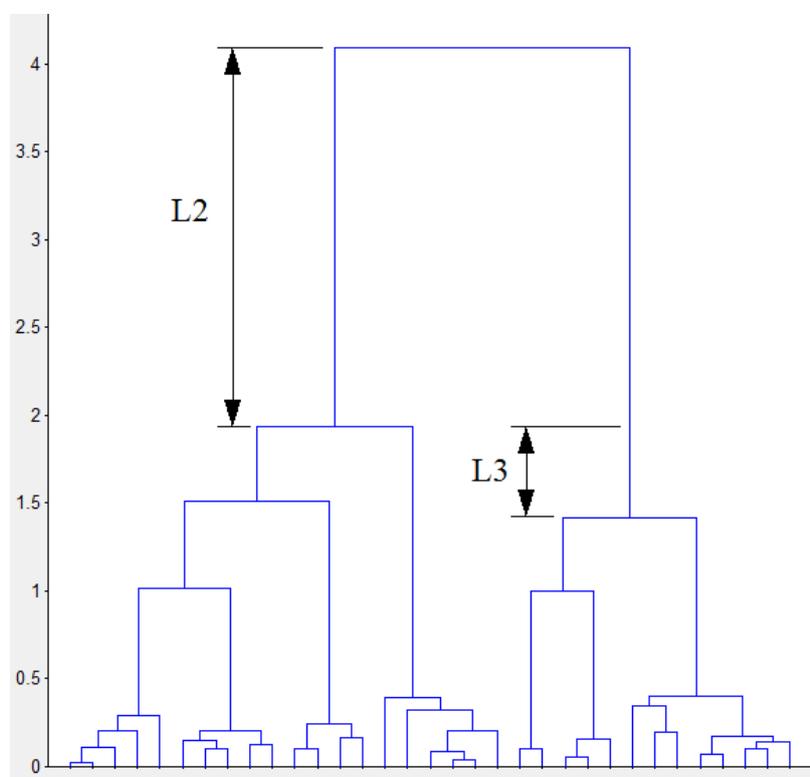


Рисунок 4.2 – Пример дендрограммы с указанием «жизненных циклов» некоторых кластеров

Из рисунка 4.2 видно, что наибольший жизненный цикл имеет кластер, образованный вблизи отметки «2». Данный «lifetime» обозначен как L2, поскольку в течение данного жизненного цикла имеет место наличие двух кластеров.

В качестве порога логично взять середину «жизненного цикла», хотя в принципе можно взять и любое другое значение. Таким образом, оптимальным количеством кластеров в данном случае является число 2.

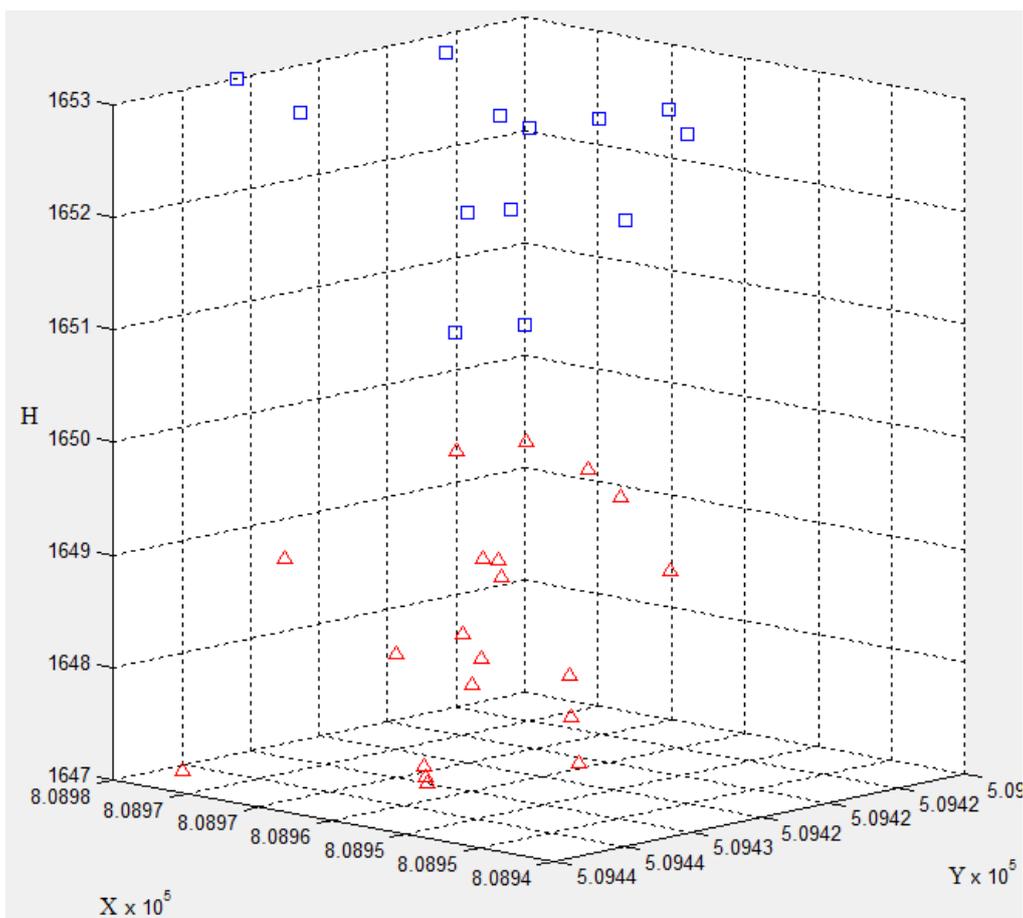


Рисунок 4.3 – Результат кластеризации с использованием метода «жизненных циклов»

Данный метод прост в реализации, однако он порождает следующий вопрос: невозможно определить «жизненный цикл» самого крупного кластера. Ведь существует вариант, что разбивать исходную область на кластеры не следует вовсе, определив все точки в один кластер?

Отчасти решением данной проблемы является введение некоторой величины, которая бы определяла, выполнить разбиение в данном конкретном случае или нет. Такой величиной может быть, например, половина высоты кластерного дерева. Если максимальный «жизненный цикл», найденный на дендрограмме, превышает это значение, то принимается решение о разбиении. В противном случае разбиение не производится.

#### 4.2.2. Подход, основанный на определении неоднородности между связями

Данный подход использует в качестве исходных данных не высоты кластерного дерева, а значения коэффициента неоднородности.

Как упоминалось выше, каждая связь иерархического кластерного дерева получает в соответствие некоторое значение коэффициента неоднородности. Чем

больше это значение, тем существенней различие в кластерах, объединяемых связью. Чем меньше, тем выше сходство между кластерами [9].

Логично, что для поиска среди набора данных естественных «облаков» (кластеров) необходимо учитывать именно максимальное значение коэффициента неоднородности. Таким образом, «линию разбиения» нужно проводить на уровне, предшествующем связи с таким максимальным значением, чтобы два различных друг от друга кластера не успели объединиться в один [10].

Однако зачастую встречается такая ситуация, когда несколько связей иерархического дерева имеют достаточно большие, но при этом близкие значения коэффициента неоднородности. В этом случае имеет место множество потенциальных разбиений, выбрать среди которых оптимальное непросто, а часто вообще невозможно.

В подобных ситуациях, когда четкого варианта разбиения нет, рекомендуется отнести весь набор исходных данных к одному кластеру.

Ниже описан алгоритм, реализуемый данным методом.

В первую очередь, производится вычисление коэффициентов неоднородности для каждой связи иерархического дерева. При вычислении коэффициентов решено учитывать все связи, лежащие ниже текущей (для которой производится расчет). Таким образом, глубина расчета в данном случае является максимальной.

Далее выбираются две связи с наибольшими значениями коэффициента, и вычисляется разница между ними.

Если эта разница превышает заданную пороговую величину, то принимается решение о разбиении на кластеры. «Линия отсечения» проводится на дендрограмме между уровнем с максимальным значением коэффициента и ближайшим снизу уровнем иерархии.

В противном случае разбиение не производится, и все данные определяются в единый кластер.

Особенностью данного подхода, как и в предыдущем случае, является необходимость исследователя вносить в алгоритм величину максимально допустимой разницы между значениями коэффициентов. Кроме того, метод имеет высокую трудоемкость, т.к. расчет коэффициентов неоднородности производится для каждой из связей. К достоинствам данного метода можно отнести простоту его реализации.

#### **4.2.3. Подход, основанный на вычислении внутрикластерных и межкластерных расстояний**

Особенность предыдущих методов, как уже было сказано, связана с необходимостью выбора исследователем определенных критериев. Тем не менее, существуют алгоритмы, не требующие от аналитика предварительной настройки. Опишем ниже один из таких методов.

Данный алгоритм называют «внутренним», т.к. в расчет принимается только структура и характеристики исходного набора данных. В соответствии с этим методом, окончательное разбиение  $R_t$  должно удовлетворять следующему условию (4.1):

$$d_{\min}(C_i, C_j) > \max \{h(C_i), h(C_j)\}, \forall C_i, C_j \in R_t \quad (4.1)$$

где  $d_{\min}(C_i, C_j)$  – минимальное расстояние между парой объектов из кластеров  $C_i$  и  $C_j$ ;  $\max \{h(C_i), h(C_j)\}$  – максимальное из расстояний среди объектов одного кластера.

Иначе говоря, при окончательном разбиении различие между каждой парой кластеров должно быть больше, чем «самоподобие» каждого из них [11].

Пример разбиения исходной области на два кластера, для которых выполняется описанное условие, приведен на рисунке 4.4.

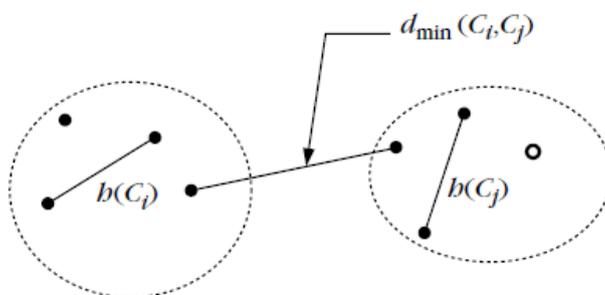


Рисунок 4.4 – Пример разбиения, удовлетворяющий условию останова

Для того чтобы определить подобное разбиение, требуется просмотреть все возможные разбиения иерархического дерева. Их количество равно  $(m-1)!$ , где  $m$  – число объектов исходного набора. Таким образом, на больших объемах данных применение данного метода может вызвать серьезные затруднения, связанные с высокой трудоемкостью.

Отчасти проблему можно решить, если рассматривать только  $N$  последних разбиений, т.е. ситуации с количеством кластеров, равным  $N, N-1, \dots, 2, 1$ . Это позволит уменьшить время определения окончательного разбиения, не теряя при этом важной информации. Однако в этом случае на долю исследователя вновь выпадает определение числа  $N$ .

Решено реализовать в разрабатываемом алгоритме пространственной фильтрации все три описанных выше метода, предоставив окончательный выбор конечному пользователю.

## 5. Разработка приложения визуализации гидравлического разрыва пласта

### 5.1. Структурное описание разработки

Приведем краткое описание структурной схемы разработанного приложения.

Главная форма приложения представляет собой основное окно для работы пользователя. Здесь располагается меню, позволяющее выбрать одно из четырех направлений работы: работа с файлами моделей трещины, интерполяция исходных данных, фильтрация и, наконец, визуализация. Кроме того, именно на главной форме находятся средства визуализации – графические объекты, предназначенные для отображения моделей трещины ГРП.

Для начала работы необходимо произвести импорт файлов, содержащих исходные данные. Форма импорта позволяет пользователю выбрать любое число файлов, а также просматривать текущий набор исходных данных в любой момент времени.

Сформировав набор исходных данных, пользователь получает возможность выполнить пространственную фильтрацию и построить модель трещины ГРП. Формы настройки фильтрации и визуализации позволяют производить гибкую настройку параметров соответствующих алгоритмов.

Кроме того, на основании исходного набора может быть произведена интерполяция с целью увеличения числа точек и заполнения интервалов между слоями.

Построенные модели пользователь может сохранять и использовать в дальнейшем. Для этого служат методы создания, открытия и сохранения файлов, содержащих наборы «ключевых» точек. Взаимодействие с пользователем при выполнении данных действий осуществляется посредством стандартных диалоговых окон среды MATLAB.

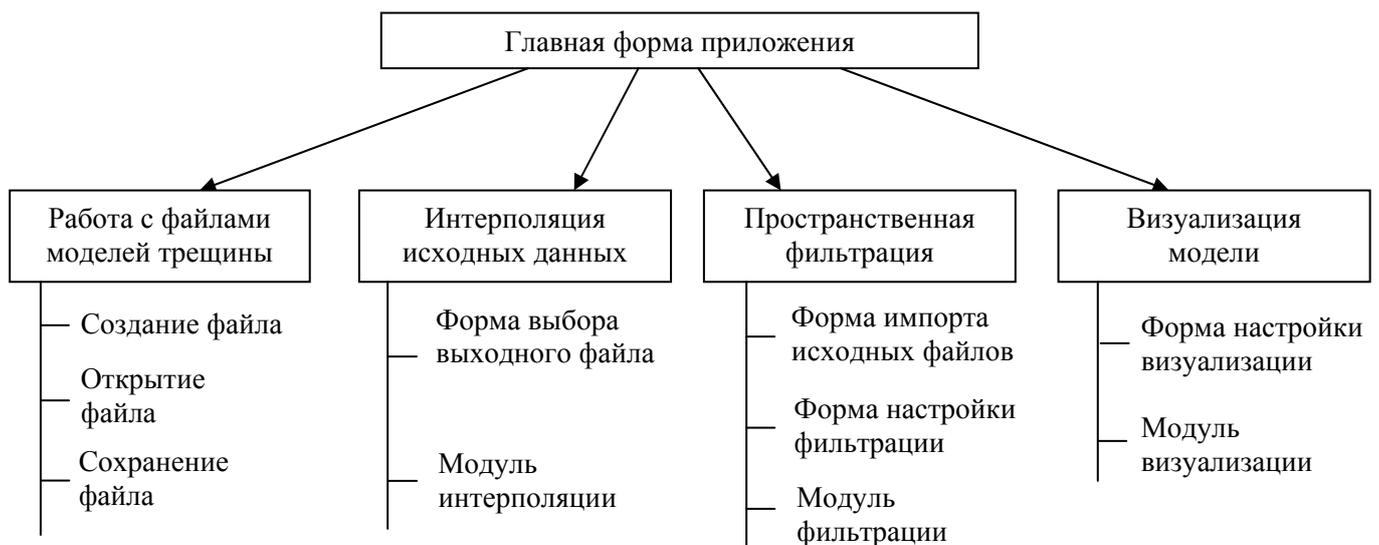


Рисунок 5.1 – Структурная схема разрабатываемой системы

Описанная структура позволит пользователю получать доступ ко всем модулям и формам приложения непосредственно из главного меню, а выделение тематических разделов облегчит навигацию внутри приложения.

Структурная схема системы, построенная на основе описанных выше модулей и форм, приведена на рисунке 5.1.

## 5.2. Краткое описание интерфейса приложения

Основными элементами главной формы приложения являются меню операций, панель инструментов и два графических объекта, предназначенных для визуализации моделей трещин ГРП. Наличие двух графиков обусловлено тем, что зачастую требуется сравнить результаты, полученные с использованием различных параметров алгоритма фильтрации.

Вид главной формы приложения приведен на рисунке 5.2. Укрупненное изображение главного меню и панели инструментов приведено на рисунке 5.3.

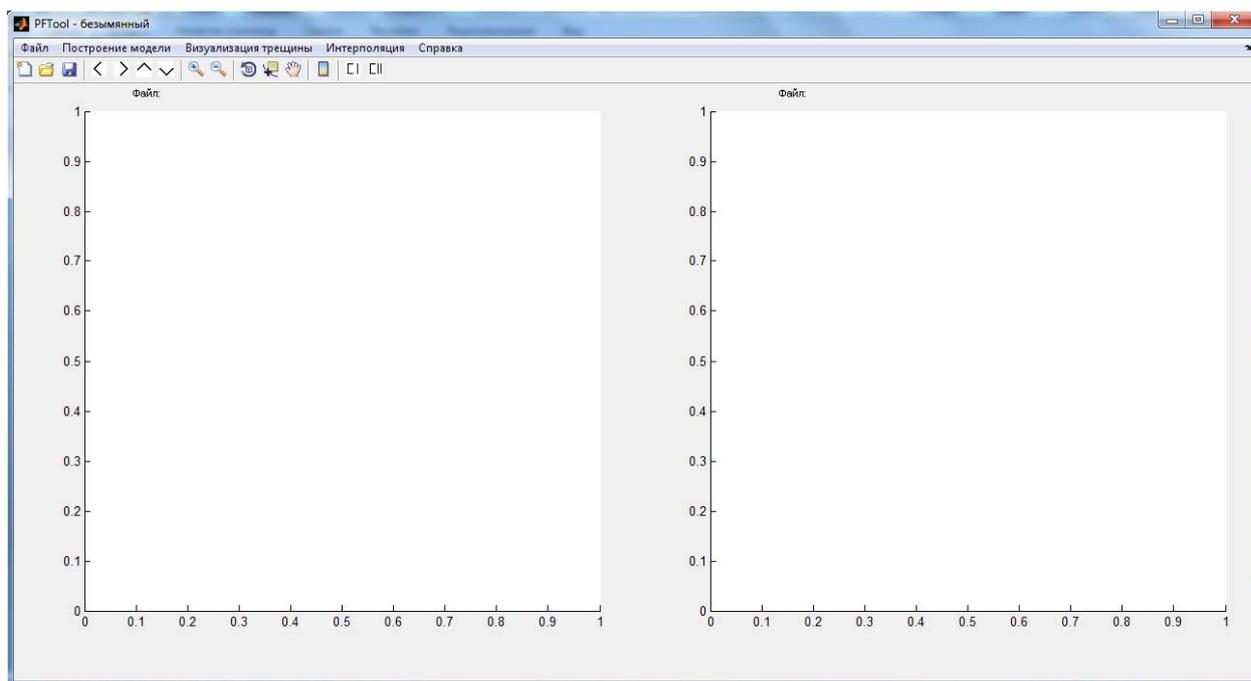


Рисунок 5.2 – Главное окно приложения

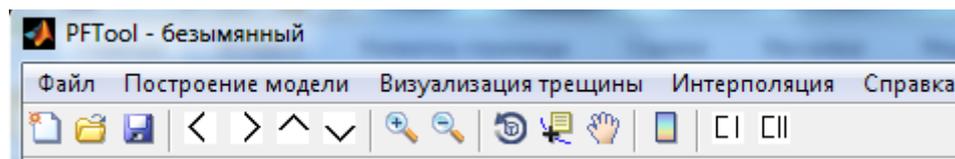


Рисунок 5.3 – Укрупненное изображение главного меню и панели инструментов

### 5.3. Пример визуализации трещины ГРП

Пример модели трещины гидроразрыва, построенной с использованием разработанных алгоритма и программного комплекса, приведен на рисунке 5.4.

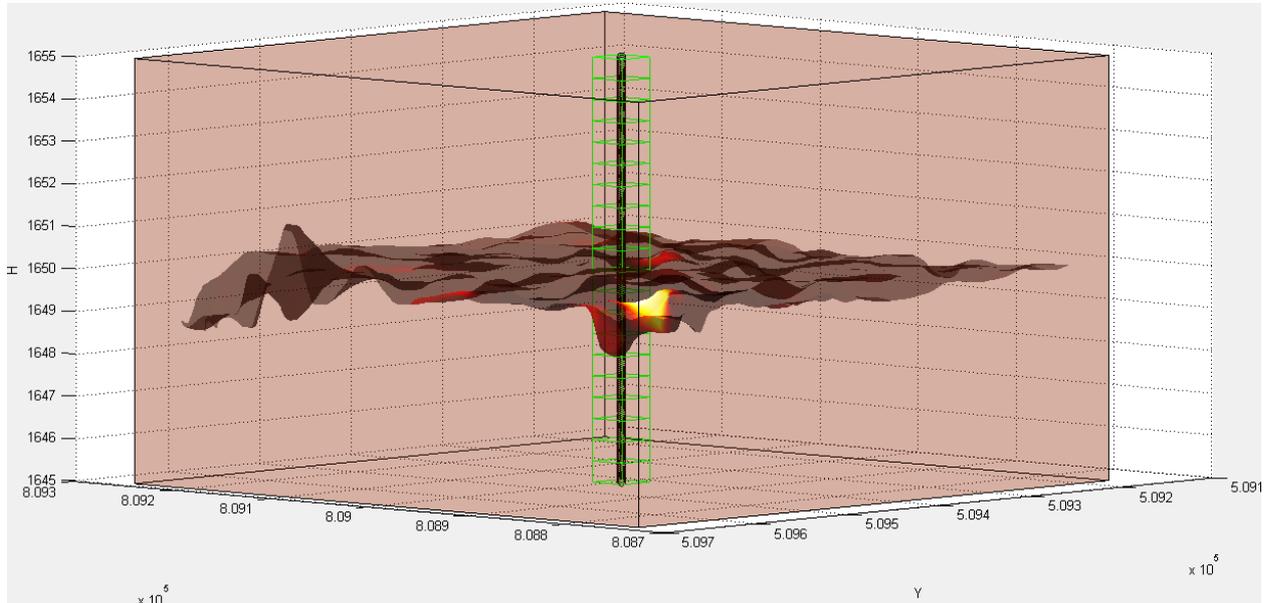


Рисунок 5.4 – Модель трещины гидроразрыва

### Заключение

Знание геометрии трещины, возникающей при гидравлическом разрыве пласта, позволяет специалистам правильно спланировать ряд мероприятий по работе со скважиной. Однако построение модели трещины ГРП является сложной задачей, и существующие системы сейсмического мониторинга зачастую не справляются с ней.

Одним из методов, позволяющим производить обработку микросейсмических данных для построения модели трещины ГРП, является пространственная фильтрация.

В данной работе было проведено детальное исследование предметной области, выявлены подходы к фильтрации сейсмических данных. Были рассмотрены методы кластерного анализа данных и определены достоинства и недостатки каждого из них.

Разработан алгоритм пространственной фильтрации, основанный на методах иерархической кластеризации. В процессе разработки неоднократно приходилось иметь дело с проблемами, не имеющими универсальных решений, что определило исследовательский характер работы. Одной из таких проблем стал вопрос определения оптимального числа кластеров в наборе данных.

Были рассмотрены, реализованы и протестированы три метода, основанные на различных критериях оптимальности. Особенность двух из них заключается в том, что они позволяют конечному пользователю настраивать «строгость» фильтрации, т.е.

стимулировать алгоритм либо к выделению кластеров, либо, наоборот, к отнесению всех данных в одну группу.

Однако выбор метода для выделения кластеров и настройка «строгости» фильтрации – не единственные доступные пользователю опции. Разработанный алгоритм имеет большое количество входных параметров, позволяющих производить его гибкую настройку.

Наиболее «удачным» методом с точки зрения применимости в задаче определения трещины ГРП был выбран метод «жизненных циклов». В целом, результаты, полученные с использованием данного метода, совпадают с представлением о пространственном расположении трещины.

Программные модули алгоритма реализованы с помощью среды разработки MATLAB. Произведено тестирование алгоритма на различных объемах исходных данных, сформированы оценки трудоемкости для каждого из трех вариантов реализации.

Разработан программный комплекс, предоставляющий пользователю возможность фильтрации сейсмических данных и визуализации модели трещины, а также широкий спектр настроек параметров алгоритмов. Наличие двух графических окон, а также набора специальных инструментов, таких как синхронное вращение графиков, позволяет пользователю приложения сравнивать построенные модели трещин ГРП.

Таким образом, в полном объеме решены все поставленные задачи, достигнута поставленная цель.

Разработанный продукт рекомендуется использовать для определения геометрии трещины, возникающей в ходе ГРП, на основе данных, прошедших предварительную фильтрацию (например, частотно-временную).

В заключение, сделаем вывод относительно дальнейших перспектив пространственной фильтрации.

При разработке алгоритма были использованы методы кластеризации как одного из направлений интеллектуального анализа данных. Однако, технология data mining, о которой было сказано в работе, предоставляет большое количество других методов, позволяющих обнаруживать закономерности в наборах данных, многие из которых были разработаны в рамках теории искусственного интеллекта. Таким образом, для повышения точности моделей трещины ГРП имеет смысл рассмотреть эти методы и, в случае применимости их к данной задаче, добавить их реализацию к уже существующему алгоритму.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Салимов О. В. Совершенствование методов проектирования и анализа результатов гидравлического разрыва пластов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. / О. В. Салимов. – Бугульма, 2009. – 25 с.

2. Чубукова И. А. Data Mining: учебное пособие. / И. А. Чубукова. – М.: Интернет-университет информационных технологий: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2006. – 382 с.
3. Дюк В. А. Data Mining: учебный курс. / В. А. Дюк, А. П. Самойленко – СПб: «Питер», 2001. – 368 с.
4. Кузнецов Д. Ю. Кластерный анализ и его применение [Электронный ресурс]: учебное пособие // Ярославский педагогический вестник, 2006. – URL: [http://vestnik.yspu.org/releases/uchenu\\_e\\_praktikam/33\\_4/](http://vestnik.yspu.org/releases/uchenu_e_praktikam/33_4/), свободный.
5. Николенко С. И. Алгоритмы кластеризации [Электронный ресурс] // Машинное обучение – ИТМО, 2006. – URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/ml/11-cluster.pdf>, свободный.
6. Воронцов К. В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования [Электронный ресурс] // Машинное обучение, 2010. – URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/ca/Voron-ML-Clustering.pdf>, свободный.
7. MATLAB: Statistics Toolbox [Электронный ресурс] / ред. Мищенко З. В. – Электрон. дан. – М.: Центр компетенций MathWorks, 2005. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/statist/index.php>, свободный.
8. Fred L. N. Combining Multiple Clusterings Using Evidence Accumulation / L. N. Fred, A. K. Jain. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, No. 6. – p. 7-11.
9. Bailey M. Automated Classification and Analysis of Internet Malware / M. Bailey, J. Oberheide, J. Andersen. // Recent Advances in Intrusion Detection. – 2007. – pp. 188-194.
10. Korenius T. Hierarchical clustering of a Finnish newspaper article collection with graded relevance assessments / T. Korenius, J. Laurikkala, M. Juhola. // Information Retrieval. – 2006. – Vol. 9, No. 1. – pp. 9-38.
11. Theodoridis S. Pattern Recognition / S. Theodoridis, K. Koutroumbas. - Academic Press, Inc. USA, 2009. – 494 pp.
12. Бурева Н. Н. Многомерный статистический анализ / Н. Н. Бурева – Нижний Новгород, 2007. – 112 с.
13. Луценко Е. В. Метод когнитивной кластеризации или кластеризация на основе знаний / Е. В. Луценко, В. Е. Коржаков // Научный журнал КубГАУ. – 2011. - № 71(07). - с. 9-12.
14. Белкина В. А. Основы компьютерных технологий решения геологических задач / В. А. Белкина. – Тюмень, 2006. – 34 с.

Н.Г. Тетеркина (студент, 5 курс)  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ),  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(ТУСУР)

Научный руководитель – П.Н. Дробот, к.ф.-м.н., доцент ФИТ ТУСУР

## ПРОЕКТ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ «ОСЦИЛЛИСТОРНЫЙ СЕНСОР ТЕМПЕРАТУРЫ»

### Реферат

*Ключевые слова:* осциллисторные сенсоры, датчик температуры, патентные исследования, маркетинговые исследования, анализ бизнес-модели, финансовый план, винтовая неустойчивость

Объектом исследования является осциллисторный сенсор температуры.

Цель работы – изучение возможностей коммерциализации разработки «Осциллисторный сенсор температуры».

Описаны основные характеристики осциллисторного сенсора и методика их измерения. В процессе работы проводились патентные и маркетинговые исследования, разработка финансового плана, изучение таких аспектов реализации проекта, как охрана интеллектуальной собственности, подтверждение соответствия в системе ГОСТ Р, продвижение продукции. Основные технические показатели разработки - высокая чувствительность частоты к температуре, высокая амплитуда сигнала, высокая надежность, стабильная выходная характеристика. Степень внедрения разработки – опытный образец.

### Введение

Измерение температуры играет важную роль в большинстве технологических процессов, оно необходимо во многих отраслях промышленности и народного хозяйства. В настоящее время на рынке датчиков температуры существует жесткая конкуренция, поэтому изучение новых способов измерения является актуальным и перспективным.

Измерение температуры жидкости, газа, твердой поверхности или сыпучего порошка – каждый случай имеет свои особенности, которые необходимо понимать, чтобы измерения максимально соответствовали поставленной задаче. Существует множество датчиков температуры, построенных с использованием различных физических эффектов и явлений (кремниевые диодные датчики температуры, биметаллические датчики, жидкостные и газовые термометры, термоиндикаторы,

термисторы, термопары, термопреобразователи сопротивления, инфракрасные датчики). Одни из них прекрасно справляются с конкретной задачей по измерению температуры, другие предназначены для универсального использования.

Основными критериями при выборе датчика являются соответствие измеряемых температур рабочим диапазонам измерений датчика, невысокая стоимость, удобство измерений, высокая точность и надежность измерений.

Таким образом, разработка и внедрение датчиков, обеспечивающих наилучшие показатели при данных условиях измерения и способных конкурировать с аналогами по ценовым характеристикам, является актуальной задачей в данной сфере деятельности.

## 1. Научно-технические основания проекта

Проект коммерциализации инновационной разработки «Осцилляторный сенсор температуры с частотным выходом» основан на закономерностях осцилляторного эффекта, исследованных в работах научного руководителя проекта П.Н. Дробота [1–3] и конкурсанта Тетёркиной Н.Г. [4–9]. В частности, в проекте рассматривается зависимость частоты осцилляторных колебаний тока от температуры окружающей среды при неизменных значениях напряжения питания осциллятора.

Осциллятор – полупроводниковый прибор, состоящий из полупроводникового образца, через который протекает электрический ток, помещённого в продольное току магнитное поле и сопротивления нагрузки, включённых последовательно с источником электрического питания (рис. 1, а). В основе работы прибора лежит явление винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы, когда в полупроводниковом образце возникает винтовая волна плотности плазмы.

Осцилляторный сенсор температуры представляет собой осциллятор, построенный с использованием двух малогабаритных постоянных магнитов из сплава FeNdB в форме параллелепипеда с размером сторон 10–12 мм. В магнитный зазор между магнитами помещен полупроводниковый образец, электрические выводы от которого вынесены из магнитного зазора посредством двух проводников, изолированных фторопластом (рис. 1, б).

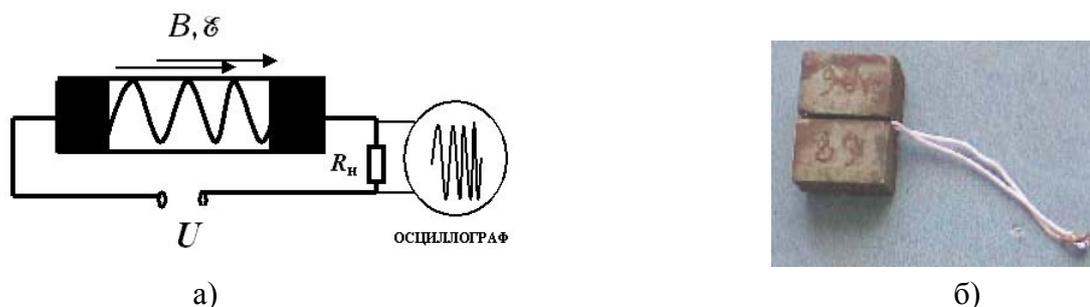


Рис. 1. а) схема питания осциллятора и регистрации сигнала осцилляторной генерации; б) внешний вид сенсора температуры

Такой осциллятор помещается в защитный металлический корпус, конструкция которого обеспечивает эффективный теплообмен между кристаллом полупроводника и внешней средой. И использованные магниты были взяты из тех, что были в наличии, на практике их размеры могут быть и меньше.

Для повышения точности измерений и предотвращения влияния джоулева нагрева при протекании электрического тока через полупроводник осциллятор питался импульсным напряжением  $U$  (с прямоугольной формой импульса) от генератора Г5-54. Частота и амплитуда осцилляторной генерации измерялась осциллографом С1-83, кроме того, измерение частоты осуществлялось частотомером ЧЗ-54.

В ходе цикла исследований [4–9] Тетёркина Н.Г. провела проверочные измерения выходной частотно-температурной характеристики осцилляторного сенсора температуры в наиболее употребительном на практике диапазоне температур  $-10 \div +63^\circ\text{C}$  ( $263 \div 336\text{ K}$ ). Было установлено, что при  $U = 60\text{ В}$  и длительности импульса  $D_{\text{и}}=60\text{ мкс}$  осцилляторный сенсор обладает высокими чувствительностью  $3,1\text{ кГц/К}$  и амплитудой информационного сигнала  $0,66 \div 0,04\text{ В}$  (рис. 2, б).

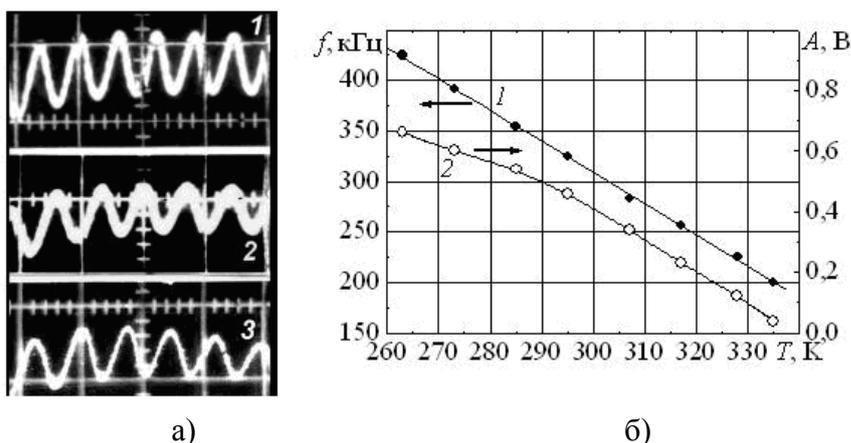


Рис. 2. (а) сигналы осцилляторного сенсора температуры при импульсном напряжении питания 60 В и температуре  $T$ , К ( $^\circ\text{C}$ ): 1–295(22); 2–307(34); 3–317(44). Масштаб: по вертикали – 0,5 В/б.дел.; по горизонтали – 5 мкс/б.дел.; (б) соответствующий осциллограммам график зависимости от температуры частоты  $f$  (1) и амплитуды  $A$  (2) осцилляторного сенсора

## 2. Сферы применения осцилляторных сенсоров

Практический интерес к осцилляторному эффекту связан с возможностью создания на его основе новых полупроводниковых приборов, построенных на принципах не интегральной, а функциональной электроники. В этом случае функции генерирования или преобразования электрических сигналов выполняет физическое явление, а не сложная интегральная схема, для производства которой требуется дорогостоящее высокотехнологичное полупроводниковое производство.

Осцилляторный сенсор температуры работоспособен в диапазоне температур от 77 до 335 К, ему присущи высокие линейность выходной характеристики (в определенных интервалах температуры) и чувствительность частоты осцилляторной генерации к изменению измеряемой величины. Амплитуда выходного сигнала велика ( $5 \text{ мВ} \div 0,7 \text{ В}$ ) и не требует предварительного усиления.

В случае аналоговых сенсоров температуры для подключения их к компьютеру обычно необходим усилитель слабого аналогового сигнала и АЦП. Осцилляторный сенсор осуществляет прямое преобразование температуры в частоту, что значительно упрощает его сопряжение с компьютером, поскольку осцилляторный сигнал представляет собой цифровой сигнал, в котором частота используется для представления значения температуры. Также высокая амплитуда частотного сигнала на выходе осцилляторного сенсора исключает необходимость предварительного усиления сигнала. Важным достоинством осцилляторного сенсора температуры является удобство и высокая точность частотных измерений. Кроме того, ему присущи хорошая помехозащищенность и возможность без предварительного усиления передавать информацию на значительные расстояния по длинным проводным линиям (до нескольких километров).

При решении практических задач мониторинга температуры осцилляторный сенсор с частотным выходом имеет явные преимущества по сравнению с другими сенсорами. Ниже приведены возможности использования осцилляторного сенсора температуры на практике: для мониторинга температуры морских и океанических глубин, для измерения температуры почвы в тепличных хозяйствах и для контроля температуры в нефтедобывающих (геологических, геофизических и любых других) скважинах.

В настоящее время температура водных глубин измеряется с помощью погружных приборов, снабженных комплексом электронной аппаратуры с использованием в качестве первичных преобразователей температуры аналоговых сенсоров – термисторов. Погружной зонд, как правило, представляет собой герметичный контейнер, содержащий блок электроники со следующим стандартным набором устройств: адаптер–усилитель аналогового сигнала термистора, АЦП, микроконтроллер, источник энергии (блок питания или батарея питания). Зонды работают в автономном режиме с записью информации на внутреннюю электронную память, а также используется кабельный канал для передачи данных из глубины на поверхность или на борт корабля, в компьютер. Использование вместо термисторов осцилляторных сенсоров температуры с частотным выходом для непрерывного, или по запросу, измерения температуры позволит исключить из конструкции погружного зонда блоки усиления, АЦП, микроконтроллера и батареи питания, а также передавать на поверхность сигнал по той же линии, по которой с поверхности осуществляется питание осцилляторных сенсоров импульсами напряжения прямоугольной формы [10].

В настоящее время существует определенное количество разработок электронных многоканальных систем для мониторинга температуры почвы в тепличных хозяйствах. Для примера рассмотрим комплекс измерения температуры почвы ИТП-16 производства АО «Специальные системы связи», г. Харьков, Украина. Комплекс предназначен для измерения температуры почвы на поверхности и в глубинных слоях в автоматическом режиме с использованием проводного канала и представляет собой 16-ти канальную систему. В качестве первичных преобразователей температуры используются аналоговые сенсоры – платиновые термометры сопротивления (ТСП). Каждый ТСП подключается через электронные коммутирующие цепи к блоку электроники по четырехпроводной схеме. Блок электроники преобразует значения сопротивлений ТСП в значения температуры в местах установки. Два провода образуют токовую цепь, в которую включается последовательно с ТСП образцовое сопротивление  $R_0$ . Питаются токовые цепи от источника тока. С двух других проводов снимается падение напряжения с ТСП и подается на вход АЦП. Кодовые выходы АЦП подключены к контроллеру, который по специальному алгоритму пересчитывает выходные кодовые сигналы АЦП в значения сопротивлений, а затем и в температуру. Выходная информация по одному из последовательных портов подается через радио или проводной канал в персональный компьютер и заносится в его память. Если в ИТП-16 каждую измерительную ячейку (ТСП +  $R_0$ ) заменить на осцилляторный сенсор температуры, то значительно упростится схема измерения. В этом случае становятся не нужными 16 образцовых сопротивлений  $R_0$ , входящих в каждую измерительную ячейку, а достаточно одного, размещенного в блоке электроники, сопротивления, сигнал с которого подается в выходной канал связи с компьютером. Вместо четырех проводов, выходящих из каждой измерительной ячейки, достаточно использовать один провод, а вторым проводом использовать заземление, учитывая, что в тепличном хозяйстве почва всегда увлажнена. Причем роль такого заземления с успехом может играть металлический водопровод, имеющийся в каждой теплице. В блоке электроники не нужны АЦП и контроллер, т.к. сигнал от сопротивления нагрузки осциллятора сразу идет на персональный компьютер. Роль источника тока будет выполнять генератор прямоугольных импульсов напряжения, питающий осциллятор, причем импульсы могут быть одиночными. Таким образом, использование осцилляторного сенсора с частотным выходом приведет к значительному упрощению самой схемы мониторинга и повышению ее надежности, к увеличению точности результата и уменьшению затрат на оборудование [11].

Использование осцилляторного сенсора температуры с частотным выходом также является перспективным в многоканальных геофизических системах с телеметрической передачей информации по каротажному кабелю, в автономных глубинных приборах, используемых при гидродинамических исследованиях скважин, а также для систем дистанционного мониторинга погружного оборудования скважин. При решении промысловых задач важным является создание комплексных приборов с многоканальной системой передачи информации. Кроме того, исследования скважин

сопровождаются измерением небольших приращений температур и давлений. Это предъявляет высокие требования к чувствительности и точности скважинных преобразователей и системе передачи информации. В таких условиях использование сенсора с частотным выходом позволяет существенно упростить схемотехнику и минимизировать удельную стоимость на канал измерения с высокой точностью [12].

### 3. Расчет себестоимости изделия

Проведенный ранее расчет себестоимости изделия при использовании варианта производства, при котором полный производственный цикл предприятие осуществляет самостоятельно, показал, что развитие проекта по данному сценарию экономически нецелесообразно. При таком варианте производства продукт будет неконкурентоспособен из-за своей высокой цены. Поэтому при реализации проекта планируется отдавать такие этапы производственного цикла, как производство полупроводниковых элементов, сборка и тестирование изделий, на аутсорсинг.

Для производства продукции требуются следующие сотрудники: рабочий 3-4 разряда, зарплата – 16000 рублей в месяц; инженер 1 категории, зарплата – 32000 в месяц.

Конструкция осциллисторного сенсора:
- Корпус - Ø4*8 мм
- Кристалл 1*1 мм
- Медная шайба – Ø3*1,5 мм
- Медный вывод (лепесток) - 2 шт.
- Магнит – Ø4 мм*3 мм - 2 шт.

Цена корпуса – 40 руб., цена магнита – 20 руб.

В таблице 1 приведен перечень этапов производства, трудоемкость и оценка затрат на изготовление продукта.

Таблица 1 – Калькуляция себестоимости.

Статья калькуляции	Затраты на 1 шт., руб.
Материалы	80,00
Зарплата основных рабочих	30,20
Зарплата вспомогательных рабочих	3,02
Отчисления на социальное страхование	9,97
Цеховые расходы	112,28
Цеховая себестоимость	215,47

Таблица 2 – Расчет затрат на изготовление продукта.

	Трудоемкость на 1000 шт.		на 1 шт.
	н/час	руб.	руб.
<i>Медное кольцо</i>	40	5000	
Обезжиривание деталей в органическом растворителе	0,5	50	
Контроль внешнего вида	8	800	
		5850	5,85
<i>Медный вывод (лепесток)</i>			
Штамповка	8	1200	
Обезжиривание деталей в органическом растворителе	0,5	50	
Контроль внешнего вида	8	800	
		2050	2,05
<i>Изготовление пластины</i>	Трудоемкость на 4 шт.		
	н/час	руб.	
Резка слитка на шайбы	4	800	
Шлифовка	4	800	
Полировка	8	1600	
Снятие связки в орг. растворителе	0,5	50	
Контроль внешнего вида	1	100	
		3350	3,35
<i>Изготовление кристалла</i>	Трудоемкость на 1000 шт.		
	н/час	руб.	
Обезжиривание пластин	2	200	
Очистка пластин	1	100	
Обработка ионно-лучевая имплантация	4	800	
Отжиг	2	200	
Измерение поверхностного сопротивления	0,5	50	
Разгонка примесей	4	800	
Измерение поверхностного сопротивления	0,5	50	
Очистка пластин	1	100	
Напыление омических контактов	4	800	
Отжиг контактов	2	400	
Обработка (в ДМФА) перед нанесением фоторезиста	1	100	
Нанесение фоторезиста	0,5	50	
Сушка фотослоя (в установке)	0,5	50	
Экспонирование контактное	0,5	50	

Проявление фотослоя мокрое	0,5	50	
Очистка плазменная	0,5	50	
Термозадубливание	0,5	50	
Травление металлов	0,5	50	
Удаление фоторезиста	0,5	50	
Ультразвуковая вырубка	4	1200	
Отмывка	0,5	50	
Обтравливание кристаллов	0,5	50	
Травление в полирующем травителе	0,5	50	
Измерение параметров кристаллов	20	4000	
Контроль внешнего вида	5	500	
		9850	9,85
<i>Сборка</i>			
Напайка кристалла на лепесток	8	1600	
Контроль внешнего вида	8	400	
Приклейка медного кольца и магнитов	8	800	
Измерение параметров	8	1600	
Сборка узла в корпус	8	800	
Измерение параметров	8	800	
		6000	6
<i>Испытания</i>			
Термостабилизация	2	200	
Измерение параметров	8	1600	
Маркировка	8	800	
Технический контроль ОТК	2	400	
Сдача на склад	1	100	
		3100	3,1
Итого			30,2

#### 4. Патентные исследования

Проведение патентных исследований с целью определения научно-технического уровня разработки и определения патентной чистоты является необходимым этапом реализации проекта. В рамках данной работы был проведен патентный поиск по патентным базам следующих организаций:

- 1) Федеральный институт промышленной собственности РФ (Роспатент);
- 2) Ведомство патентов и торговых марок США (United States Patents and TradeMark Office);
- 3) Европейское патентное ведомство (European Patent Office);
- 4) Патентное ведомство Японии (Japan Patent Office).

Патентные исследования проводились с учетом следующих особенностей разработки:

- осцилляторный сенсор может использоваться для измерения температуры в интервале  $\Delta T=(77\div 335)$  К;
- осцилляторный сенсор имеет частотный выход;
- для работы сенсора необходимо наличие магнитного поля.

В основу определения патентной ситуации положена статистическая обработка патентной документации, относящейся к объекту патентных исследований за период с 1977 по 2012 год.

В качестве предмета поиска был выбран датчик температуры с частотным выходом (при работе с зарубежными патентами – semiconductor temperature sensor with frequency output). При отборе охранных документов принимались во внимание принцип работы устройства, принципиальная схема устройства и области возможного применения. Весь массив отобранных патентных документов (80 патентов) можно разделить на несколько блоков, включающих в себя патенты по следующим направлениям:

- датчики и системы измерения температуры (47 патентов);
- измерительные системы для мониторинга различных параметров объекта или среды, в которых датчик температуры (или блок датчиков) является одним из компонентов (33 патента).

Динамика патентования по годам показывает, что патенты на изобретения оформлялись практически каждый год. Наибольшим уровнем изобретательской активности характеризуются 1977, 2007, 2009, 2010 и 2011 годы. Увеличение количества полученных в последние годы патентов свидетельствует о том, что рассматриваемая отрасль динамично развивается.

Среди отобранных охранных документов присутствуют патенты, действие которых распространяется на такие страны, как Россия, США, Япония, Великобритания, Корея, Китай, Украина, также присутствует патент Всемирной организации по интеллектуальной собственности (WIPO – World Intellectual Property Organization). Наибольшее количество патентов представлены такими странами, как США (32 патента), Россия (25 патентов) и Япония (18 патентов).

Проведенный анализ показывает, что в российском патентовании присутствуют патентообладатели – частные лица (8 патентов), ВУЗы и НИИ (5 патентов) и предприятия (12 патентов). Среди зарубежных патентообладателей практически отсутствуют частные лица (1 патент), присутствуют немногочисленные патентообладатели-ВУЗы и лаборатории (3 патента). Наибольшее число патентообладателей представлены предприятиями и корпорациями (52 патента).

В ходе анализа было выяснено, что запатентованные разработки представляют собой схемные решения, предназначенные для использования в различных отраслях промышленности. Несмотря на то, что проблема измерения температуры по-прежнему является актуальной, принципиально новые виды датчиков температуры в России не

патентуются. Представленные патентами устройства в большинстве случаев представляют собой системы для измерения нескольких параметров (температура, давление, уровень жидкости и др.). Изученные системы измерения используются в таких отраслях промышленности как транспортное машиностроение, авиационное приборостроение, нефтегазовая промышленность, производство систем вентиляции и кондиционирования.

В результате исследований было выяснено, что рассматриваемая разработка обладает патентной чистотой, то есть не попадает под действие патентов на изобретения, полезные модели и промышленные образцы третьих лиц.

## **5. Обзор рынка приборов для измерения температуры в России и в мире**

В силу того, что постоянно появляются новые производители датчиков, рынок датчиков и преобразователей температуры динамично развивается. Ценовые характеристики остаются ключевым критерием при выборе поставщика. Результатом снижения цен стал тот факт, что в настоящее время на данном рынке существует жесткая конкуренция.

Данный рынок характеризуется большим количеством производителей во всем мире. В связи с тем, что измерение температуры необходимо практически в любом производственном процессе, для большинства производителей датчиков открываются перспективы для выхода на рынок. Ценовая конкуренция позволяет получать конкурентные преимущества для стран с развивающейся экономикой, например, для Китая. Зачастую на динамично развивающихся потребительских рынках для датчиков температуры важнейшим фактором становится цена, а не используемая технология.

Среди сегментов рынка, в которых используются датчики температуры, можно отметить следующие: металлургия, нефтегазовая отрасль, электроэнергетика, климат-контроль, медицина, пищевая промышленность, химическая и фармацевтическая промышленность, автомобильная промышленность, телекоммуникации, компьютерная отрасль и другие. Рынок датчиков и преобразователей температуры в 2009 году составил \$3,652.2 млн. По словам аналитиков, к 2015 году объем рынка достигнет \$5,306.9 млн.

Среди производителей датчиков температуры в России существует довольно жесткая конкуренция. В данном сегменте преобладают иностранные производители. Следует отметить, что при проектировании измерительных систем и автоматизированных систем управления измерение давления и температуры идут «рука об руку», поэтому потребители часто получают комплект из датчиков температуры и давления (а часто и расхода) одного и того же производителя. Российские компании успешно конкурируют в данном сегменте (основным конкурентным преимуществом является цена) – «Элемер», «Овен», ЗАО НПК «Эталон», ООО НПО «Вакууммаш» ОАО Владимирский завод «Эталон» и другие. Все больше пользователей привлекает возможность бесконтактного измерения температуры с помощью пирометров. Также

необходимо отметить, что автоматизированные системы управления становятся нормой не только для крупных заводов, но и для небольших предприятий.

## **6. Сегментирование и оценка емкости рынка для осцилляторных сенсоров температуры**

Для оценки емкости рынка необходимо учесть все особенности рассматриваемой разработки. В настоящее время на рынке датчиков температуры представлено огромное количество датчиков, поэтому покупатели ориентируются на те продукты, которые в наибольшей степени удовлетворяют конкретным требованиям и условиям измерения. Поэтому из всех возможных сфер применения датчиков температуры были выбраны несколько направлений. Структура потенциальных потребителей осцилляторных сенсоров температуры с разделением по типу предприятия (B2B – производители, B2C – конечные потребители) приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Структура потенциальных потребителей.

B2C рынок	B2B рынок
1. Тепличные хозяйства 2. Сельскохозяйственные помещения (птицеводство, животноводство) 3. Склады, цеха, хранилища 4. Предприятия нефтегазодобывающей промышленности 5. Исследовательские организации (геология, изучение морских глубин и т.д.)	1. Строительство теплиц, услуги в области растениеводства 2. Строительство сельскохозяйственных помещений, услуги в области животноводства, птицеводства 3. Производство систем пожарной безопасности 4. Производство кондиционеров и систем климат-контроля 5. Строительство складов, цехов, хранилищ 6. Производство оборудования для нефтегазовой промышленности

Рынок датчиков температуры имеет большую емкость (более 300000 датчиков в год), однако из-за значительной конкуренции сложно занять большую долю рынка.

Структура емкости рынка по типам потребителей:

- B2B – 60000 датчиков в год
- B2C – 240000 датчиков в год

## **7. Определение предлагаемых продуктов и услуг**

В зависимости от потребностей покупателей планируется предлагать различные варианты товаров и услуг:

- 1) Продукт – сенсор температуры:
  - 1.1) Сенсор, отображающий результат измерения непосредственно на дисплее устройства;
  - 1.2) Сенсор, подключаемый к компьютеру:
    - а) подключаемый к обычной звуковой карте (с делителем частоты в комплекте);
    - б) подключаемый к специализированной высокочастотной карте (в комплекте);
  - 2) Обучение:
    - 2.1) Обучение покупателей работе с сенсором;
    - 2.2) Обучение специалистов метрологических служб, проводящих поверку средств измерения.

После проведения НИОКР ассортимент будет расширяться за счет добавления новых товаров – датчиков других физических величин (см. п. 15).

## 8. Определение конкурентных преимуществ продукта

При выборе датчика температуры для покупателя ключевое значение имеют следующие характеристики:

- Низкая цена датчика;
- Требуемый диапазон измерения;
- Высокая надежность датчика;
- Высокая чувствительность;
- Высокая амплитуда выходного сигнала;
- Легкость сопряжения с компьютером;
- Стабильность выходной характеристики.

В свою очередь, конкурентными преимуществами осцилляторных сенсоров будут являться следующие характеристики:

- Цена продукта ниже, чем у многих аналогов;
- Диапазон измерения температуры сенсора (от -196 до 63 °С) подходит для различных сфер применения;
- Сенсор температуры обладает высокой надежностью;
- Сенсор обладает высокой чувствительностью частоты к температуре – 3÷40 кГц на единицу измерения;
- Сенсор имеет высокую амплитуду информационного сигнала (от 0,04 до 1,68 В), что делает ненужным предварительное усиление сигнала;
- Характеристики сенсора упрощают сопряжение с компьютером;
- Сенсор находится в металлическом корпусе, что позволяет размещать его внутри жидких и газообразных сред;
- Сенсор имеет стабильную выходную характеристику.

## 9. Ценообразование и прогноз объема продаж

Так как рынок датчиков температуры в настоящее время является весьма насыщенным, и покупатели наиболее часто отдают предпочтение продукту, который поможет устранить их проблемы при наименьших финансовых затратах, при реализации данного проекта для установления цены необходимо принимать во внимание цены конкурентов. В настоящее время на рынке датчиков температуры существует значительный ценовой разброс (минимальные цены на простейшие датчики, такие как термодатчики, начинаются от 200 рублей за изделие; стоимость современных комплексных систем может достигать 11000 рублей).

Метод вмененной потребительской оценки заключается в том, что производитель формирует цену на товар исходя из предполагаемой им оценки товара потребителем. При этом с позиций потребителя обосновывается различие цены на товар, предназначенный для реализации, с ценой аналогичного товара конкурентов. При росте цены на предлагаемый товар по сравнению с действующей ценой конкурента потребителя убеждают (вменяют) в получении им дополнительной экономической выгоды от применения предлагаемого товара.

Из-за значительной конкуренции и неизвестности новой фирмы на начальном этапе работы могут возникнуть трудности, связанные со входением на рынок и укреплением конкурентных позиций. Однако предполагается, что с помощью поддержания высокого уровня качества выпускаемой продукции и сервиса, возможно постепенное увеличение объемов продаж (табл. 4). Для обеспечения данного объема продаж необходимо поддержание успешного сотрудничества с предприятием, занимающимся производством сенсоров и осуществление необходимых мероприятий по продвижению готовой продукции (поиск клиентов, налаживание контактов, реклама).

Таблица 4 – Прогнозируемые объемы продаж (первый год).

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Продажи, шт.	0	18	24	24	30	40	55	61	61	80	80	90

Производство и продажа продукции связаны со следующими затратами:

- Оплата услуг аутсорсинга по производству сенсоров (материалы, оплата труда работников, оплата за использование оборудования и площадей аутсорсера);
- Затраты на продвижение продукции;
- НИОКР (покупка оборудования, оплата труда инженеров);
- Аренда, оплата информационно-консультационных услуг;
- Оплата процедуры подтверждения соответствия.

Для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию сенсоров различных физических величин планируется привлечение финансовой поддержки посредством участия в конкурсе Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Таким образом, в первый год реализации проекта планируется привлечь для проведения НИОКР 250000 рублей на безвозвратной основе.

## **10. Охрана интеллектуальной собственности**

Для защиты разработки от несанкционированного копирования и реализации со стороны конкурирующих организаций необходимо рассмотреть вопрос о выборе способа охраны интеллектуальной собственности.

Несмотря на то, что рассматриваемая разработка представляет собой патентоспособное решение, предпочтительным вариантом охраны интеллектуальной собственности в данном случае является вариант охраны, предполагающий внесение информации о технологии производства продукта в перечень информации, охраняющейся в режиме коммерческой тайны. Это объясняется сложностью технологии изготовления продукта и, следовательно, трудностью ее воспроизводства без наличия определенных знаний. Также в силу того, что датчики температуры являются товаром массового производства, который используется во многих сферах деятельности, установление факта несанкционированного копирования представляется довольно трудноосуществимой задачей. Кроме того, так как согласно российскому законодательству, доказательство факта нарушения прав на интеллектуальную собственность должно осуществляться обладателем прав, которые были нарушены, защита интеллектуальной собственности ведет к большому количеству временных, финансовых и других затрат.

## **11. Подтверждение соответствия продукции в системе ГОСТ Р**

Согласно общероссийской классификации продуктов ОК 005-93, осцилляторные сенсоры температуры принадлежат к классу 42 1100 «Приборы для измерения и регулирования температуры». Данный вид продукции подлежит декларированию соответствия согласно «Единому перечню продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии, утвержденному постановлением Правительства РФ от 1 декабря 2009 г. № 982 (с изменениями) «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии».

## **12. Контроль качества**

Контроль качества при производстве продукции будет осуществляться технологом с помощью метода контрольных листков. Контрольный листок – это средство регистрации данных, как правило, в виде бумажного бланка с заранее внесенными в него контролируемыми параметрами, соответственно которым можно заносить необходимые данные; это инструмент, позволяющий облегчить задачу контроля протекающих процессов и предоставить различного рода факты для анализа, корректировки и улучшения качества процессов.

Для осуществления контроля качества часть готовой продукции будет отбираться для проверки, будут проводиться испытания на временную стабильность, исследоваться частотно-температурная характеристика в заданном температурном диапазоне. Данные об отклонениях будут анализироваться и архивироваться. При значительном количестве отказов и отклонений полученная информация будет использоваться для принятия решений об изменении технологии производства, используемых комплектующих и так далее.

## **13. Методы вывода на рынок и продвижения продукта**

В силу того, что в начале работы компании маркетинговый бюджет ограничен, вывод продукта планируется осуществлять с помощью последовательности блиц-кампаний, каждая из которых будет содержать несколько методов продвижения, направленных на конкретные рыночные сегменты.

Планируется использовать следующие методы продвижения:

- Рассылка коммерческих предложений потенциальным покупателям по почте и с помощью сети Интернет;
- Реклама в специализированных печатных изданиях;
- Участие в выставках и ярмарках;
- Участие в специализированных научно-практических конференциях (например, Всероссийская конференция по проблемам термометрии «Температура»);
- Реклама в сети Интернет (контекстная реклама – поисковая и тематическая, размещение ссылок на сайт в тематических каталогах, установка баннеров и ссылок, а также статей на тематических порталах).

## **14. Финансовый план**

В рамках работы были сделаны расчеты финансового бюджета проекта на первый год работы в электронных таблицах Excel, в том числе: доходы и расходы, план финансовых результатов деятельности, план движения денежных средств (рис. 3), оценка эффективности проекта.

При осуществлении проекта планируется проведение НИОКР для разработки датчиков различных физических величин, что поможет расширить ассортимент выпускаемой продукции. Сумма затрат, необходимых для проведения НИОКР, составляет 250 000 рублей.

Об эффективности проекта свидетельствуют следующие показатели:

- Общая прибыль – 315000 руб.;
- Остаток денежных средств в конце первого года работы – 492530 руб.;
- Сумма чистой прибыли за первый год деятельности предприятия – 242530 руб.;
- Срок окупаемости проекта – 13 месяцев;
- Рентабельность деятельности – 26 %;
- Рентабельность общих вложений – 97 %.

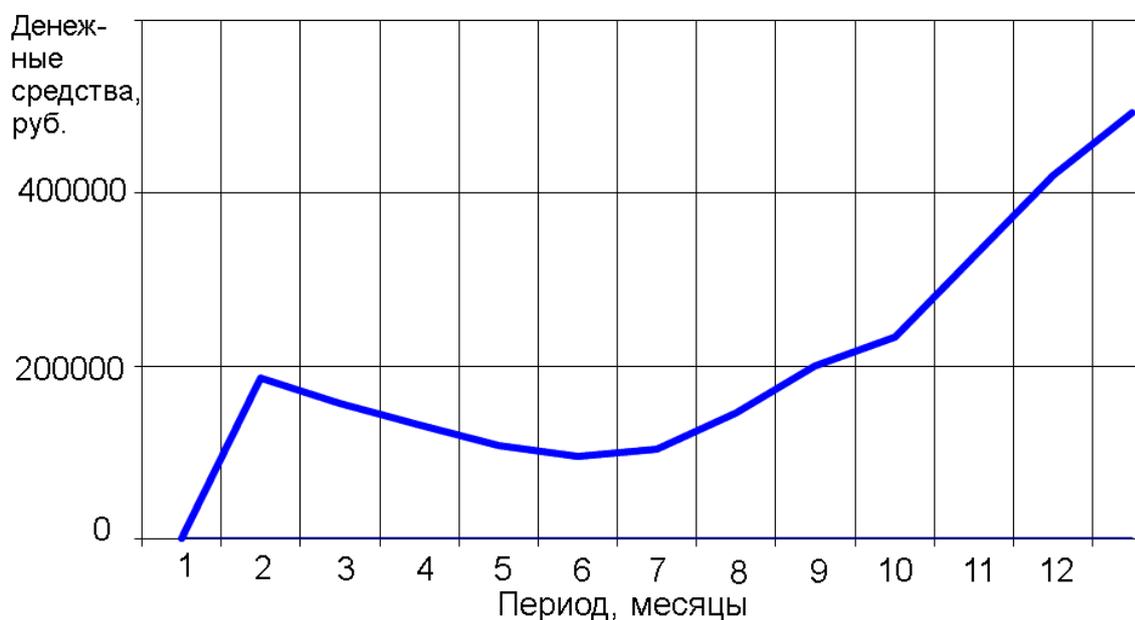


Рисунок 3 – График движения денежных средств

### 15. Возможные сферы развития разработки

При рассмотрении данной разработки необходимо отметить, что на основе эффекта винтовой неустойчивости тока могут быть созданы датчики различных физических величин.

В настоящее время существует приблизительно следующее распределение доли измерений различных физических величин в промышленности: температура – 50%, расход (массовый и объемный) – 15%, давление – 10%, уровень – 5%, количество (масса, объем) – 5%, время – 4%, электрические и магнитные величины – менее 4%.

Осуществление проекта предполагает в будущем проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для определения возможности создания различных датчиков. К настоящему времени были проведены научные

исследования и имеются предпосылки для разработки датчиков давления, линейного и углового перемещения.

### **Заключение**

Целью данной работы было изучение перспектив коммерциализации разработки «Осцилляторный сенсор температуры». В рамках данной работы было выяснено, что осцилляторные сенсоры температуры имеют значительные конкурентные преимущества по сравнению с другими средствами измерения температуры, используемыми в настоящее время. Осцилляторные сенсоры имеют широкий диапазон рабочих температур, что делает возможным их использования во многих сферах деятельности. Также осцилляторные сенсоры имеют высокую амплитуду информационного сигнала, не требующую усиления и стабильную выходную характеристику, обладают высокой чувствительностью и линейностью выходной характеристики. Частотный выход позволяет упростить сопряжение сенсора с компьютером, что является несомненным преимуществом разработки в современных условиях, когда все большее количество предприятий используют автоматизированные системы.

Рассматриваемая разработка может применяться для измерения температуры в таких сферах, как нефтегазовая отрасль, животноводство и птицеводство, тепличные хозяйства. Осцилляторные сенсоры могут применяться в системах кондиционирования и климат-контроля, системах пожарной охраны, для мониторинга температуры различных помещений. Способность передавать данные на большие расстояния по проводной линии без помех делает использование осцилляторных сенсоров удобным для таких сфер применения, как геология, изучение морских глубин и добыча нефти и газа.

В рамках данной работы были проведены патентные исследования по базам данных России, США, Японии и Европейского патентного ведомства, в результате которых общее количество отобранных охранных документов за период с 1977 по 2012 годы составило 80 патентов. Проведенный анализ показал, что, несмотря на большое количество датчиков и систем для измерения температуры, осцилляторные сенсоры не имеют близких аналогов, и разработка обладает патентной чистотой.

При проведении маркетинговых исследований был изучен рынок средств измерения температуры в России и за рубежом и перспективы его развития, определены основные конкуренты и сферы деятельности потенциальных потребителей. Исследования показывают, что рынок датчиков температуры имеет большую емкость (более 300 000 датчиков в год), однако из-за значительной конкуренции сложно занять большую долю рынка.

При анализе бизнес-модели был определен перечень продуктов и услуг, которые будут предлагаться потребителям.

Проведенные ранее расчеты показали, что вариант организации производства, при котором полный производственный цикл предприятие осуществляет самостоятельно, является экономически нецелесообразным. Поэтому при реализации проекта предполагается, что такие этапы производственного цикла, как производство полупроводниковых элементов, сборка и тестирование изделий, будут переданы на аутсорсинг.

При осуществлении проекта планируется проведение НИОКР для разработки датчиков различных физических величин, что поможет расширить ассортимент выпускаемой продукции. Сумма затрат, необходимых для проведения НИОКР, составляет 250 000 рублей.

Также в рамках данной работы были проработаны такие разделы, как выбор способа охраны интеллектуальной собственности, подтверждение соответствия продукции в системе ГОСТ Р, контроль качества готовой продукции и мероприятия по выводу на рынок и продвижению продукции. Также был разработан финансовый план и проведена оценка эффективности проекта.

В связи с вышесказанным, основной стратегией коммерциализации разработки «Осцилляторный сенсор температуры» является организация производства с участием предприятия-аутсорсера, а также проведение НИОКР для разработки датчиков других физических величин с целью внедрения их производство и вывода на рынок.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. V.I. Gaman and P.N. Drobot. Threshold Characteristics of Silicon Oscillators // Russian Physics Journal. 2001. V.44. N.1. P.55-60.
2. V.I. Gaman and P.N. Drobot. Threshold Frequency of Helical Electron-Hole Plasma Instability // Russian Physics Journal. 2001. V.44. N.11. P.1175-1181.
3. Гаман В.И., Дробот П.Н. Осцилляторные сенсоры: преимущества, разработки и пути развития. // Труды 9 международной конференции Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V. – Томск, ТГУ, 2006. – с.549-552.
4. Тетёркина Н.Г., Дробот П.Н. Инновационная привлекательность осцилляторных сенсоров с частотным выходом // Инноватика-2009: сборник материалов пятой всероссийской научно-практической конференции.– Томск, 2009. – с.39-42.
5. Дробот П.Н., Тетёркина Н.Г. Инновационность и применение осцилляторного сенсора температуры с частотным выходом // Средства и системы автоматизации, проблемы и решения: материалы 10-й международной научно практической конференции компании ЭлеСи.-Томск, 2009. – с.76-78.
6. Дробот П.Н., Тетёркина Н.Г. Осцилляторные сенсоры температуры с частотным выходом: патентно-информационные исследования и анализ рынков // Средства и системы автоматизации: материалы юбилейной международной научно практической конференции компании ЭлеСи. – Томск, 2010. – с.41–43.

7. Тетёркина Н.Г., Дробот П.Н. Кремниевый осцилляторный сенсор температуры: аналоги и преимущества // Инноватика-2010: сборник материалов шестой всероссийской научно-практической конференции.– Томск, 2010. – с.119-123.
8. Тетёркина Н.Г., Дробот П.Н. Патентные и маркетинговые исследования разработки «Осцилляторный сенсор температуры с частотным выходом // Инноватика-2011. сборник материалов седьмой всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2011 г. – с.120–123.
9. Тетёркина Н.Г., Дробот П.Н. Маркетинговый, финансовый анализ и анализ бизнес-модели разработки «Осцилляторный сенсор температуры с частотным выходом» // Инноватика-2012. сборник материалов седьмой всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2012 г. – с.193–196.
10. Лунев С.О., Дробот П.Н. Осцилляторный сенсор для океанических систем мониторинга температуры // Инноватика-2009: сборник материалов пятой всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2009 г. – с.36–38.
11. Боженко О.Ю., П.Н. Дробот. Применение осцилляторных сенсоров для систем мониторинга температуры почвы в теплицах // Инноватика-2009: сборник материалов пятой всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2009 г. – с.29–31.
12. Дробот П.Н., Косинцев В.И. Осцилляторный сенсор температуры для систем мониторинга в нефтегазодобыче // Интенсификация добычи нефти: Труды 2 международной научно-практической конференции. – Томск: 7-8 сентября 2006 г., ТПУ и университет Хериот-Ватт (г. Эдинбург, Великобритания). 2006. – с. 231-234.

О.З. Алюкаева (студент, 6 курс)  
Институт теплофизики СО РАН, Россия,  
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, E-mail: [aleks@itp.nsc.ru](mailto:aleks@itp.nsc.ru)  
Научный руководитель – Н.С. Буфетов, к.т.н., с.н.с. ИТ СО РАН

## СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ ОПТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ (НА ПРИМЕРЕ ЛИТИЯ БРОМИДА)

### Реферат

*Ключевые слова:* абсорбция, показатель преломления, концентрация водного раствора соли бромистого лития.

В работе представлены результаты исследования методики по определению плотности и концентрации водных растворов солей на примере раствора бромистого лития, используя изменения показателя преломления в зависимости от плотности раствора. Получены значения показателя преломления для раствора LiBr от концентрации и температуры для монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda=0,66$  мкм и  $\lambda=0,532$  мкм при изменении концентрации от 0 до 60%.

### Введение

Энергосбережение сегодня является актуальнейшей задачей.

Одним из способов решения этой задачи являются тепловые насосы. А именно абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы (АБТН). АБТН являются высокоэффективным энергосберегающим оборудованием для теплоснабжения различных объектов и предназначены для нагрева воды, с использованием в качестве источника энергии теплоты греющего пара с давлением или топлива – природного газа, а также низкопотенциальной сбросной или природной теплоты от различных источников. Доля дешевой низкопотенциальной теплоты, используемой в АБТН для выработки полезной теплоты, составляет около 40 %. АБТН имеют исключительные потребительские свойства: высокую эффективность, экологическую чистоту, низкий уровень шума при работе, простоту в обслуживании, длительный срок службы, полную автоматизацию [1]. Для АБТН не требуется больших количеств электроэнергии, как для парокomppressorных тепловых насосов. Рабочим веществом (хладагентом) в АБТН является вода, абсорбентом – водный раствор соли бромистого лития.

АБТН могут использоваться для получения горячей воды на нужды отопления и горячего водоснабжения, для нагрева и охлаждения технологических сред в промышленности, энергетике, сельском хозяйстве и т.д.

Важным показателем работы АБТН является технико-экономический показатель, в который входит отношение выделенной или поглощенной энергии этого устройства к его массе. В абсорбционных машинах абсорберы являются наименее энергонапряженными участками, т.е. выше упомянутый показатель у них наименьший, по сравнению со всеми другими узлами. Естественно, ставится задача увеличения их энергонапряженности. Поэтому при разработке или исследовании работы абсорберов необходимо иметь оперативный способ определения этого параметра, характеристикой которого является изменение концентрации абсорбента.

Задачей данной работы явилась разработка методики и аппаратуры для контроля изменения концентрации сорбента в процессе работы АБТН.

### 1. Методика определения показателя преломления раствора LiBr

Наиболее простым способом определения показателя преломления является стеклянная кювета с плоскопараллельными стенками и помещенной внутрь призмы с известными углами и показателем преломления стекла, заполненная раствором бромистого лития.

Система, которая позволяет определить показатели преломления жидкостей, представлена на рис. 1. В кювету с призмой наливается исследуемая жидкость. Рассмотрим распространение лучей на рис. 1.

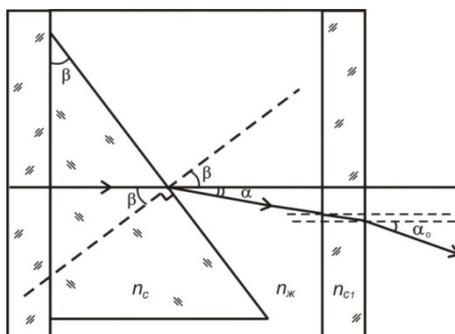


Рис. 1. Кювета с призмой для определения показателя преломления  $n$  раствора *LiBr*

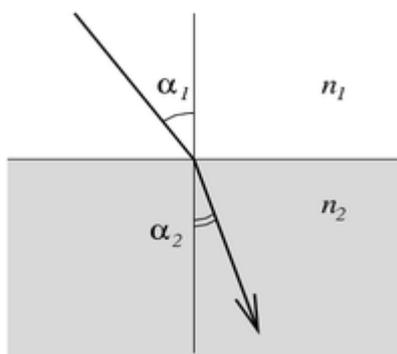


Рис. 2

Закон Снеллиуса описывает преломление света на границе двух сред (рис. 2).

Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (1.1)$$

Уравнения, описывающие ход луча, падающего перпендикулярно на измерительную кювету (рис. 1), имеют следующий вид:

$$n_{\text{пр}} \sin \beta = n_{\text{ж}} \sin(\alpha + \beta) \quad (1.2)$$

$$n_{\text{ж}} \sin \alpha = \sin \alpha_0 \quad (1.3)$$

С помощью тригонометрических преобразований выражение для показателя преломления раствора бромистого лития (*LiBr*) приобретает вид:

$$n_{\text{ж}} = \sqrt{\sin^2 \alpha_0 + (n_c - \sin \alpha_0 \operatorname{ctg} \beta)^2} \quad (1.4)$$

Так как мы будем использовать призму с известными параметрами ( $n_c$  и угол  $\beta$ ), то для определения показателей жидкостей достаточно определить  $\alpha_0$ .

Для этого необходимо точно знать углы призмы и показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма.

## 2. Результаты эксперимента

### 2.1. Измерение температуры

Для определения температуры была изготовлена термопара из медной и константановой проволок диаметром 0,2 мм. С целью защиты спая от электролита (раствора *LiBr*) термопара помещалась в капилляр диаметром 1,5 мм, герметично заглушенный с одной стороны. Градуировка термопары производилась в комплекте с прибором – мультиметром АРРА – 109N и ртутным термометром 0-50/0,1<sup>0</sup>. Градуировочные результаты описываются в диапазоне от 0-50<sup>0</sup> С зависимостью

$$T = -6,39443 \cdot 10^{-7} \cdot E^2 + 2,76268 \cdot 10^{-2} \cdot E + 0,15$$

с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,99999$ . Здесь  $T$  – градус С,  $E$  – мкВ.

### 2.2. Измерение показателя преломления

В результате проведенных исследований был получен показатель преломления раствора бромистого лития для двух длин волн:  $\lambda=0,66$  мкм (красный лазер) и  $\lambda=0,532$  мкм (зеленый лазер) и разных концентраций. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Из рисунка видно, что показатель преломления для зеленого лазера  $n(\lambda)$  постоянно превышает  $n(\kappa)$ . Максимальное превышение составляет  $8,4 \cdot 10^{-3}$ .

При увеличении масштаба рисунка (рисунок 4) наблюдается расслоение данных: при более высоких температурах показатели преломления имеют более низкие значения.

Таблица 1. Показатель преломления раствора LiBr.

Т, град °С	ρ, кг/м <sup>3</sup>	ξ, %	n <sub>ж ср</sub>	
			Красный лазер	Зеленый лазер
24,5	997,2	0	1,33089	1,33489
24,9	1044	6,485	1,33998	1,34421
25,1	1078	10,946	1,34696	1,35128
25,1	1118,5	15,8	1,35506	1,35985
25,2	1162	20,52	1,36386	1,36881
25,3	1209	25,295	1,3727	1,37806
25,3	1261	30,378	1,38295	1,38847
25,3	1321	35,584	1,39462	1,40118
27,7	1440,5	44,537	1,41757	1,42461
25,6	1454,5	45,386	1,42087	1,42804
25,5	1538,5	50,515	1,43654	1,44389
25,7	1623	55,234	1,45327	1,46127
25,6	1701	59,283	1,46725	1,47565

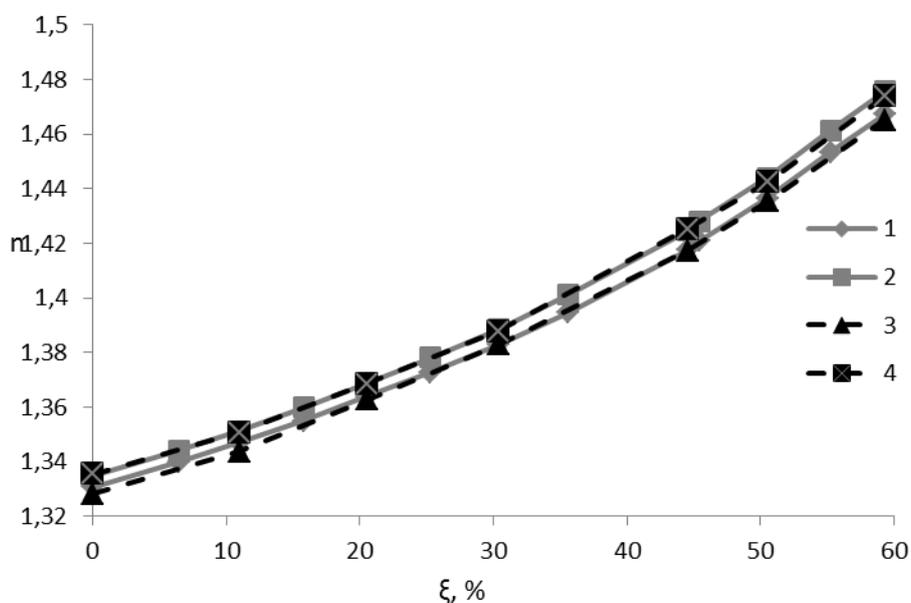


Рис. 3. Зависимость показателя преломления от концентрации раствора бромистого лития для 2-х лазеров: 1, 3 – λ = 660 нм при Т = 25<sup>0</sup>С, Т = 38<sup>0</sup>С соответственно, 2, 4 – λ = 532 нм при Т = 25<sup>0</sup>С, Т = 38<sup>0</sup>С соответственно

Максимальная разница составляет 0,002.

Согласно [4] квадрат показателя преломления  $n^2$  пропорционален количеству молекул в единице объема. Влияние же температуры на показатель преломления определяется двумя факторами: изменением количества частиц жидкости в единице

объема и зависимостью поляризуемости молекул от температуры. Вторым фактором становится существенным лишь при очень большом изменении температуры.

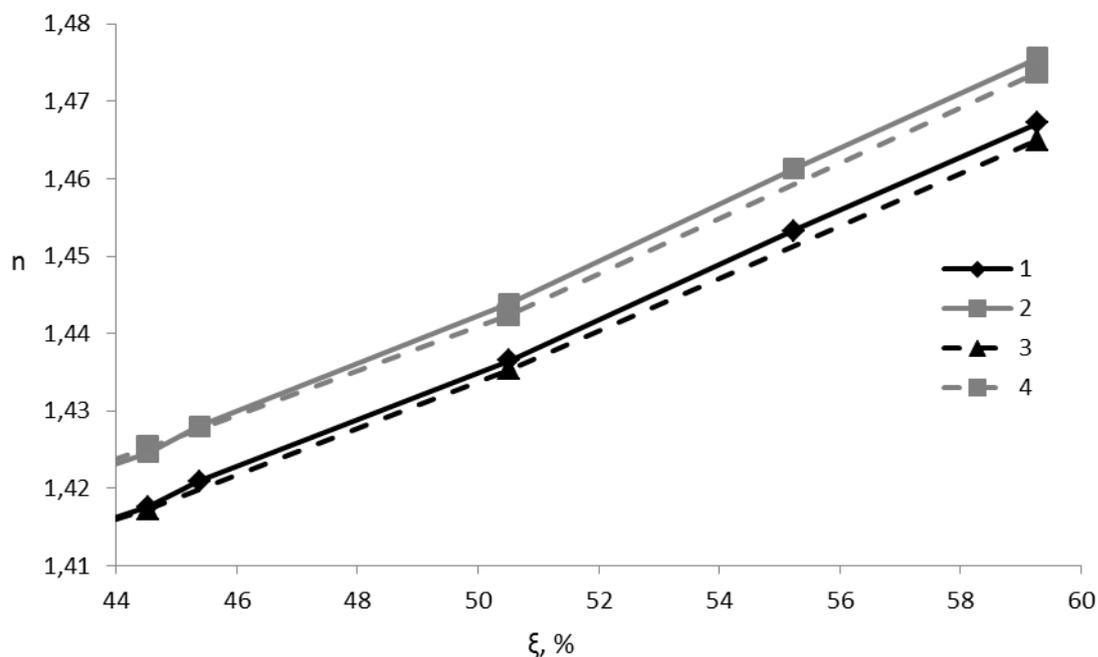


Рис. 4. Зависимость показателя преломления от концентрации раствора LiBr для 2-х длин волн при комнатной и повышенной температурах: 1 –  $\lambda = 660$  нм,  $T = 25$  °C, 2 –  $\lambda = 532$  нм,  $T = 25$  °C, 3 –  $\lambda = 660$  нм,  $T = 38$  °C, 4 –  $\lambda = 532$  нм,  $T = 38$  °C

Температурный коэффициент показателя преломления пропорционален температурному коэффициенту плотности. Поскольку все жидкости при нагревании расширяются, то их показатели преломления уменьшаются при повышении температуры. Температурный коэффициент зависит от величины температуры жидкости, но в небольших температурных интервалах может считаться постоянным. Для подавляющего большинства жидкостей температурный коэффициент лежит в узких пределах от  $-0,0004$  до  $-0,0006$  1/град. Важным исключением является вода и разбавленные водные растворы ( $-0,0001$ ), глицерин ( $-0,0002$ ), гликоль ( $-0,00026$ ). Линейная экстраполяция показателя преломления допустима на небольшие разности температур ( $10\text{--}20^\circ\text{C}$ ). Точное определение показателя преломления в широких температурных интервалах производится по эмпирическим формулам вида:  $n^t = n^0 + at + bt^2 + \dots$

Главную роль в оптической жизни атома играет электрон. При этом следует иметь в виду, что речь идёт об электронах, частоты, движения которых имеют тот же порядок величины, что и частота световой волны. Мы будем называть их оптическими электронами. Показатель преломления зависит от частоты  $\omega$  внешнего поля и от числа атомов  $N_0$  в единице объёма.

$$s = n^2 = 1 + \frac{4\pi e^2 N}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (1.6)$$

Если принять во внимание, что в веществе может быть несколько сортов зарядов, способных к колебаниям с различными зарядами  $e_i$  и массами  $m_i$ , то формула заменится выражением:

$$n^2 = 1 + \sum \frac{4\pi e_i^2 N}{m(\omega_{0i}^2 - \omega^2)} \quad (1.7)$$

где  $m_i$  и  $e_i$  – массы и заряды отдельных сортов частиц, соответствующих различным частотам  $\omega_{0i}$ . Оптическое поведение молекул каждой компоненты остается тем же независимо от того, взята ли данная компонента отдельно или в смеси с другими. Ещё большее значение имеет правило, согласно которому рефракцию сложного химического соединения можно вычислить, складывая рефракции элементов его составляющих, при этом надо учитывать наличие кратных химических связей и других особенностей строения молекулы, от которых зависят отдельные слагаемые, входящие в сумму, определяющую молекулярную рефракцию.

Таким образом, если количество молекул в единице объема является характеристикой плотности, можно полагать, что квадрат показателя преломления в соответствии с формулой (1.7) будет пропорционален количеству частиц вещества. Поэтому следует ожидать, что  $n^2$  будет пропорционален плотности раствора [4].

Полученные экспериментальные данные представлены на рисунке 5 в координатах  $n^2 - \rho$ . Видно, что все полученные значения показателя преломления независимо от температуры укладываются на одну прямую, для данных спектров.

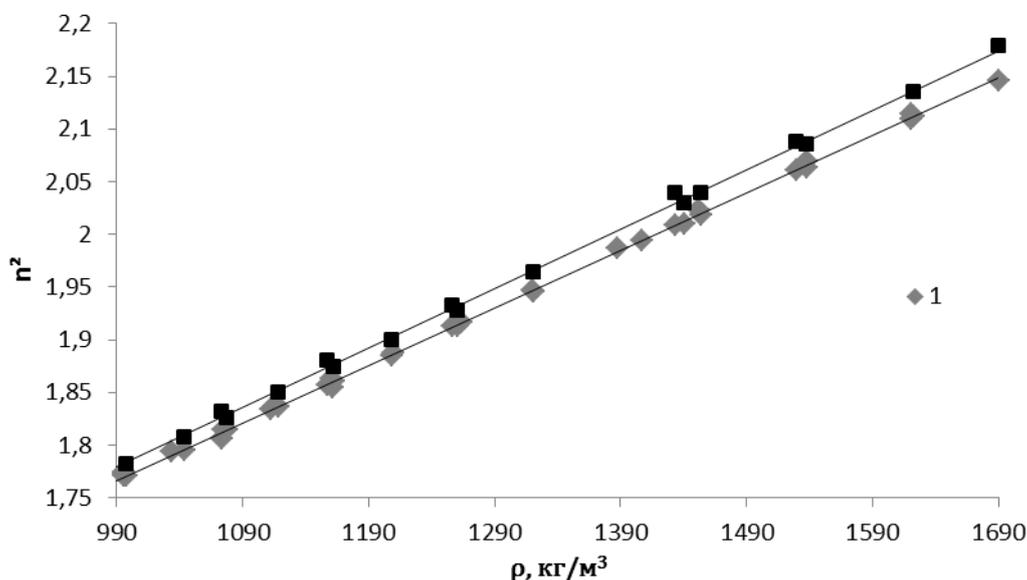


Рис. 5. Зависимость квадрата показателя преломления от плотности раствора для красного и зеленого лазера при комнатной и повышенной температуре.

1 – значения для красного лазера  $T_{комн}$ ,  $T_{повыш}$

2 – значения для зеленого лазера при тех же температурах

Полученные данные хорошо обобщаются формулой:  
для зеленого лазера

$n^2 = 5.64331 \cdot 10^{-04} \cdot \rho + 1.22055$  с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,998971$ ;

для красного лазера

$n^2 = 5,45401 \cdot 10^{-04} \cdot \rho + 1,22692$  и  $R^2 = 0,999611$ .

### 3. Разработка методики контроля и измерения концентрации

#### 3.1. Предварительные исследования

Требования, предъявляемые к разрабатываемой методике, были следующими: 1 – высокая чувствительность методики – сотые доли процента; 2 – высокая оперативность; 3 – анализируемый раствор не должен извлекаться из системы.

Предварительно были проведены численные исследования зависимости чувствительности методики от изменения угла призмы, концентрации раствора, разных спектров и угла падения луча. Показателем чувствительности в данном случае будет отношение изменения угла выхода к изменению концентрации.

За основу методики был взят тот же самый метод, который использовался при измерении показателя преломления (рис. 6). Отличие заключалось в том, что кювета герметичная и позволяющая осуществлять проток раствора, без извлечения его из системы.

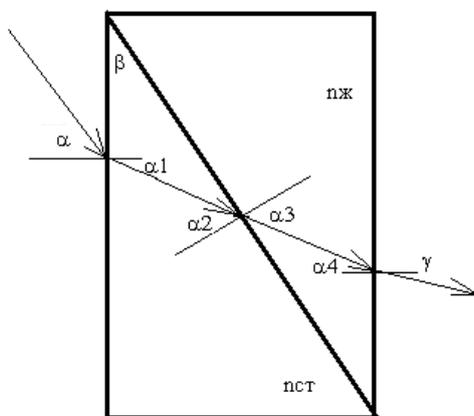


Рис. 6. Схема измерительной кюветы

Система уравнений, характеризующая прохождение луча через кювету с призмой и раствором (известно, что плоскопараллельные стенки кюветы не влияют на угол преломления луча, а только сдвигают его параллельно падающему) имеет вид: (1.8 – 1.13),

$$\sin \alpha = n_{\text{пр}} \sin \alpha_1 \quad (1.8)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \beta \quad (1.9)$$

$$n_{\text{ж}} \sin \alpha_3 = n_{\text{ст}} \sin \alpha_2 \quad (1.10)$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 - \beta \quad (1.11)$$

$$\sin \gamma = n_{жк} \sin \alpha_4 \quad (1.13)$$

Ввиду того, что падение луча на грань кюветы может быть отличным от нормали, прохождение границы воздух – стекло описывается уравнением (1.8). Уравнение (1.10) характеризует прохождение границы призмы стекло – жидкость. Уравнение (1.13) – выход луча из призмы.

Тогда угол выхода:

$$\gamma = \arcsin(n_{жк} \cdot \sin \alpha_4) \quad (1.14)$$

Подставив все значения (1.8 – 1.13) в уравнение (1.14), получается выражение для угла выхода:

$$\gamma = \arcsin[n_{жк} \cdot \sin(\arcsin\left(\frac{n_{жк}}{n_{пр}} \cdot \sin(\arcsin\frac{\sin \alpha}{n_{пр}} + \beta)\right) - \beta)] \quad (1.15)$$

$\alpha$  – угол падения;

$\gamma$  – угол выхода;

$\beta$  – угол призмы;

$n_{пр}$  – показатель преломления призмы;

$n_{жк}$  – показатель преломления раствора.

Основным параметром является чувствительность, а не угол выхода, тогда выражение для чувствительности имеет следующий вид:

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = \frac{d\gamma}{dn_{жк}} \cdot \frac{dn_{жк}}{d\rho} \cdot \frac{d\rho}{d\xi} \quad (1.16)$$

$\frac{d\gamma}{dn_{жк}}$  получается путем дифференцирования уравнения (1.15),

$$\frac{d\gamma}{dn_{жк}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (n_{жк} \sin \alpha_4)^2}} \cdot \left( \sin \alpha_4 - n_{жк} \cdot \cos \alpha_4 \cdot \frac{n_{жк}}{\sqrt{1 - \alpha_4^2}} \cdot \frac{n_{жк}}{n_{жк}} \cdot \sin \alpha_4 \right) \quad (1.17)$$

В пределах наших измерений ( $\xi = 50 \div 60\%$ ) зависимость  $\rho(\xi)$  можно представить как линейную функцию при постоянной температуре

$$\rho = a + b\xi \quad (1.18)$$

Так как функция линейная, то значения  $\xi$  и  $\rho$  берутся на небольшом участке из таблицы (приложение 2, [3]). Найдем значение  $a$  и  $b$ :

$$1616 = a + 55 \cdot b$$

$$1712 = a + 60 \cdot b$$

Получены значения:  $a = 560$ ,  $b = 19,2$ .

С учетом полученных значений перепишем выражение для  $\rho$  (1.18):

$$\rho = 560 + 19,2 \cdot \xi \quad (1.19)$$

Из уравнений (рис. 1.15)

$$n^2 = 5,64331 \cdot 10^{-04} \cdot \rho + 1,22055$$

$$n^2 = 5,45401 \cdot 10^{-04} \cdot \rho + 1,22692$$

для лазеров с длиной волны  $\lambda = 0,532$  мкм и для  $\lambda = 0,660$  мкм соответственно находим значение  $dn_{жк}/d\rho$

Для зеленого лазера:

$$\frac{dn_{\text{ж}}}{d\rho} = 2,821655 \cdot 10^{-04} \cdot (5,64331 \cdot 10^{-04} \cdot \rho + 1,22055)^{-1/2} \quad (1.20)$$

Для красного:

$$\frac{dn_{\text{ж}}}{d\rho} = 2,727005 \cdot 10^{-04} \cdot (5,45401 \cdot 10^{-04} \cdot \rho + 1,22692)^{-1/2} \quad (1.21)$$

Подставив (1.17-1.21) в выражение (1.16), получается уравнение для чувствительности:

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = \frac{1}{\sqrt{1-(n_{\text{ж}} \sin \alpha_4)^2}} \cdot \left( \sin \alpha_4 - n_{\text{ж}} \cdot \cos \alpha_4 \cdot \frac{n_{\text{ж}}}{\sqrt{1-\alpha_4^2}} \cdot \frac{n_{\text{ж}}}{n_{\text{ж}}} \cdot \sin \alpha_2 \right) \cdot 19,2 \cdot \frac{dn_{\text{ж}}}{d\rho} \quad (1.22)$$

В результате была получена зависимость чувствительности от угла падения при разных длинах волн ( $\lambda=0,66$  мкм и  $\lambda=0,532$  мкм), т.е. для красного и зеленого лазеров, которая приведена на рисунке 7.

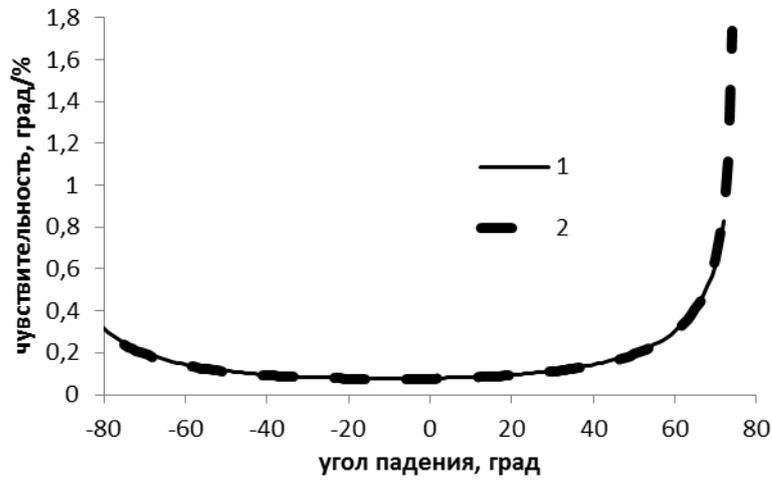


Рис. 7. Зависимость чувствительности от угла падения луча, для 2-х длин волн: 1 –  $\lambda = 532$  нм, 2 –  $\lambda = 660$  нм

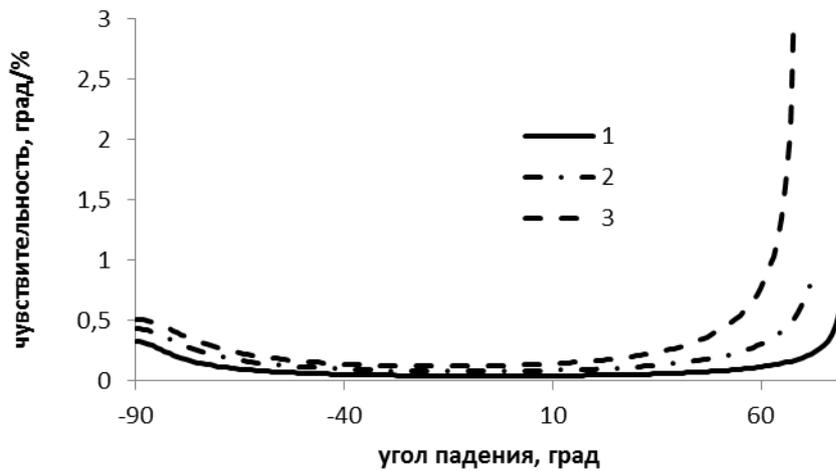


Рис. 8. Зависимость чувствительности от угла падения луча, при различных углах призмы: 1 –  $10^0$ , 2 –  $20^0$ , 3 –  $30^0$

Из графика видно, что чувствительность для разных длин волн почти совпадает. Максимальное отличие составляет 0,3% при угле падения луча на призму более  $60^{\circ}$ .

Была рассмотрена зависимость чувствительности от угла падения при разных углах призмы, приведенная на рисунке 8.

Из графика можно видеть, что при большем угле призмы начинается более раннее увеличение чувствительности.

Была исследована зависимость угла выхода от угла падения и излом луча (рисунок 9).

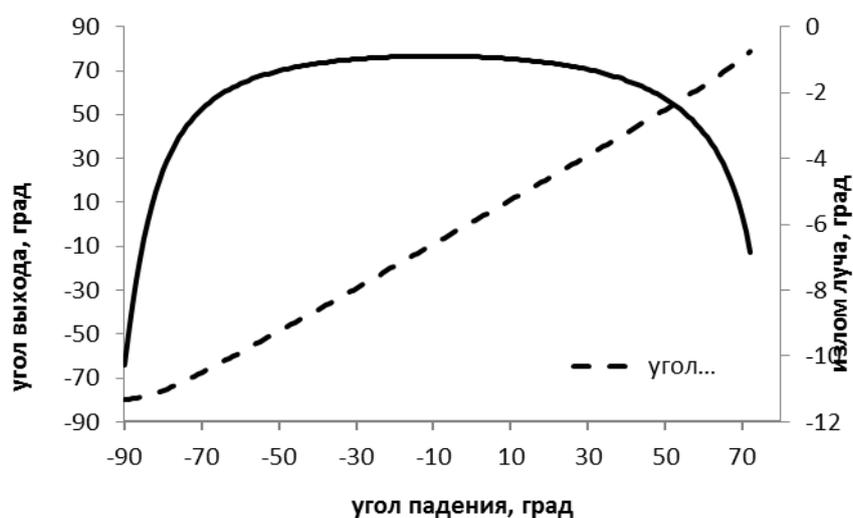


Рис. 9. Зависимость угла выхода от угла падения и излом луча

В широком диапазоне падения луча от  $-60$  до  $+50$  градусов излом не превышает 2 градусов.

Таким образом, численные исследования приводят к следующим выводам:

1. Чувствительность мало зависит от изменения длины волны осветителя.
2. Чувствительность растет с увеличением угла падения луча на грань.
3. При увеличении угла призмы рост чувствительности начинается раньше с увеличением угла падения.
4. Угол излома не превышает 2 градуса в широком диапазоне падения луча на грань.

### 3.2. Кювета

На основе данных расчетов была сконструирована и изготовлена герметичная, проточная кювета.

Схема кюветы и её общий вид приведены на рисунках 10, 11.

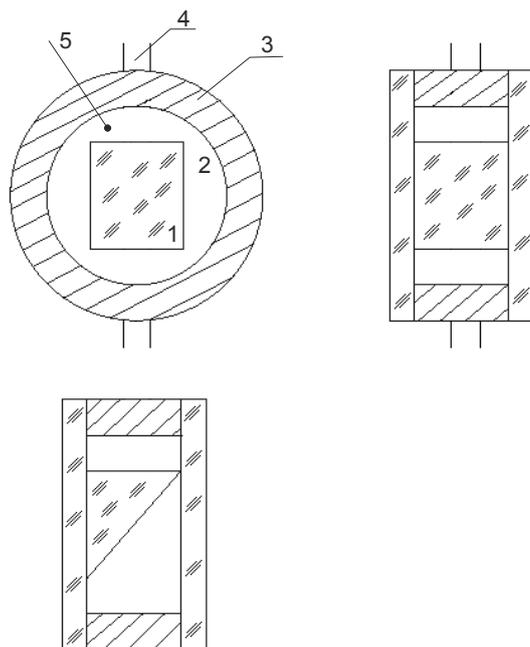


Рис. 10. Схема кюветы

- 1 – стеклянная призма с углом при вершине  $\beta = 22^{\circ}31'58''$
- 2 – полость, заполненная раствором LiBr
- 3 – корпус кюветы, выполненный из титанового сплава
- 4 – отверстия для ввода-вывода раствора
- 5 – термопара

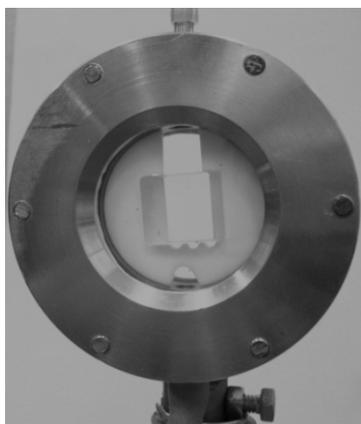


Рис. 11. Общий вид кюветы

### 3.3. Макет экспериментальной установки

Исследования проводились на макете прибора, схема которого приведена на рисунках 12 и 13.

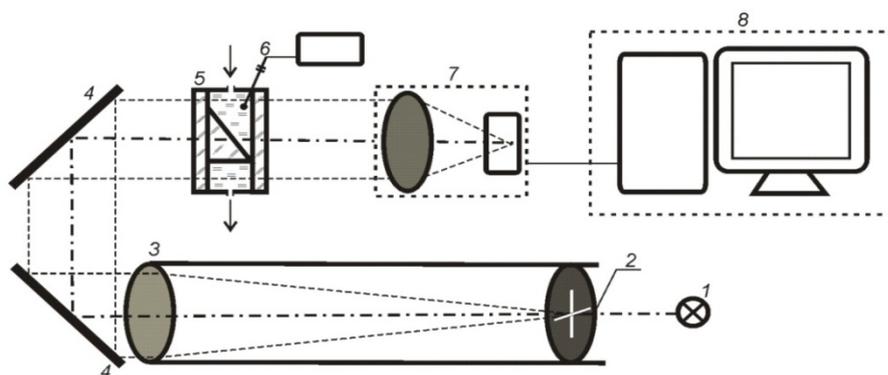


Рис. 12. Схема измерительной установки: 1 – монохроматический осветитель (лазер); 2 – крестовидная диафрагма; 3 – коллиматор; 4 – поворотные зеркала расположенные под углом 45°; 5 – кювета с призмой и исследуемым водным раствором (LiBr); 6 – термопара; 7 – Web-камера; 8 – ПК



Рис. 13. Общий вид установки

### 3.4. Экспериментальная часть

В процессе эксперимента производилось обязательное измерение температуры раствора, находящегося в измерительной кювете. В отличие от измерений гониометром, в этом случае на камере фиксировались 2 изображения «креста»: первое (слева) – прямое (прошедшее над призмой) и второе (справа) – прошедшее через призму.

На рисунках 14, 15 приведены фотографии изображения «крестов» полученных при изменении угла падения на грань кюветы для красного и зеленого лазеров.

Видно, что в соответствии с расчетами для одной и той же концентрации происходит увеличение чувствительности при увеличении угла падения.



Рис. 14. Красный лазер ( $\lambda=0,66$  мкм),  $\xi = 60\%$



Рис. 15. Зеленый лазер ( $\lambda=0,532$  мкм),  $\xi = 60\%$

На рис. 16 приведена сборка фотографий изображения «крестов» при различных концентрациях раствора, залитого в измерительную кювету при нормальном падении луча.

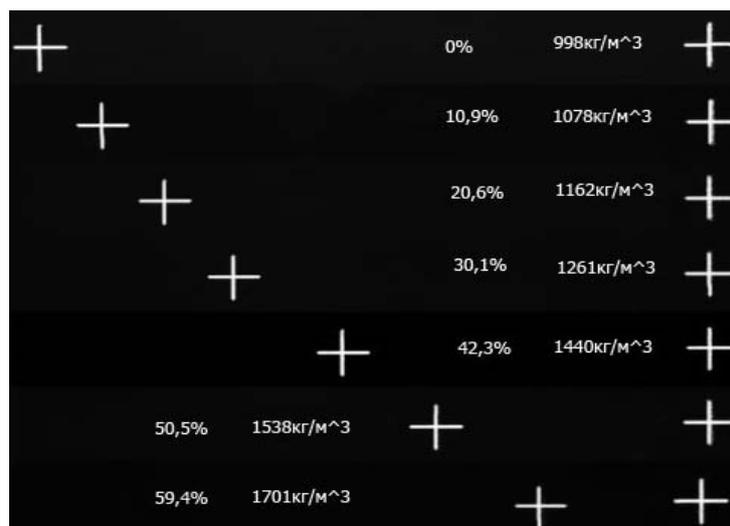


Рис. 16. Отклонения изображения для различных концентраций раствора

В зависимости от разности показателей преломления стеклянной призмы и раствора изменялось расстояние между изображениями, которое определялось в пикселях.

Ввиду некоторого несовершенства юстировки прибора при прямом и преломленном прохождении изображения освещенность получается различной, что хорошо заметно на графике освещенности вертикальных элементов (рис. 17) При определении горизонтальных координат элементов «крестов» была сделана статистическая оценка погрешности нахождения расстояний между ними. Так воспроизводимость при определении координаты опорного (прямого) «креста» имеет

среднее квадратическое отклонение (СКО) равное 1,2 пикселя, преломленного (правого) – 0,6. Таким образом, средняя погрешность при определении расстояния между «крестами» оценивается не более 2-х пикселей.

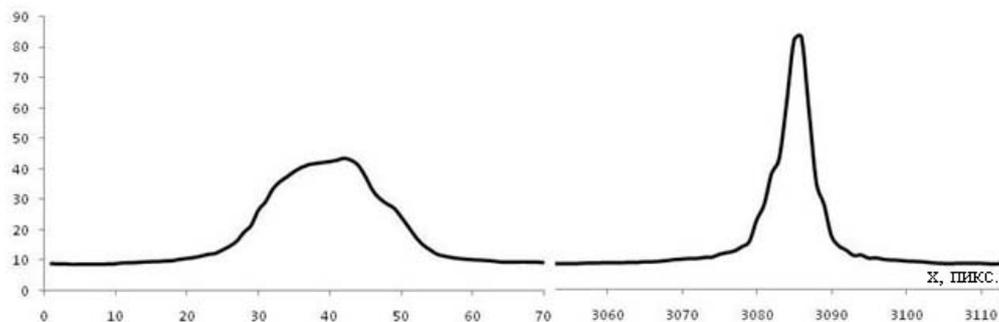


Рис. 17. Интенсивность освещенности вертикальных элементов «крестов»

На рис. 18,*а* приведены зависимости расстояний между «преломленным» изображением и прямым от концентрации раствора при различных температурах раствора. При повышении температуры происходит расслоение зависимости (расстояние между пиками увеличивается). Это отчетливо видно на увеличенном фрагменте этого рисунка (рис. 18,*б*).

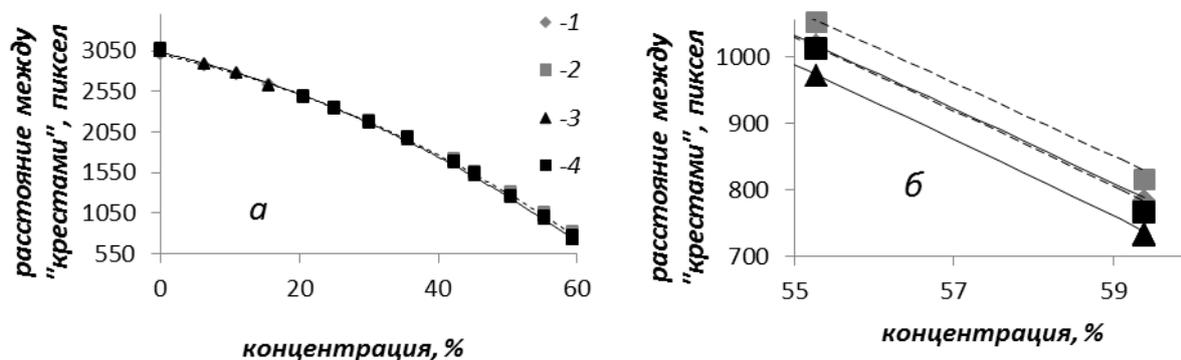


Рис. 18. *а* – зависимости расстояний между изображениями в зависимости от концентрации, при температурах  $T_1 = 23,8 \pm 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 39,2 \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; *б* – фрагмент графика ба в области  $55 \div 59,5\%$ . 1 – красный лазер,  $T_1$ , 2 – красный лазер,  $T_2$ , 3 – зеленый лазер,  $T_1$ , 4 – зеленый лазер,  $T_2$

Известно, что плотность вещества оказывает основное влияние на его показатель преломления. Поэтому с целью обобщения зависимости от концентрации  $\zeta$  и температуры  $T$  и использования в дальнейшем при определении концентрации раствора результаты были представлены как зависимость плотности раствора от расстояния между изображениями. Результаты этого обобщения приведены на рис. 19. Видно, что расслоение от температуры исчезло. Поэтому для практического определения

плотности раствора на данной установке можно рекомендовать использование следующих формул, полученных при построении линий тренда.

$$\rho_{\text{кр}} = -0,31606x + 1\,947,16596$$

$$\rho_{\text{зел}} = -0,30613x + 1\,923,90493$$

(величины достоверности аппроксимации для точек (красного лазера) –  $R^2 = 0,99959$ , а для точек зеленого –  $R^2 = 0,99963$ )

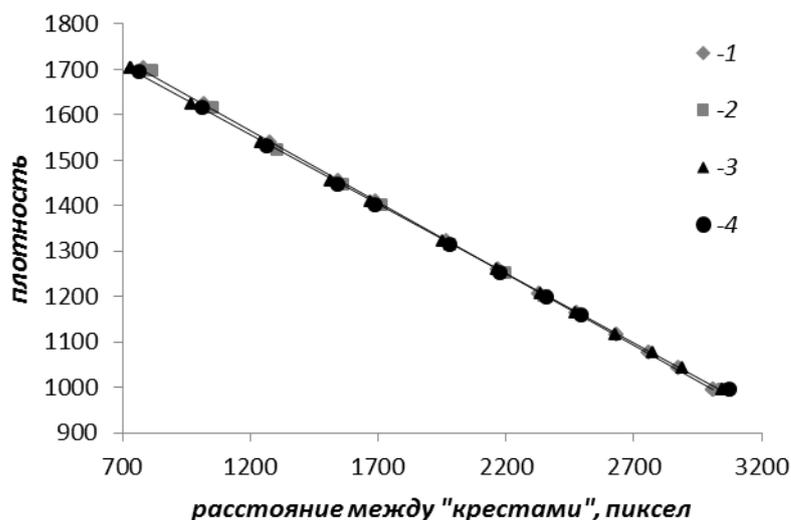


Рис. 19. Зависимость плотности от расстояния между изображениями. 1 – красный лазер, T<sub>1</sub>, 2 – красный лазер, T<sub>2</sub>, 3 – зеленый лазер, T<sub>1</sub>, 4 – зеленый лазер, T<sub>2</sub>

На основании таблиц [3] зависимостей  $\zeta = f(T, \rho)$  восстанавливаются значения концентрации раствора.

Использование данной методики в комплекте с используемой аппаратурой обеспечивает чувствительности метода для обоих спектров лазеров при определении плотности не хуже  $0,32 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{пикс}$  и концентрации –  $0,02\%/\text{пикс}$ .

### Заключение

1. В результате проведенных исследований получены показатели преломления водного раствора бромистого лития в диапазоне его концентрации от 0 до 60% для двух длин волн монохроматического излучения: красного –  $\lambda = 0,66 \text{ мкм}$  и зеленого –  $\lambda = 0,532 \text{ мкм}$ .

2. Показано, что зависимость показателя преломления от концентрации и температуры обобщаются с помощью одной переменной – плотности раствора.

3. Создан действующий макет прибора и разработана методика определения концентрации водного раствора бромистого лития оптическим методом, обладающая высокой чувствительностью и оперативностью.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. СПб.: СПбГУНиПТ, 2005 – 338с.
2. Арбузов В.А., Буфетов Н.С., Ляшенко Т.Ю. Определение концентрации бромистого лития в водном растворе по коэффициенту преломления // Труды X Международной конференции «Оптические методы исследования потоков», 23–26 июня, 2009 г., Москва. М.: МЭИ. – С. 310–313.
3. Н. Löver Termodinamischen und physicalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid Lösung, Dissertation, Karlsruhe, 1960.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. Учебное пособие: Для вузов. 6-е изд. стереот.–М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Ш.А. Ахмедова (студентка, 1 курс магистратуры)  
Сибирский Государственный Аэрокосмический Университет им. академика  
М.Ф. Решетнева  
Научный руководитель – Е.С. Семенкин, доктор технических наук, профессор,  
СибГАУ

## ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОРТФЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭВОЛЮЦИОННОГО ТИПА

### Реферат

*Ключевые слова:* стайный алгоритм, бинарный стайный алгоритм, оптимизация, инвестиционный портфель, алгоритм светлячков, алгоритм летучих мышей, алгоритм стаи волков, алгоритм кукушек.

Цели исследования:

1. Разработка математических моделей, обеспечивающих формализацию принятия решений при оценке и выборе инвестиционных проектов и формировании инвестиционных программ.

2. Решение практической задачи формирования инвестиционного портфеля с помощью «стайного» алгоритма оптимизации, модифицированного для решения бинарных одно- и многокритериальных задач.

3. Создание программного продукта, реализующего прогнозирование данных при помощи интеллектуальных информационных технологий, автоматически сгенерированных эволюционными алгоритмами.

4. Разработка математических моделей для оценивания эффективности инвестиционных проектов и самонастраивающегося стайного алгоритма, позволяющего решать задачи статической и динамической оптимизации для управления инвестиционными проектами и формированием инвестиционных портфелей.

5. Разработка и реализация эволюционных алгоритмов, которые впоследствии будут взяты за основу при разработке нового самоадаптивного алгоритма, предназначенного для прогнозирования и последующего принятия решения при формировании инвестиционного портфеля.

В результате проведения исследования на тестовых задачах была установлена высокая эффективность стайного алгоритма и его частных случаев, а также высокая эффективность его бинарной модификации, при решении одно- и многокритериальных задач безусловной и условной оптимизации.

Разработаны программы для алгоритмов, а также их параллельные реализации стайных алгоритмов. Решены две практические задачи как в однокритериальной, так и в многокритериальной постановке.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные исследователи теории и практики анализа реальных инвестиций идут по пути совершенствования формальных моделей и инструментальных средств, разрабатывая все более приближенные к реальности подходы. Однако на этом пути появляется проблема противоречия между совершенствованием моделей и наличием средств для их исследования. Попытка приблизить модели к реальности приводит к их усложнению с точки зрения формальной математики – появляются нелинейные зависимости, вычислительно сложные выражения, возникают сложные задачи оптимизации, не решаемые средствами классической теории оптимизации, с которой обычно знакомы экономисты. В то же время, привлечение более мощных средств затруднено недостаточным знакомством специалистов с соответствующими разделами математики и интеллектуальными информационными технологиями.

На разрешение данной проблемы, актуальность которой не вызывает сомнений, и ориентирован этот проект. В качестве пути решения данной задачи может выступать использование неклассических алгоритмов оптимизации, которые применяются в сложных ситуациях, а также автоматизация идентификации математических моделей. Полезность подобного решения заключается в отсутствии необходимости для конечного пользователя в знаниях из области оптимизации, интеллектуальных технологий, математического моделирования и т.д.

Широко известные методы математического программирования представляют собой детерминированную итерационную процедуру пошагового улучшения одного текущего решения. Эффективность алгоритмов математического программирования основывается на полном использовании удобных с точки зрения оптимизации свойств (выпуклость, гладкость, и т.п.) целевых функций, которые, к тому же, полагаются известными заранее. Для многих практических задач такие свойства либо не выполняются, либо об этом нет информации. Для решения таких задач в настоящее время используются алгоритмы, принципиально отличающиеся от алгоритмов математического программирования – недетерминированные и работающие одновременно с большим количеством текущих решений, являющиеся более эффективными и универсальными.

Одним из таких алгоритмов является стайный алгоритм (Particle Swarm Optimization, PSO) [1]. Стайный алгоритм – метод численной оптимизации, базирующийся на моделировании поведения популяции частиц в пространстве оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции. Данный метод привлекателен простотой реализации, он может использоваться для решения многих задач, включая обучение нейросетей, задач поиска минимума функции, а также задач, типичных для генетических алгоритмов. PSO показал свою эффективность и в настоящее время является предметом изучения. Постоянно предлагаются новые варианты алгоритма для улучшения производительности метода.

В данной работе предлагается использование гибридного алгоритма, использующего PSO и следующие метаэвристики: алгоритм светлячков (Firefly Algorithm, FFA) [2], алгоритм летучих мышей (Bat Algorithm, BA) [3], алгоритм стаи волков (Wolf Pack Search Algorithm, WPS) [4] и алгоритм кукушек (Cuckoo Search Algorithm, CSA) [5]. Главная практическая ценность предлагаемого подхода состоит в разработке и использовании многокритериальных моделей и самонастраивающихся многоагентных стохастических алгоритмов для оценивания эффективности инвестиционных проектов, позволяющих автоматически формировать интеллектуальные информационных технологии прогнозирования экономических показателей и математические модели инвестиционного анализа, а также решать возникающие при этом задачи статической и динамической оптимизации для управления инвестиционными проектами и формирования инвестиционных портфелей.

### **Применение стайного алгоритма для решения однокритериальных задач оптимизации**

Первоначально PSO был создан для задач с вещественными переменными. Однако в настоящий момент использование алгоритмов расширилось вплоть до дискретных задач и задач с бинарными переменными. Чтобы расширить версию PSO, работающую с вещественными переменными, в бинарное/дискретное пространство, наиболее важная часть – понять смысл таких понятий, как: траектория, скорость в бинарном/дискретном пространстве. Кеннеди и Эберхарт используют скорость и вероятность для определения является ли состояние частицы  $x_{id}$  нулем или единицей [6]. Они стягивали  $x_{id}$  в точку, используя логистическую функцию  $s(v) = 1/(1 + \exp(-v))$ , где скорость высчитывается, с использованием уравнения:

$$v_{id} = v_{id} + c_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * Rand() * (p_{gd} - x_{id}).$$

Если случайно сгенерированное число в пределах  $[0;1]$  меньше, чем  $s(v_{id})$ , тогда  $x_{id}$  становится 1, иначе 0.

По итогам исследования на тестовых функциях для однокритериальных задач безусловной оптимизации было установлено, что и вещественный и бинарный стайные алгоритмы обеспечивают высокую эффективность. Но при меньших затратах ресурса результативнее оказался PSO с вещественными частицами. Кроме того, с увеличением числа переменных разница в количестве вычислений целевой функции для бинарного и вещественного PSO сильно возрастает. Так же для бинарного PSO нужно очень мало частиц и много поколений, в то время как для вещественного PSO с увеличением числа переменных необходимо значительно больше частиц, в то время как рост числа поколений сравнительно невелик.

Пусть решается следующая задача условной однокритериальной оптимизации:

$$f(x) \rightarrow \text{extr}$$

$$\begin{cases} g_j(x) \leq 0, j = \overline{1, r} \\ h_j(x) = 0, j = \overline{r+1, m} \end{cases}$$

В общем виде, пригодность индивида  $x$  вычисляется по формуле:

$$\text{fitness}(x) = f(x) + \delta * \lambda(t) * \sum_{j=1}^m f_j^\beta(x),$$

где  $t$  – номер текущего поколения;  $\delta = 1$ , если решается задача минимизации;  $\delta = -1$ , если решается задача максимизации;  $f_j(x)$  – штраф за нарушение  $j$ -го ограничения ( $j=1, \dots, m$ );  $\beta$  – вещественное число [7].

В работе рассмотрены методы «смертельных» и динамических штрафов. Метод «смертельных» штрафов попросту отбрасывает недопустимые решения. Метод динамических штрафов использует штрафные функции, описанные выше, и определяет функцию  $\lambda(t)$ . Исследование проводилось на тестовых задачах из [8], большинство из которых имеет только вещественные переменные и выпуклые допустимые области. Установлено, что для решения таких задач условной оптимизации стандартный и бинарный стайные алгоритмы эффективны и со смертельными, и с динамическими штрафами. Причем при использовании динамических штрафов PSO позволяет найти локальный экстремум функций за меньшее количество вычислений. Для бинарного «стайного» алгоритма требуется мало частиц и большое число поколений.

### Сравнение стайного алгоритма с другими оптимизационными методами

В 2009 году на конференции, посвященной Генетическим и Эволюционным Вычислениям (GECCO), рассматривалась платформа COCO для сравнения эффективности 32 оптимизационных методов (включая PSO) на 24 тестовых задачах [9]. Для сравнения каждый из 32 алгоритмов запускался на всех тестовых задачах, следует отметить, что число прогонов было заранее установлено и для всех алгоритмов было одинаковым. После этого высчитывался критерий эффективности. При этом самым критерием эффективности считалась величина ERT (Expected Running Rime) [10], которая определялась по формуле:

$$ERT(f_{target}) = RT_s + \frac{1 - p_s}{p_s} * RT_{us}$$

где  $RT_s$  – среднее число вычислений функций, за которое впервые было достигнуто оптимальное значение целевой функции с заданной погрешностью,  $RT_{us}$  – среднее число «неудачных» вычислений функций, то есть оптимальное значение целевой функции с заданной погрешностью не достигалось,  $p_s$  – доля успешных прогонов.

После того, как все расчеты были выполнены алгоритмы «сортировались» по эффективности: чем меньше значение критерия ERT, тем эффективнее алгоритм.

Исследование эффективности разработанного стайного алгоритма проводилось на 24 тестовых задачах, представленных на конференции GECCO в 2009 году, при этом размерность пространства менялась от 2 до 5. Полученные результаты сначала сравнивались с результатами PSO, опубликованными в [9] (базовый PSO), а потом уже с остальными алгоритмами из [9]. Таким образом, количество сравниваемых алгоритмов составило 33. Кроме того, сравнение эффективности алгоритмов проводилось для погрешностей 0.01 и 0.001.

Далее с этими же алгоритмами (включая разработанный PSO) сравнивался и бинарный PSO. Таким образом, количество сравниваемых алгоритмов стало равным 34. Результаты были получены только для пространства размерности 2. Так же как и для вещественного стайного алгоритма они сначала сравнивались с результатами PSO, опубликованными в [9] (базовый PSO), а потом уже с остальными алгоритмами из [9] и разработанным PSO. Сравнение эффективности алгоритмов проводилось для погрешностей 0.01 и 0.001.

Например, в таблицах 1 и 2 представлены результаты сравнения для пространства размерности 2.

Таблица 1 – Результаты сравнения разработанного алгоритма PSO с базовым (размерность пространства 2).

№	Функция	Точность 0,01		Точность 0,001	
		PSO	Базовый PSO	PSO	Базовый PSO
1	Сфера	60,98	59	119,8	120
2	Эллипсоид	91,02	98	122,34	120
3	Функция растригина	4,9	4,7	6,22	6
4	Buche-Rastrigin Function	5,64	5,6	6,82	6,4
5	Наклонная плоскость	21,18	21	20,58	21
6	Attractive Sector Function	18,42	18	24,06	23
7	Step Ellipsoidal Function	3,3	3,2	3,44	3,6
8	Функция розенброка	27,38	27	26,45	26
9	Rosenbrock Function, rotated	25,61	24	28,58	28
10	Ellipsoidal Function	660,64	660	831,25	850
11	Discus Function	692,03	670	898,12	860
12	Bent Cigar Function	132,48	130	159,88	160
13	Sharp Ridge Function	144,1	140	325,81	330
14	Different Powers Function	26,2	25	35,98	36
15	Rastrigin Function	16,43	16	16,4	16
16	Weierstrass Function	104,01	100	95,08	94
17	Schaffers F7 Function	6,45	6,2	8,3	8,1
18	Schaffers F7 Function, moderately ill-conditioned	3,27	3,2	3,52	3,5

19	Composite Griewank-Rosenbrock Function F8F2	4,7	4,7	5,84	6
20	SchwefelFunction	6,49	6,3	9,44	8,7
21	Gallagher's Gaussian 101-me Peaks Function	54,42	53	50,95	51
22	Gallagher's Gaussian 21-hi Peaks Function	1,88	1,8	1,893	1,9
23	KatsuuraFunction	60,54	59	72,98	73
24	Lunacekbi-RastriginFunction	18,32	18	16,81	17

Таблица 2 – Результаты сравнения разработанного бинарного алгоритма PSO с базовым (размерность пространства 2).

№	Функция	Точность 0,01		Точность 0,001	
		PSO Бин.	Базовый Вещ. PSO	PSO Бин.	Базовый Вещ. PSO
1	Сфера	68,59	59	162,33	120
2	Эллипсоид	100,71	98	128,91	120
3	Функция растригина	6,05	4,7	12,48	6
4	Buche-Rastrigin Function	8,69	5,6	16,6	6,4
5	Наклонная плоскость	76,26	21	76,06	21
6	Attractive Sector Function	29,85	18	29,3	23
7	Step Ellipsoidal Function	8,52	3,2	8,76	3,6
8	Функция розенброка	41,3	27	40,22	26
9	Rosenbrock Function, rotated	42,47	24	42,06	28
10	Ellipsoidal Function	786,89	660	986,67	850
11	Discus Function	869,19	670	1023,96	860
12	Bent Cigar Function	185,19	130	206,23	160
13	Sharp Ridge Function	220,27	140	605,9	330
14	Different Powers Function	39,51	25	61,92	36
15	Rastrigin Function	29,32	16	30,12	16
16	Weierstrass Function	86,39	100	110,58	94
17	Schaffers F7 Function	11,66	6,2	20,55	8,1
18	Schaffers F7 Function, moderately ill-conditioned	7,3	3,2	19,9	3,5
19	Composite Griewank-Rosenbrock Function F8F2	14,78	4,7	19,45	6
20	SchwefelFunction	10,57	6,3	22,23	8,7
21	Gallagher's Gaussian 101-me Peaks Function	178,8	53	176,33	51
22	Gallagher's Gaussian 21-hi Peaks Function	34,42	1,8	33,1	1,9
23	KatsuuraFunction	366,21	59	401,97	73
24	Lunacekbi-RastriginFunction	25,04	18	24,51	17

В итоге при размерности пространства, равной 2, вещественный стайный алгоритм оказался эффективнее, чем ALPS [11], BayEDAcG [12], DASA [13], EDA-PSO [14], Simple GA [15], LS fminbnd [16], LSstep [17], (1+1)-ES [18], POEMS [19], PSO\_BOUNDS [20], Monte Carlo [21]. При размерности пространства, равной 3, – BayEDAcG, Simple GA, POEMS, PSO\_BOUNDS, DASA, LS fminbnd, LSstep, Monte Carlo, EDA-PSO, (1+1)-ES. При размерности пространства, равной пяти, к этим алгоритмам прибавились еще DEPSO [22] и Cauchy EDA [23], в то время как (1+1)-ES показал лучшие, чем PSO, результаты. В то время как бинарный «стайный» алгоритм оказался эффективнее, чем BayEDAcG, DASA, Simple GA, LS fminbnd, LSstep, POEMS, PSO\_BOUNDS, Monte Carlo. Также по итогам сравнения было установлено, что вещественный алгоритм (и разработанный, и базовый) «работает лучше» бинарного.

После этого PSO сравнивался с другими алгоритмами стайного типа: алгоритм светлячков, алгоритм стаи волков, алгоритм летучих мышей и алгоритм кукушек. Исследования показали, что для задач безусловной оптимизации перечисленные методы работали также эффективно, но при меньших затратах ресурсов, причем лучшие результаты показали алгоритмы кукушек и стаи волков. Но для задач условной оптимизации PSO работал «стабильнее», а именно разница между полученными значениями целевой функции была несущественной. В то время как, например, при решении той же задачи алгоритмом летучих мышей могла возникнуть ситуация, что надежность была высокой 80-90%, а оставшиеся 10-20% полученных значений целевой функции могли значительно отличаться не только друг от друга, но и от оптимального решения. С другой стороны, если количество ресурсов было небольшим, то, например, алгоритм стаи волков был эффективнее для некоторых задач почти в два-три раза. Кроме того, было установлено, что алгоритмом светлячков наилучшие результаты достигаются, как и для бинарного стайного алгоритма, при малом числе частиц и большом числе поколений. В тоже время алгоритмы летучих мышей и кукушек были весьма «чувствительны» к размеру популяции: для удачного прогона необходимо было инициализировать хотя бы 20 частиц.

### **Параллельный стайный алгоритм для задач условной и безусловной оптимизации**

Стайный алгоритм обладает параллелизмом, как на уровне организации работы алгоритма (популяции и их элементы взаимодействуют между собой, «обмениваясь» информацией), так и на уровне его компьютерной реализации. Параллелизм на уровне компьютерной реализации означает вычисление на параллельных системах или процессорах значений целевой функции для разных решений, параллельное выполнение алгоритма. А это пропорционально повышает скорость работы алгоритма. Параллелизм на уровне организации работы алгоритма PSO может достигаться структурированием популяции решений. Оба подхода могут эффективно реализоваться на параллельных вычислителях, причем способы организации параллелизма могут быть различными.

Работа разработанного параллельного алгоритма заключается в том, что задается какое-то число частиц, которое затем делится по ядрам определенным образом. Так, на каждом ядре генерируется стая, для которой потом проводятся расчеты. На каждом поколении ядра «обмениваются» информацией, а именно, наилучшие значения, найденные для каждой популяции на каждом шаге, отправляются на «главный» процессор, где сравниваются между собой. В итоге, из них для каждого поколения выбирается наилучшее значение оптимизируемой функции, которое затем отправляется на все процессоры и сохраняется. Эти действия повторяются заданное количество раз, после чего алгоритм завершает работу.

Таблица 3 – Безусловный PSO с бинарными частицами.

№ задачи	Количество ядер				
	Количество переменных	1	2	4	8
1	2	100	100	100	100
	3	98	98	98	98
	4	99	99	99	99
2	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
	4	99	99	99	99
3	2	100	100	100	100
	3	98	98	98	98
	4	96	96	96	96
4	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
	4	100	100	100	100
5	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
	4	100	100	100	100
6	2	93	93	93	93
	3	82	82	82	82
	4	82	82	82	82

Для тех же тестовых задач, что были использованы для исследования эффективности последовательного PSO, был применен параллельный PSO. Его эффективность определялась усреднением по количеству прогонов. Вновь проверялось, сколько потребуется ресурса для получения верного ответа с вероятностью 80-100%. Все программные установки были такими же, какими они были при тестировании последовательного аналога. Изучалась зависимость эффективности алгоритма от выделяемого вычислительного ресурса, т.е. сочетания количества частиц и числа шагов

развития популяции, после чего было проведено сравнение параллельного и последовательного алгоритмов. В итоге было установлено, что эффективности параллельного и последовательного PSO совпадают. Кроме того, при решении задач, как с вещественными, так и с бинарными частицами последовательный алгоритм работал заметно медленнее.

После того, как сравнение параллельного и последовательного PSO было осуществлено, сравнивалась эффективность параллельного алгоритма в зависимости от количества ядер, то есть полученные для каждой задачи результаты фиксировались, а количество ядер менялось. Например, в таблице 3 показаны результаты, полученные бинарной модификацией для задач безусловной оптимизации.

В итоге было установлено, что число процессоров (ядер) не влияет на надежность алгоритма.

### **Исследование эффективности стайного алгоритма для многокритериальных задач оптимизации**

В самом общем виде многокритериальная задача условной оптимизации включает набор из  $N$  параметров (переменных), множество  $K$  целевых функций от этих переменных и множество  $M$  ограничений. При решении многокритериальной задачи необходимо найти оптимум по совокупности  $K$  критериев, а сама задача формально записывается следующим образом:

$$y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_K(x)) \rightarrow opt,$$

$$\begin{cases} g_j(x) \leq 0, j = \overline{1, r} \\ h_j(x) = 0, j = \overline{r+1, M} \end{cases}$$

где  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in X$  – вектор решений. В наиболее общей постановке многокритериальной задачи условной оптимизации от функций  $f_i(x), g_j(x), h_j(x)$  не требуется никаких дополнительных свойств, удобных с точки зрения оптимизации (выпуклость, дифференцируемость и т.д.). Функции могут быть заданы алгоритмически, переменные могут быть непрерывными, дискретными, бинарными или смешанными. Это обстоятельство существенно сужает класс оптимизационных алгоритмов, которые можно было бы применить к решению такого рода задач. Допустимое множество  $D$  определяется как множество векторов-решений, которые удовлетворяют ограничениям.

Критерии могут быть согласованными, нейтральными или противоречивыми. В первом случае оптимизация одного из критериев приводит к улучшению других. Во втором случае оптимизация одного критерия никак не влияет на другие. Интерес представляет случай конфликтующих критериев, когда попытка улучшить один из них приводит к ухудшению других. В этом случае решение возможно только на основе компромисса. Математическая модель компромисса в оптимизации обычно строится на

основе понятия множества Парето. Решение  $x^0 \in D$  называется эффективным, если во множестве допустимых альтернатив  $D$  не существует решения, которое по всем целевым функциям было бы не хуже, чем  $x^0$ , и, по крайней мере, по одной целевой функции было бы строго лучше, чем  $x^0$ . Паретовская точка не может быть улучшена по совокупности всех целевых функций.

В работе был применен стайный алгоритм для приближенного построения множества и фронта Парето. Для этого был создан архив, в котором сохранялись недоминируемые по Парето решения, обновляемый на каждой итерации. При использовании алгоритма PSO для решения многокритериальных задач основной проблемой было то, какую позицию считать глобально лучшей позицией для частицы. Существует несколько алгоритмов решения этой проблемы, одним из которых является  $\sigma$ -алгоритм. Рассмотрим схему этого алгоритма на примере двухкритериальной задачи. В этом случае  $\sigma$ -параметром  $i$ -ой частицы с координатами  $x^i$  называется величина:

$$\sigma_i = \sigma(f(x^i)) = \frac{f_1^2(x^i) - f_2^2(x^i)}{f_1^2(x^i) + f_2^2(x^i)}.$$

В случае, когда размерность пространства критериев больше двух  $\sigma$ -алгоритм использует  $K$ -мерный вектор  $\sigma$ -параметров  $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_K)$ .

Тогда для  $i$ -ой частицы:

$$\sigma_i = \sigma(f(x^i)) = \frac{((f_1^2(x^i) - f_2^2(x^i))(f_2^2(x^i) - f_3^2(x^i)) \dots (f_K^2(x^i) - f_1^2(x^i)))^T}{f_1^2(x^i) + f_2^2(x^i) + \dots + f_K^2(x^i)}.$$

$\sigma$ -алгоритм существенно использует архив недоминируемых решений (обозначим этот архив  $S$ ). В  $\sigma$ -алгоритме для  $j$ -ой частицы на каждой итерации глобально лучшая позиция в  $S$  определяется по следующему правилу:

- 1) Определяем  $\sigma$ -параметр  $j$ -ой частицы, то есть вычисляем величину  $\sigma_j = \sigma(f(x^j))$ ;
- 2) Находим в архиве частицу, у которой  $\sigma$ -параметр наиболее близок к величине:

$$\sigma_j : \min_i \|\sigma_j - \sigma_i\| = \|\sigma_j - \sigma_l\|,$$

где  $\sigma_i$  –  $\sigma$ -параметр  $i$ -ой частицы из архива  $S$ ,  $\|\ast\|$  – символ евклидовой нормы;

- 3) В качестве глобальной лучшей позиции для  $j$ -ой частицы принимаем вектор координат  $l$ -ой частицы.

Исследование эффективности стайного алгоритма проводилось на тестовых задачах безусловной и условной оптимизации. Кроме того, рассматривались тестовые задачи с конференции IEEE CEC 2009 года [24].

Для работы алгоритма было установлено максимальное число частиц, которое может храниться в архиве недоминируемых решений (для каждой задачи был установлен свой «размер» архива). Для задач условной оптимизации был применен метод динамических штрафов. При решении задач заполнялась лишь некоторая часть

архива. Результаты показали, что с ростом числа критериев эффективность алгоритмов возрастала. Преимущество вещественного PSO заключалось лишь во времени, потраченном на один прогон. И результаты алгоритмов существенно не отличались. Количество частиц и поколений было примерно таким же, как и при решении задач безусловной оптимизации. Решение одной задачи условной оптимизации, особенность которой заключалась в том, что в допустимой области не было ни одной точки из множества Парето, потребовало заметного увеличения размера популяции, и в конечном итоге были получены точки, находящиеся на той части границы допустимой области, которая была ближе всего к множеству Парето. Для этой условной задачи результаты, полученные вещественным и бинарным PSO почти не отличались.

### **Решение практических задач: задача формирования оптимального инвестиционного портфеля предприятия**

Рассмотрим задачу формирования оптимального инвестиционного портфеля предприятия. Она состоит в составлении такого портфеля инвестиционных проектов, который приносит инвестору наибольшую прибыль. При этом должны выполняться ограничения по выделяемым средствам, норме прибыли и общей рискованности портфеля.

Для формализованной записи критерия получения максимальной доходности от инвестиционных проектов, при соблюдении всех ограничений, введем следующие обозначения [20]:

$m$  – количество центров финансовой ответственности (ЦФО) на предприятии;

$N_i$  – количество инвестиционных проектов на  $i$ -м ЦФО;

$P_{ij}$  – плановый годовой объем прибыли, получаемый  $i$ -м ЦФО от внедрения  $j$ -го нововведения;

$R_{ij}$  – экспертная оценка рискованности соответствующего инновационного проекта;

$c_{ij}$  — плановые годовые затраты финансовых средств  $i$ -го ЦФО на  $j$ -е нововведение, способствующее увеличению мощности ЦФО;

$C_i$  – плановые годовые объемы финансовых средств, выделяемые ЦФО в план нововведений;

$C = \sum_{i=1}^m C_i$  – сумма всех средств, выделяемых всеми ЦФО на реализацию их инвестиционных программ;

$M$  – плановый годовой объем финансовых средств, выделяемый центральной компанией в планы нововведений ЦФО;

$r$  – допустимая средняя прибыль на 1 руб. затрат (норма прибыли на капитал);

$\rho$  – ограничение на суммарную рискованность инвестиционного портфеля;

$x_{ij}$  – искомый параметр, показывающий, планируется ли к внедрению на  $i$ -м ЦФО  $j$ -е нововведение (если  $x_{ij} = 1$ , то планируется; если  $x_{ij} = 0$ , то не планируется).

Центры финансовой ответственности – это структурные подразделения предприятия, обладающие хозяйственной самостоятельностью и имеющие разрешение планировать инвестиционные проекты, финансируемые из собственных средств. Материнское предприятие может добавлять свои средства на инвестиционные программы ЦФО.

Данная задача допускает как однокритериальную, так и многокритериальную постановку. Тогда однокритериальная постановка задачи будет:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} \Pi_{ij} * x_{ij} \rightarrow \max$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} x_{ij}} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} R_{ij} x_{ij} \leq \rho \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} c_{ij} x_{ij} \leq C + M \\ \frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} c_{ij} x_{ij}} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} \Pi_{ij} x_{ij} \leq r \\ x_{ij} \in \{1,0\} \end{array} \right.$$

а многокритериальная постановка:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} \Pi_{ij} * x_{ij} \rightarrow \max$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} x_{ij}} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} R_{ij} x_{ij} \rho \rightarrow \min$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} c_{ij} x_{ij} \leq C + M \\ \frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} c_{ij} x_{ij}} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{Ni} \Pi_{ij} x_{ij} \leq r \\ x_{ij} \in \{1,0\} \end{array} \right.$$

Исходные данные для задачи формирования инвестиционного портфеля предприятия были взяты из практики работы предприятия Химзавод – филиала ФГУП «Красмаш» [25]. В приложении приведена таблица со списком ЦФО, инновационных проектов, планируемых для внедрения, а также соответствующие им числовые данные: планируемые прибыльность, затраты и рискованность внедрения.

Задача решалась с помощью бинарного PSO. Был применен метод динамических штрафов. В итоге, результат вычислений для однокритериальной задачи формирования инвестиционного портфеля представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Результат, полученный в однокритериальной постановке.

Бинарная строка	Прибыль	Риск	Средняя норма прибыли на капитал
101111111111111110110001	117,7	1,98	0,5

Здесь единицы в бинарном представлении показывают, в проекты с какими номерами следует инвестировать деньги, а нули – в какие не следует инвестировать деньги, исходя из условия получения максимальной прибыли инвестором при выполнении ограничений задачи. Таким образом, во все проекты, кроме 2-ого (организация совместной деятельности по производству посуды из полимеров), 19-ого (производство сжиженного и газообразного кислорода), 22-ого (производство пропиленовых мешков), 23-ого (производство дифференциального редуктора) и 24-ого (производство электромагнитного инжектора) следует инвестировать деньги. Данный результат достигался стайным алгоритмом при 10 частицах и 3200 поколениях, алгоритмом светлячков при 30 частицах и 200 поколениях, алгоритмом летучих мышей при 60 частицах и 190 поколениях, алгоритмом стаи волков при 40 частицах и 300 поколениях. В итоге было установлено, что в 5 проектов из предложенных 25 проектов не следует инвестировать деньги.

Таблица 5 – Множество Парето ( $C = 0,5$  и  $\alpha = 2$ , 10 частиц и 2000 поколений, средняя норма прибыли на капитал – 0,5).

Бинарная строка	Прибыль	Риск
0010110001111011000100001	56,6	1,627273
0011100101111111000100001	68,3	1,646154
0011100101111111100010001	76	1,757143
0010110101111111011100001	81,2	1,793333
0011111101111111011100001	94,1	1,835294
1011110111111111100100001	96,4	1,876471
101111111111111110100001	107,7	1,921053
10111111111111111100001	110,7	1,935
0011111111111111011110001	113,5	1,968421
001111111111111110110001	114,2	1,968421
10111111111111111110001	120,7	1,990476
101111010111111110111000	123,6	2,07

Для многокритериальной задачи изначально методом полного перебора были получены множество и фронт Парето, а затем уже осуществлялся их поиск с помощью

стайного алгоритма. Причем решение, найденное при однокритериальной постановке, вошло в это множество Парето. Таким образом, были достигнуты различные результаты в зависимости от количества частиц и поколений, а так же параметров штрафных функций  $C$  и  $\alpha$ . Пример приведен в таблице 5.

### **Решение практических задач: задача формирования оптимального кредитного портфеля банка**

Рассмотрим задачу формирования оптимального кредитного портфеля банка. Она состоит в формировании оптимального кредитного портфеля при наличии жестких ограничений по суммам имеющихся в наличии свободных кредитных ресурсов, их стоимости, процентным ставкам на выдаваемые кредиты, срокам привлечения ресурсов, максимальному размеру кредита на одного заемщика.

Для формализованной записи критерия получения максимальной доходности от проводимых банком кредитных операций при соблюдении требования минимизации риска невозврата введем следующие обозначения:

$F$  – сумма свободных пассивов, которыми располагает банк в данный момент времени;

$N$  – количество заемщиков;

$k_j$  – сумма кредита, запрашиваемая  $j$ -м заемщиком  $j = \overline{1, N}$ ;

$t_j$  – срок, на который  $j$ -й заемщик берет кредит;

$x_j$  – булева переменная, принимающая значения: 1, если кредит  $k_j$  выдается и 0, если заявка на получение кредита отклоняется банком;

$d_j$  – проценты за пользование  $j$ -м кредитом (в данной постановке предполагается, что проценты выплачиваются одновременно с возвратом самого кредита);

$P_j$  – вероятность невыполнения заемщиком обязательств по возврату кредита и процентов по нему  $k_j * (1 + d_j)$ . В предлагаемой постановке задачи предполагается два варианта обслуживания долга заемщиком: 100% возврат суммы кредита и процентов по нему в установленный срок, либо полное отсутствие платежей в погашение кредита и процентов по нему;

$\rho$  – ограничение на суммарную рискованность кредитного портфеля.

Ожидаемые проценты от комбинации кредитных заявок будут определяться по следующей формуле:

$$E(x) = \sum_{j=1}^N k_j * (1 + d_j * t_j) * x_j$$

Суммарная рискованность кредитного портфеля может быть определена по следующей формуле:

$$R(x) = \frac{I}{\sum_{j=1}^N x_j} * \sum_{j=1}^N P_j * x_j$$

Тогда однокритериальная постановка задачи будет:

$$E(x) \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} R(x) \leq \rho \\ \sum_{j=1}^N k_j * x_j \leq F \\ x_j \in \{0,1\} \end{cases}$$

Исходные данные для задачи формирования кредитного портфеля банка приведены в Приложении 5 в виде таблицы. Данные предоставлены В. А. Пуртиковым (Красноярский филиал банка Москвы) [26].

При решении задачи был использован бинарный PSO, и применен метод смертельных штрафов. Основной проблемой при этом была громоздкость задачи. Сначала она решалась на первых 25 заявках, при этом учитывалась лишь половина суммы свободных ресурсов. Был получен результат, приведенный в таблице 6.

Таблица 6 – Промежуточный результат для второй практической задачи.

Бинарная строка	Риск	Затраты ресурсов
0111000111101001011111100	0,03	9,96823*10 <sup>7</sup>

Здесь единицы в бинарном представлении показывают, каким клиентам следует предоставлять кредиты, а нули – каким не следует предоставлять кредиты, исходя из условия получения максимальной прибыли банком при выполнении ограничений задачи. Значение было достигнуто в 90% при 20 частицах и 25600 поколениях. Далее, беря за основу это количество ресурсов, проводился поиск наилучшего решения на 50 заявках (учитывалась вся сумма свободных ресурсов). В итоге результат оказался равным представленному в таблице 7.

Таблица 7 – Результат, полученный для второй практической задачи.

Бинарная строка
0110111101111111111111111111010111111101101111110
Затраты ресурсов
1,99936*10 <sup>8</sup>

## Техническое описание проекта

Идея проекта заключается в разработке эволюционной технологии формирования инвестиционного портфеля и создании на ее основе программной системы. Общая схема программного продукта представлена на рисунке 1.

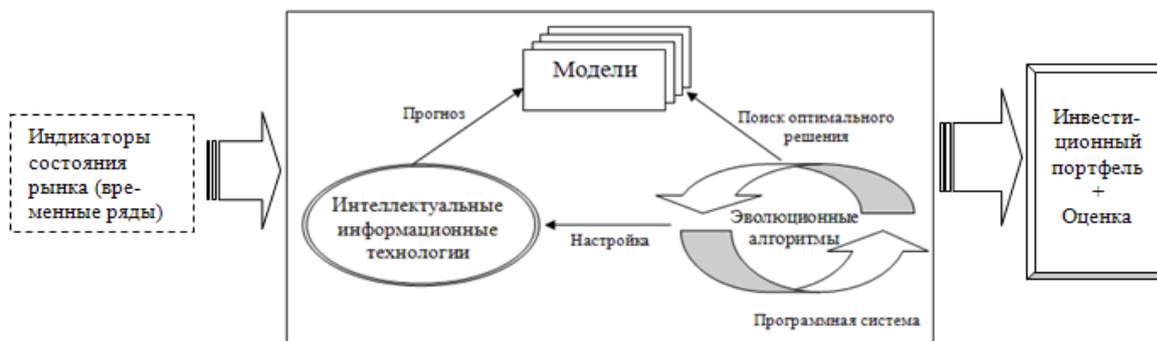


Рис. 1. Техническая схема проекта

Изученные эволюционные алгоритмы были использованы для разработки нового самонастраивающегося алгоритма стайного типа, работа которого состоит в следующем:

1. Инициализируется популяция индивидов, которая делится на 5 частей. Назовем каждую часть подгруппой.
2. Для каждой подгруппы выполняется один из 5 алгоритмов поиска оптимального решения: PSO, FFA, WPS, BA или CSA.
3. На каждой итерации производится «миграция» индивидов из одной подгруппы в другую. «Миграция» не превышает 10%. Найденные лучшие значения одним алгоритмом заменяют худшие найденные решения другим алгоритмом.

Причем число поколений не установлено, задается лишь максимальное число вычислений функции, чтобы алгоритм сошелся к какому-то решению. Размер популяции меняется в ходе работы алгоритма (сначала в популяции всего 10 индивидов): он может как увеличиваться, так и уменьшаться. Вычисления завершаются либо при выполнении критерия останова, либо если число вычислений превысило максимально возможное значение.

На данный момент алгоритм был реализован для решения однокритериальных задач безусловной оптимизации и апробирован на тестовых задачах. Кроме того, изучаются другие способы самонастройки размера популяции для усовершенствования разработанного алгоритма при решении более сложных задач (и тестовых и практических).

В процессе работы программного продукта будут выполняться следующие действия: автоматическая настройка интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) при помощи самонастраивающихся эволюционных алгоритмов,

прогнозирование параметров модели с помощью полученных ИИТ, поиск решения оптимизационной задачи при помощи самонастраивающихся эволюционных алгоритмов, формирование инвестиционного портфеля с его оценкой согласно результатам решения оптимизационной задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование эффективности стайного алгоритма (и вещественного, и бинарного) и его частных случаев для однокритериальных задач условной и безусловной оптимизации показало, что надежность методов высока, а потому их применение целесообразно. Для ускорения работы PSO и одновременного его применения на многих процессорах, алгоритм (и стандартный, и бинарный) был распараллелен. В итоге желаемый эффект был достигнут, что однако не сказалось на количестве ресурса, затрачиваемого для достижения оптимума с заданной погрешностью. Решение многокритериальных задач условной и безусловной оптимизации стайным алгоритмом сводилось к приближенному построению множеств и фронтов Парето. Глобально лучшая позиция для частицы определялась с помощью  $\sigma$ -алгоритма. В итоге было установлено, что PSO эффективен не только для решения однокритериальных задач: его надежность высока и для многокритериальных задач, более того, увеличение числа критериев приводило к большему заполнению внешнего архива, в котором сохранялись недоминируемые по Парето решения.

После завершения тестирования стайного алгоритма и установления его эффективности были решены две практические задачи инвестиционного анализа. Можно выделить следующие этапы реализации продукта:

- Разработка математических моделей для оценивания эффективности инвестиционных проектов.
- Разработка самонастраивающегося эволюционного алгоритма стайного типа, позволяющего решать задачи статической и динамической оптимизации для управления инвестиционными проектами и формированием инвестиционных портфелей.
- Создание программного продукта, реализующего прогнозирование данных при помощи интеллектуальных информационных технологий, автоматически сгенерированных разработанными эволюционными алгоритмами.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV, 1995. P. 1942-1948.
2. Kennedy, J., Eberhart, R. C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm // Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics 1997, Piscataway, NJ. pp. 4104-4109, 1997.

3. X. S. Yang, Firefly algorithms for multimodal optimization, Proc. 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications, SAGA 2009, Eds. O. Watanabe and T. Zeugmann, Lecture Notes in Computer Science, 5792, 169-178 (2009).
4. X. S. Yang, A new metaheuristic bat-inspired algorithm, in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010) (Eds. J. R. Gonzalez et al.), Springer, SCI 284, 65-74 (2010).
5. Chenguang Yang, Xuyan Tu and Jie Chen.: Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search. International Conference on Intelligent Pervasive Computing – IPC2007 (2007) 462-467.
6. X. S. Yang and S. Deb, Cuckoo search via Lévy flights, in: Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBic 2009), IEEE Publications, USA, pp. 210-214 (2009).
7. Eiben A.E., Smith J.E. Introduction to evolutionary computation. Springer, Berlin, 2003.
8. Электронный ресурс: [http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/member/student/hedar/Hedar\\_files/TestGO\\_files/Page422.htm](http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/member/student/hedar/Hedar_files/TestGO_files/Page422.htm).
9. Auger A. Benchmarking the (1+1) evolution strategy with one-fifth success rule on the BBOB-2009 function testbed. Rothlauf [22]. P. 2447–2452.
10. Hansen N., Auger A., Ros R., Finck S. Real-parameter black-box optimization benchmarking 2009: Experimental setup // Technical Report RR-6828, INRIA, 2009.
11. Hornby G. S. The age-layered population structure (ALPS) evolutionary algorithm // <http://coco.gforge.inria.fr/doku.php?id=bbob-2009-results>, July 2009. Noiseless testbed.
12. Gallagher M. Black-box optimization benchmarking: results for the BayEDAcG algorithm on the noiseless function testbed. Rothlauf [22]. P. 2281–2286.
13. Korosec P., Silc J. A stigmergy-based algorithm for black-box optimization: noiseless function testbed. Rothlauf [22]. P. 2295–2302.
14. El-Abd M., Kamel M.S. Black-box optimization benchmarking for noiseless function testbed using an EDA and PSO hybrid // Rothlauf [22]. P. 2263–2268.
15. Nicolau M. Application of a simple binary genetic algorithm to a noiseless testbed benchmark // Rothlauf [22]. P. 2473–2478.
16. Posik P. BBOB-benchmarking two variants of the line-search algorithm // Rothlauf [22]. P. 2329–2336.
17. Auger A. Benchmarking the (1+1) evolution strategy with one-fifth success rule on the BBOB-2009 function testbed. Rothlauf [22]. P. 2447–2452.
18. Kubalik J. Black-box optimization benchmarking of prototype optimization with evolved improvement steps for noiseless function testbed // Rothlauf [22]. P. 2303–2308.
19. El-Abd M., Kamel M. S. Black-box optimization benchmarking for noiseless function testbed using PSO Bounds // Rothlauf [22]. P. 2275–2280.
20. Auger A., Ros R. Benchmarking the pure random search on the BBOB-2009 testbed // Rothlauf [22]. P. 2479–2484.
21. Garcia-Nieto J., Alba E., Apolloni J. Noiseless functions black-box optimization: evaluation of a hybrid particle swarm with differential operators // Rothlauf [22]. P. 2231–2238.
22. Posik P. BBOB-benchmarking a simple estimation of distribution algorithm with Cauchy distribution // Rothlauf [32]. P. 2309–2314.

23. Zhang Q., Zhou A., Zhao S., Suganthan P. N., Liu W., Tiwari S. Multiobjective optimization test instances for the CEC 2009 // Department of Computing and Electronic Systems, University of Essex, UK, Working Report, 2008.
24. Клешков В.М., Семенкин Е.С. Модели и алгоритмы распределения общих ресурсов при управлении инновациями реструктурированного машиностроительного предприятия // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 3. – 2006. 24-31 с.
25. Хайниш С.В. и др. Российское предприятие ВПК: выжить и развиваться. – М.: Рохос, 2003. – 240 с.
26. Пуртиков В. А. Постановка задачи оптимизации выбора кредитного портфеля. // Вестник НИИ СУВПТ. Красноярск: НИИ СУВПТ. – 1999. – Вып. 2. с. 145-159.

Е.Э. Шмидт (студентка, 3 курс)  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(ТУСУР, Томск)  
Научный консультант – П.Н. Дробот, к.ф.-м.н., доцент ФИТ ТУСУР

## СПОСОБ ГИДРОФОБНОЙ ЗАЩИТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Реферат

*Ключевые слова:* строительные материалы, гидрофобность, влагоотдача, влажность, водопроницаемость, гигроскопичность, истинная плотность, истираемость, морозостойкость, пластичность, пористость, упругость, прочность, твердость.

Объектом исследования являются физические свойства строительных материалов, часто применяемых при строительстве домов.

Цель работы – выявить причины разрушения и способы сохранения физических свойств строительных материалов при воздействии воды.

Основные разработки в работе – систематизирован материал о влиянии воды на физические свойства строительных материалов; проанализированы данные климатической ситуации, на основе которых выполнено прогнозирование морозоустойчивости строительных сооружений; разработаны рекомендации к использованию добавок в строительные материалы; создана модель дома, устойчивого к воздействию воды.

### Введение

Строительство всегда имело огромное стратегическое значение для любой страны, и в настоящее время отмечается, так называемый, «строительный бум», когда строительство стало одной из ключевых отраслей в развитии страны. Это очень ответственная отрасль, ведь здания должны стоять десятки лет, и от их добротности, прочности, функциональности зависит не только будущий облик городов, но и жизнь, и здоровье тех, кто будет в них работать и жить – наших детей, внуков и правнуков.

Особое пристальное внимание уделяется вопросам жилищного строительства в ключе развития экономики. Перед отечественными и иностранными строителями, работниками стройиндустрии открывается огромный фронт работы, к которой уже сегодня они должны начать подготовку.

Изучение разрушения строительных материалов – тема, давно интересующая многих исследователей, как в нашей стране, так и за рубежом. Этой проблемой занимались такие ведущие специалисты строительной индустрии как Ильинский В.М., Комар А.Г., Воробьев В.А., Горчаков Г.И., Попов К.Н.

Чтобы здание или сооружение было прочным и долговечным, необходимо знать те агрессивные воздействия внешней среды, в которых будет работать каждая конструкция. Зная эти воздействия и назначенные конструкции, можно сформулировать требования к материалу конструкции. Вышесказанное определило **цель проведения нашей работы**: выявить причины разрушения и способы сохранения физических свойств строительных материалов при воздействии воды.

Исследование включает в себя ряд **задач**:

- 1) проанализировать научную информацию о влиянии воды на физические свойства строительных материалов;
- 2) систематизировать научную информацию о влиянии воды на физические свойства строительных материалов;
- 3) провести собственные эксперименты на изучение воздействия воды на физические свойства строительных материалов;
- 4) обосновать разрушение строительных материалов при воздействии воды;
- 5) разработать рекомендации;
- 6) выполнить прогнозирование разрушения домов;
- 7) сконструировать модель дома;
- 8) провести опрос жителей;
- 9) проанализировать полученные результаты.

Гипотеза: поскольку физические свойства строительных материалов изменяются под действием воды, то, объяснив этот процесс и выявив причины их разрушения, мы сможем разработать рекомендации по их применению и сохранению, сконструировать модель дома, более устойчивого к воздействию воды.

Исследование включает в себя **методы**:

- 1) описательный;
- 2) теоретический анализ;
- 3) сбор данных;
- 4) эксперимент;
- 5) сравнительный;
- 6) моделирование;
- 7) работа с исследовательским материалом;
- 8) прогнозирование.

Объект исследования: физические свойства строительных материалов, часто применяемых при строительстве домов.

Предмет исследования: исследование изменения физических свойств строительных материалов под воздействием воды и способ сохранения свойств строительных материалов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) систематизирован материал о влиянии воды на физические свойства строительных материалов;

- 2) проанализированы данные климатической ситуации, на основе которых выполнено прогнозирование морозоустойчивости строительных сооружений;
- 3) разработаны рекомендации к использованию добавок в строительные материалы;
- 4) создана модель дома, устойчивого к воздействию воды;

Результаты проведенного исследования подтверждают, что действительно следует повысить роль общественности в оценке угрожающей опасности, чтобы ликвидировать нежелательное разрушительное воздействие воды на жизнь человека.

Практическое применение заключается в том, что результаты работы можно использовать в образовательных целях в углублении знаний по физике, в практических целях – при строительстве сооружений.

### 1. Особенности изготовления бетона с добавкой золы

Более II тысячелетий идет поиск лучшего строительного материала. Римляне первыми сказали свое слово в долгой истории развития строительных материалов, создав смесь из негашеной извести и пемзы. Без этой смеси была бы немыслима невероятная по красоте и прочности архитектура древности. Спустя II тысячи лет Джон Смит смог улучшить состав строительной смеси. История развития бетона на этом не закончилась. За последние 35 лет бетон превратился из трехкомпонентной в пятикомпонентную систему. Наряду с цементом, заполнителями и водой обязательными компонентами бетона стали минеральные и химические добавки. Применение золы в качестве минеральной добавки, по мнению автора, является неременным атрибутом современной технологии изготовления бетона. Зола, благодаря своим специфическим качествам, способствует улучшению характеристик, как бетонной смеси, так и бетона и позволяет сделать производство бетона более рентабельным.

Методика изготовления бетона остается неизменной. Но необходимо процентное соотношение основной бетонной смеси и добавок (в нашем случае, золы). После проведения экспериментов, которые приведены в последующих разделах, были замечены закономерности, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изготовление бетона с различными пропорциями золы.

Наименование показателя	Результаты испытаний			
	Без золы	С золой	С золой	С золой
Кол-во золы, кг/м <sup>3</sup>	-	50	70	90
Плотность бетона в 28-дневном возрасте, кг/м <sup>3</sup>	2331	2309	2312	2317
Прочность на сжатие в 28-дневном возрасте, Н/мм <sup>2</sup>	68,7	69,1	66,4	61,9

Для заданной консистенции бетона снижение водопотребности может привести к общему улучшению его технологических свойств. Гранулометрические характеристики крупных и мелких заполнителей и частиц цемента влияют на объем пустот и водопотребность бетонной смеси. Введение тонких частиц минеральных добавок, обычно имеющих размеры 1-20 мкм, должно усиливать влияние портландцементных зерен на снижение пористости в бетонной смеси, что снижает потребность в воде для получения бетона заданной консистенции. При проведении экспериментов было установлено, что замена 30% цемента золой снижает водопотребность примерно на 7% при постоянной осадке конуса. При использовании трех видов золы с различными размерами частиц было отмечено снижение водопотребности на 5-10% в растворах равной консистенции при добавлении 33,67 или 133% золы от массы цемента.

## 2. Научно-технические основания проекта

Научно-техническими основаниями проекта являются результаты проведенных экспериментов:

**Эксперимент №1** «Определение истинной плотности строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшей истинной плотностью обладает бетон с добавками, а наименьшей – древесина.

**Эксперимент №2** «Определение средней плотности строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшей средней плотностью обладает полимер с добавками, а наименьшей – древесина. Практическое значение средней плотности строительного материала велико: ее необходимо знать при расчетах прочности (устойчивости) строительных конструкций, а также для подсчетов при перевозке материалов.

**Эксперимент №3** «Определение пористости строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшей пористостью обладает древесина, а наименьшей – полимер с добавками.

Пористость материалов имеет очень большое значение в строительстве, так как с нею связаны такие важные свойства, как прочность, водопоглощение, водопроницаемость, теплопроводность, морозостойкость, звукопроницаемость, кислотостойкость и др. Для изготовления водонепроницаемых конструкций нужны материалы с малой пористостью; малотеплопроводные конструкции необходимо изготавливать из высокопористых материалов с пониженной теплопроводностью.

Также в нашей жизни имеет место такая проблема, как воздействие сульфатов (солей серной кислоты) на свойства строительных материалов. Добавление золы, а также трехкальциевого алюмината, приводит к решению данной проблемы, т.е. к формированию менее химически активного и менее пористого бетона. Гранулометрические характеристики крупных и мелких заполнителей и частиц цемента

вливают на объем пустот и водопотребность бетонной смеси. Введение золы усиливает влияние портландцементных зерен на снижение пористости в бетонной смеси.

**Эксперимент №4** «Определение водопоглощения по массе строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшим водопоглощением обладает древесина, а наименьшим – полимер с добавками. Водопоглощение – очень важный фактор. От него зависит водостойкость материала, который в условиях работы в сооружении может подвергаться воздействию воды.

**Эксперимент №5** «Определение водопроницаемости строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшей водопроницаемостью обладает древесина, а наименьшей – полимер с добавками. Водопроницаемость материалов – важнейший показатель их качества. Значение водопроницаемости обратно пропорционально количеству больших пор (>100нм) в гидратированном цементном тесте. Данный эксперимент показывает, что введение в портландцемент золы, вызывает уменьшение размера пор, т.е. превращение больших пор в мелкие – процесс, который ведет к существенному уменьшению водопроницаемости.

**Эксперимент №6** «Определение морозостойкости строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшей морозостойкостью обладает бетон с добавками, а наименьшей – древесина.

**Эксперимент №7** «Определение прочности строительных материалов»

**Вывод:** на основании проделанного эксперимента можно заключить, что наибольшей прочностью в насыщенном состоянии обладает полимер с добавками, а наименьшей – кирпич.

При строительстве обязательно рассчитывают прочность строительных материалов и их запас прочности. Это обусловлено следующими факторами:

1) при испытаниях получают показатели, которые характеризуют только средние значения прочности материалов. Наиболее слабые части их разрушаются раньше, чем напряжение достигнет среднего значения предела прочности. Многие материалы, нагруженные до напряжения, составляющего только часть предела прочности (50-70%), сильно деформируются. Следовательно, запас прочности надо принимать тем больше, чем менее однороден материал;

2) в каменных и других хрупких материалах образуются трещины раньше достижения напряжения, равного пределу прочности;

3) при многократной переменной нагрузке под влиянием так называемой усталости материала может произойти разрушение при напряжении, равном только половине предела прочности;

4) под действием атмосферных факторов изменяются первоначальные свойства материала, со временем происходит его «старение», сопровождаемое понижением прочности.

При сепарации или диспергировании ускоряется флокуляция частиц портландцемента, что увеличивает степень ранней гидратации. Поэтому прочность бетона при добавлении в его смесь золы равным образом возрастает через 7 и 28 суток. А самую высокую прочность бетон показывает только через 91 суток.

Отрицательное влияние на прочность и плотность бетона оказывает наличие больших пор в гидратированном цементном тесте и микротрещин в зоне контакта цементного теста с заполнителем. Повышение прочности и долговечности бетона, связанное с использованием золы в качестве добавки, обусловлено превращением больших пор в мелкие и уменьшением микротрещин в зоне контактов.

### **3. Обоснование разрушения строительных материалов при воздействии воды**

Все материалы, применяемые при возведении зданий и сооружений (за исключением металла, стекла и сплошных пластиков), обладают (в большей или меньшей степени) пористой структурой. Вместе с тем, существование пор и капилляров ставит проектировщиков и строителей перед необходимостью позаботиться о гидрофобизации и гидроизоляции сооружения. В противном случае влага, попавшая в капиллярную сеть кирпича или бетона, начинает мигрировать по микропустотам.

Долговечность является одним из основных требований, предъявляемых к бетону. Он должен противостоять целому ряду внешних воздействий, таким как замерзание-оттаивание, карбонизация и проникновение хлоридов, при этом сохраняя свои технические характеристики и структурную целостность. Инженеры и технологи, занимающиеся бетоном, рассматривают качество верхнего слоя-слоя бетона между стальной арматурой и поверхностью бетона – как важный аспект в обеспечении долговечности материала. На защитный слой бетона, включая этапы строительных технологий, влияют несколько факторов, такие как укладка, уплотнение и твердение. Подбор состава смеси и свойства бетона, все же, оказывают более значительное влияние на долговечность.

Вода добавляется в бетон для гидратирования цемента. Поскольку минимальное количество воды необходимое для гидратирования слишком мало, чтобы обеспечить достаточную обрабатываемость, дополнительная вода необходима, чтобы «пластифицировать» смесь и сделать возможными ее обработку и укладку на месте. Это дополнительная вода после испарения увеличивает пустоты и поры в структуре бетона и приводит к увеличению проницаемости бетона для газов, пара и жидкостей особенно в его поверхностном слое.

Излишек воды в смеси приводит к тому, что качество строительного бетона ухудшается из-за влияния таких воздействий, как замерзание-оттаивание, которое приводит к образованию выступов и сколов на поверхности бетона, а так же карбонизации и проникновения хлоридов, которое, в конечном итоге, приводит к коррозии арматуры. Все эти воздействия могут послужить причиной растрескивания, которое может привести к структурным изменениям бетона и усугубить ситуацию тем,

образуются дополнительные пути для проникновения газа, пара и жидкости вглубь бетона. Таким образом, избыточная вода ухудшает не только характеристики бетона, но и его внешний вид.

Разрушение обусловлено увеличением объема и распирающим действием льда. После плавления в воде остаются отдельные части кристаллической решетки, в которых сохраняются пустоты. Они постепенно разрушаются лишь в процессе дальнейшего нагревания воды. Поэтому вода сжимается при нагревании до температуры  $4^{\circ}\text{C}$ . При  $4^{\circ}\text{C}$  процессы исчезновения и пустот и увеличения расстояний между молекулами при нагревании компенсируются, и при дальнейшем нагревании вода начинает расширяться. При охлаждении воды все описанные процессы происходят в обратном порядке.

Таким образом, на основе аномального свойства воды обосновано разрушение строительных материалов под воздействием воды:

1) Возрастные количества новых и увеличение объема существовавших капилляров и пор.

2) Механическая деструкция, обусловленная замерзанием воды (с соответствующим увеличением объема и распирающим действием льда) в порах материала.

Это аномальное свойство воды имеет огромное значение в строительстве, так как влияет на разрушение строительных материалов.

#### **4. Обоснование действия добавок на улучшение качества физических свойств строительных материалов**

Добавки вступают в химическое взаимодействие со строительными материалами. Образуется водостойкое достаточно прочное соединение, твердеющее в воде. Новообразования формируют мельчайшие субкристаллы. Это приводит к интенсивному адсорбированию воды на поверхности кристалла, происходит загустение структуры строительного материала, начинается схватывание. Новообразования, которые выделяются в коллоидном виде, формируют кристаллические центры, кристаллы которых растут и срастаются. Микропоры становятся меньше, следовательно, материалы прочнее.

При обосновании изменения свойств полимеров при добавлении добавок низкомолекулярных веществ исходят из следующего. Полимеры – высокомолекулярные вещества, молекулы которых состоят из повторяющихся структурных элементов-звеньев, соединенных в цепочке химическими связями.

К специфическим свойствам следует отнести следующие способности:

1) к значительным обратимым механическим высокоэластическим деформациям;

2) к образованию анизотропных структур;

3) к резкому изменению свойств при добавлении ничтожных добавок низкомолекулярных веществ.

Приведенные физико-механические особенности можно объяснить, исходя из представлений о строении полимеров. Характерным для полимеров является наличие длинных цепных молекул с резким различием характера связей вдоль цепи и между цепями. Особенно следует отметить, что нет из изолированных молекул. Молекула полимера всегда находится во взаимодействии с окружающей средой, поэтому для характеристики полимера недостаточно указания типа связи вдоль цепи - необходимо еще иметь сведения о природе межмолекулярного взаимодействия. Следует иметь в виду характерные свойства полимера. Они могут быть реализованы только в том случае, когда связи вдоль цепи намного прочнее поперечных связей, образующихся вследствие межмолекулярного взаимодействия любого происхождения. Именно поэтому можно предположить, что добавки увеличивают связи вдоль цепи намного прочнее и приводят к некоторому изменению свойств, а именно к малой водопроницаемости.

## 5. Рекомендации к использованию добавок в строительные материалы

Таблица 2. Рекомендации к использованию добавок в строительные материалы.

Конструкции	Эксплуатационные факторы	Требования к материалу	Стройматериалы	Добавки
Кровля	Атмосферные влияния, смена температур и влажности, находящиеся в атмосфере газы, биологическое воздействие (живые организмы), статические и динамические нагрузки (снег, ветер)	Прочность, плотность, водонепроницаемость, морозо-и биохимическая стойкость, небольшая собственная масса	Полимер	Добавки, содержащие золу
Стены	Атмосферные влияния, но в меньшей степени; разные температура и влажность с наружной и внутренней стороны; большие статические и динамические нагрузки	То же, а также высокие теплоизолирующие свойства и достаточная проницаемость	Бетон, кирпич	Добавки, содержащие золу
Цоколь	То же и замораживание, оттаивание в насыщенном водой состоянии	Прочность, водостойкость и морозостойкость	Кирпич	полимерные пластификаторы и зола
Фундамент	То же и действие грунтовых вод (растворы солей и слабых кислот); нагрузка от вышележащих частей здания	Прочность, водостойкость, коррозионная стойкость, водонепроницаемость	Бетон	полимерные пластификаторы и глинозем

На основании проведенных опытов мы можем предложить свои рекомендации к использованию добавок в строительные материалы, которые приведены в виде таблицы 2.

## 6. Модель дома

На основе нашего исследования разрушения строительных материалов под воздействием воды, мы можем предложить модель дома из строительных материалов, более устойчивых к воздействию воды (рис. 1).

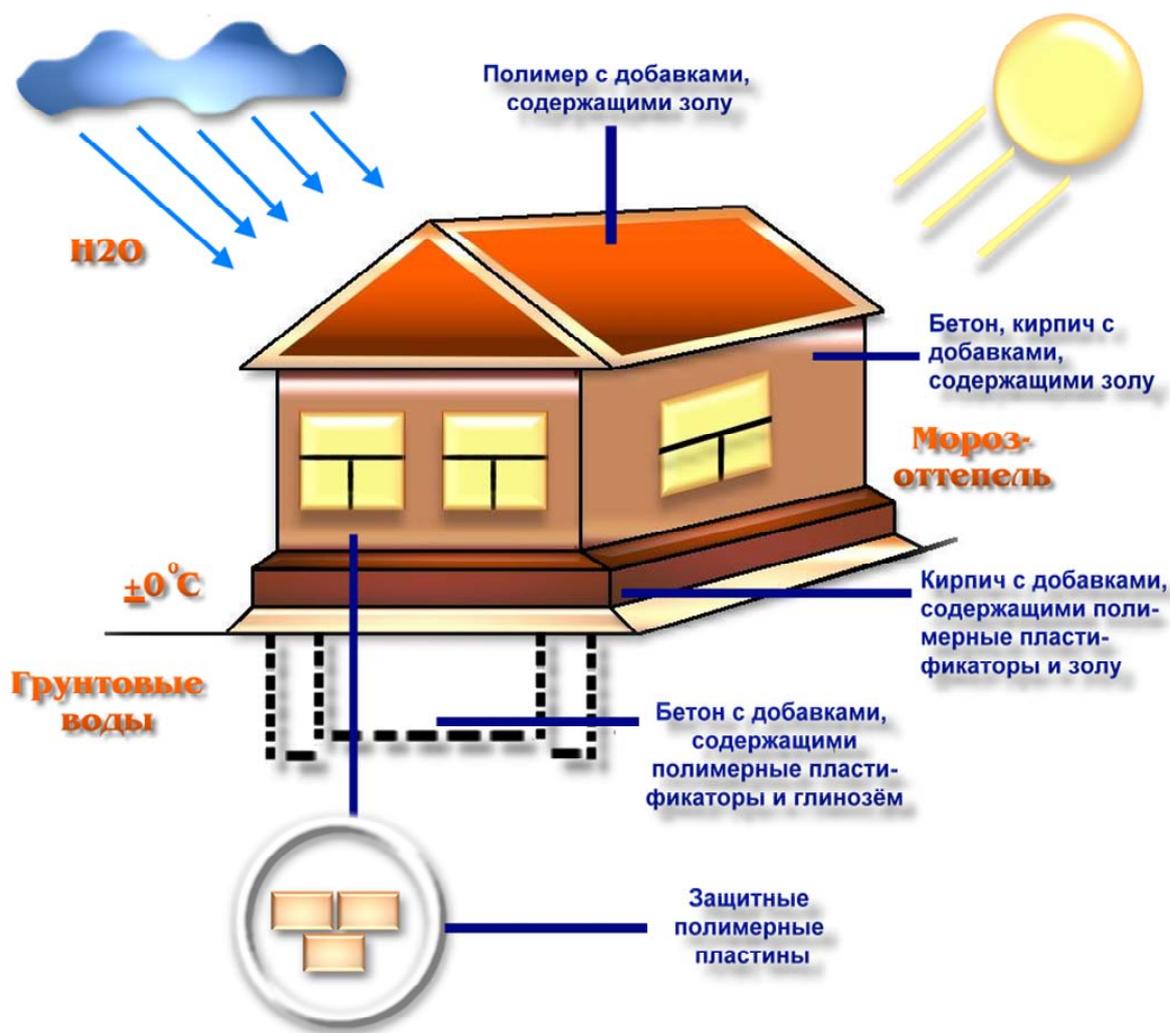


Рис. 1. Модель дома

Для изготовления фундамента используем кирпич с добавками, содержащими полимерные пластификаторы и глинозем.

Для изготовления цоколя используем кирпич с добавками, содержащими полимерные пластификаторы и золу.

Для изготовления стен используем бетон, кирпич с добавками, содержащими золу. Также в смесь бетона замешиваем фотокалитические частицы и красители. Бетон, со временем, из-за загрязнения окружающей среды теряет свой цвет, но с внедрением этих добавок, цвет остается прежним. Солнечный свет активизирует эти частицы, и они, в свою очередь, смешиваются с кислотами, содержащимися в атмосфере и нейтрализуют их.

Для изготовления внутренних стен используем бетон, при изготовлении которого добавляем измельченное стекло. При этом получается удивительный по красоте бетон, который не теряет своих физико-механических свойств.

Для изготовления кровли используем полимер с добавками, содержащими золу.

Предлагаемые нами добавки являются экономически эффективными. Они не влияют отрицательно на здоровье человека, а главное, решают основную проблему: сохранение физических свойств строительных материалов при воздействии на них воды

### **Заключение**

Итак, мы провели, на наш взгляд, большую и полезную научную работу по исследованию изменения и способов сохранения физических свойств строительных материалов под воздействием воды.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1) На сегодняшний день остро стоит проблема разрушения строительных материалов при воздействии воды, поэтому необходимо уже сегодня начать работу по улучшению их свойств.

2) В проекте поднята важная социальная проблема: сохранение строительных сооружений от действия воды.

3) Городское население мало знает о разрушении строительных материалов, хотя очень остро его ощущает. Об этом свидетельствует проведенный нами опрос городских жителей.

4) Разрушение строительных материалов под воздействием воды зависит, в основном, от свойств самих материалов и аномальных свойств воды.

5) Внедрение добавок в строительные материалы усиливает их прочность, морозостойкость, влаготдачу.

6) Выявлены преимущества использования добавки золы в строительные материалы:

- Меньшая пористость строительного материала;
- Меньшее водопоглощение по массе строительных материалов;
- Меньшая водопроницаемость строительных материалов;
- Большая морозостойкость строительных материалов;
- Большая прочность строительных материалов;
- Меньшая истираемость строительных материалов;

- Экономическая неадекватность;
  - Решение экологических проблем.
- 7) С точки зрения молекулярной физики разрушение строительных материалов при воздействии воды обусловлено следующим:
- Возрастанием количества новых и увеличение объема существовавших капилляров и пор;
  - Механической деструкцией, обусловленной замерзанием воды (с соответствующим увеличением объема и распирающим действием льда) в порах материала.

На основании проведенных экспериментов и глубокого изучения теоретического материала сформулированы следующие мероприятия по решению данной проблемы:

1) Внедрение разработанной технологии применения добавок золы к строительным материалам, значительно улучшающей физические свойства строительных материалов и увеличивающей срок их службы.

2) Внедрение предложенной нами модели дома в строительную сферу производства и градостроительства.

3) Расширение географии проекта с целью всесторонней проверки выявленных закономерностей молекулярной физики, влияющих на физико-механические свойства строительных материалов под воздействием воды в регионах страны.

4) Широкое освещение в средствах массовой информации проблем ухудшения свойств строительных материалов под воздействием воды и соответствующих способов противодействия.

В заключение хочется отметить, что следует повысить роль общественности в оценке угрожающей опасности, чтобы ликвидировать нежелательные последствия влияния воды на строительные сооружения и жилые помещения и жизнь человека. Ибо, как сказал французский лексикограф и философ Пьер Буаст, автор универсального словаря французского языка и литературного словаря, прославившийся своими сборниками афоризмов: «Лучше заранее продумать решение проблемы, чем попытаться решить ее тогда, когда будет уже поздно».

## АННОТАЦИИ РАБОТ ЛАУРЕАТОВ КОНКУРСА В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТА»

А.Г. Алексеева (студентка 1 курса магистратуры)

Санкт-Петербургский государственный университет

Научный руководитель – Орлова Н.Е., доцент, к.б.н., СПбГУ; Горбовская А.Д., доцент,  
к.геогр.н., СПбГПУ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ЭКСКРЕТОВ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ (*Aporectodae caliginosa*) ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Антропогенно-нарушенные и загрязненные различными токсикантами почвы являются источником негативного воздействия на природную среду, создают угрозу здоровью человека, жизнедеятельности животных и растений. В качестве загрязнителей почв могут выступать тяжелые металлы, отходы промышленных производств, полициклические ароматические углеводороды, нефтеуглеводороды, техногенные компоненты, радиоактивные вещества, хлорорганические пестициды в остаточных количествах, а также складированные на больших площадях бытовые органические отходы [2]. Исследование процессов трансформации органических веществ в почве – путь к управлению почвенным плодородием [1] и решению ряда прикладных задач, связанных с восстановлением нарушенных экосистем и утилизацией органических отходов. В настоящее время необходим быстрый, дешевый и экологически безопасный способ утилизации органических отходов.

Поскольку полностью предотвратить загрязнение и деградацию окружающей среды невозможно, то основой рационального подхода ремедиации и рекультивации почв и земель является максимальное использование природных процессов самоочистки и самовосстановления [3]. Одним из факторов, влияющим на скорость разложения и гумификации органических остатков в почве является наличие стимулирующих эти процессы агентов. Стимулирование трансформации органических остатков, гумусовых веществ почвы, вносимых органических удобрений однократно добавляемыми извне в крайне малых дозах легкометаболизируемыми агентами получило название «промоторного» или «затравочного» эффекта [5]. Результатом проявления стимулирующего трансформацию органических веществ действия затравочных агентов является изменение интенсивности минерализации органического вещества. На сегодняшний день показано, что экскреты дождевых червей являются промотором как процессов минерализации, так и гумификации растительных остатков [4]. Однако до сих пор феномен промоторного эффекта остается не полностью изученным.

Целью настоящего исследования явилось изучение процессов минерализации и гумификации растительных остатков в присутствии экскретов дождевых червей в условиях модельного эксперимента. Также весьма интересным представлялось изучение физиологической активности новообразованных гуминовых веществ и экскретов, благоприятно сказывающейся на росте и развитии растений, численности и разнообразии внутрисочвенной биоты, а, соответственно, и на экологическом состоянии почвы [6].

Исследования проводились методом экспериментального моделирования процессов разложения свежего растительного материала в лабораторных условиях. Изучалось два варианта опыта: компостирование растительного материала в кварцевом песке с добавлением экскрета дождевых червей и без его добавления. Измельченная зеленая масса пырея перемешивалась с кварцевым песком в соотношении 1:10 и помещалась в пластиковые сосуды. Затем в половину сосудов был добавлен экскрет дождевых червей, полученный по методике, предложенной Н.П. Битюцким. Длительность компостирования составила 90 дней. Компостирование проводилось при оптимальной влажности (60% от полной влагоемкости) и комнатной температуре 20-22°C.

В ходе проведенного модельного эксперимента изучена динамика содержания общего и водорастворимого углерода в компостируемом растительном материале, исследовано влияние экскретов дождевых червей на минерализацию растительного материала, охарактеризованы рН компостируемого материала и водных вытяжек, дана оценка физиологической активности экскретов дождевых червей, выявлено влияние водорастворимых органических веществ компостируемого материала на рост и развитие растений овса.

Показано резкое усиление минерализации органического вещества и увеличение содержания водорастворимого углерода в компостах при добавлении экскретов дождевых червей.

Выявлена высокая физиологическая активность экскретов дождевых червей с концентрацией углерода 0,00014%.

Значительных колебаний показателей рН компостов не наблюдается в связи со значительной буферностью органического вещества. Более высокие значения рН в варианте с затравочным агентом связаны с интенсификацией процессов гумификации растительных остатков.

Установлено, что водорастворимые органические вещества, полученные в ходе эксперимента, могут оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие на рост и развитие проростков овса. Проявление стимулирующего влияния водных вытяжек из компостируемого материала на рост и развитие растений может быть связано с воздействием как продуктов метаболизма микроорганизмов, участвующих в разложении растительного материала, так и новообразованных гуминовых веществ. На основании полученных индексов оптической плотности водных вытяжек можно

утверждать, что в органическом веществе водных вытяжек помимо продуктов метаболизма микроорганизмов присутствуют гуминовые вещества.

Таким образом, восстановление загрязненных земель с помощью экскретов дождевых червей является эффективным и экологически безопасным методом по сравнению с химическими и физическими методами рекультивации. Использование экскретов дождевых червей в качестве биомелиоранта почв способствует сохранению и улучшению окружающей среды, не предполагает крупных единовременных капиталовложений. Проявление затравочного действия и высокая физиологическая активность экскретов дождевых червей позволяют рекомендовать использование данного мелиоранта для рекультивации нарушенных земель.

Однако, для выявления природы и механизма мелиорирующего действия экскретов дождевых червей необходимы дополнительные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Александрова Л.Н. Органическое вещество почв и процессы его трансформации. Л., 1980.
2. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. Наука. Санкт-Петербург. 2004. С. 46-72.
3. Попов А. И., Чертов О. Г. О трофической функции органического вещества почв// Вестн. С.-Петербур. ун-та. 1993. Сер. биол. Вып. 3. № 17.
4. Bityutskii N.P., Maiorov E.I., Orlova N.E. The priming effects induced by earthworm mucus on mineralization and humification of plant residues// European Journal of Soil Biology. 2012. Vol. 50. pp. 1-6.
5. Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects // Soil Biology & Biochemistry. 2000. Vol. 32. pp. 1485-1498.
6. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants// Soil Biol. Biochem. Vol. 34, pp. 1527–1536. 2002.

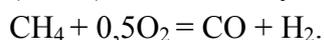
В.А. Воронцов (студент, 4 курс)

Новосибирский государственный технический университет

Научный руководитель – А.Г. Грибовский, к.т.н., научный сотрудник ИК СО РАН

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КАТАЛИЗАТОРА В МИКРОКАНАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ ПАРЦИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА

Настоящая работа посвящена исследованию микроканальной системы для парциального окисления метана (ПОМ) с целью получения синтез-газа:



Особенностью данной системы является высокая удельная производительность, позволяющая применять ее в различных мобильных устройствах. Микроканальный реактор представляет собой слоистую структуру, состоящую из набора металлических пластин с каналами субмиллиметровых размеров, на поверхность которых тонким слоем нанесен катализатор.

Изучение процесса ПОМ проводилось в микроканальном реакторе, содержащем 3 пластины из фехраля, на которых методом фрезерования были изготовлены 8 каналов. В ходе работы была отработана методика, обеспечивающая прочное закрепление катализатора состава Pt/Ni<sub>0,5</sub>MgAlO<sub>2,5</sub> на металлических микроканальных пластинах, работающих при температурах до 900<sup>0</sup>С при многократном термоциклировании.

Экспериментальная установка включала в себя автоматические регуляторы расхода газа, смеситель, трубчатую печь с контролируемой температурой для нагрева реактора, измеритель скорости выходного потока газа, хроматограф для анализа выходной газовой смеси. На вход в реактор подавалась воздушно-метановая смесь с соотношением воздуха к метану 2,39, соответствующим стехиометрии. На основании полученных зависимостей конверсии метана и селективности по монооксиду углерода от температуры и входного потока воздушно-метановой смеси был подобран оптимальный режим работы микроканального реактора. При температуре 750<sup>0</sup>С и входном потоке воздушно-метановой смеси 200 мл/мин обеспечивается 90% конверсии метана и 70% селективности по монооксиду углерода. При этом производительность реактора составила 400 л(Н<sub>2</sub>)/Г<sub>кат</sub>·час. Анализ на газовом хроматографе показал, что газ на выходе имеет следующий состав: Н<sub>2</sub>–39%, СО – 17%, СО<sub>2</sub> – 2%, СН<sub>4</sub> – 2%.

М.П. Дякина (студент, 5 курс)

СПБГТИ(ТУ), кафедра общей химической технологии и катализа, ЛИН ИХС РАН им.

И.В. Гребенщикова

Научные руководители – Н.В. Мальцева к.т.н., доцент СПБГТИ(ТУ), кафедра общей химической технологии и катализа,

О.Ю. Голубева, к.х.н., старший научный сотрудник ИХС РАН им. Гребенщикова

## СИНТЕЗ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО НАНОСОРБЕНТА ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Защита водных ресурсов от загрязнения, в том числе очистка производственных сточных вод – одна из наиболее важных задач современности. Основными источниками загрязнения водных ресурсов тяжелыми металлами являются предприятия черной и цветной металлургии, машиностроения. Известно, что тяжелые металлы вызывают такие болезни, как повреждение нервной системы, раковые

заболевания и ряд других. Среди методов, традиционно используемых для удаления катионов таких металлов, наиболее широко распространен сорбционный.

Алюмосиликаты со слоистой структурой, обладающие такими воспроизводимыми свойствами, как: развитая удельная поверхность, регулярное распределение микропор, термическая стабильность и наличие активных центров различной природы, являются перспективными пористыми материалами для применения в адсорбционных процессах.

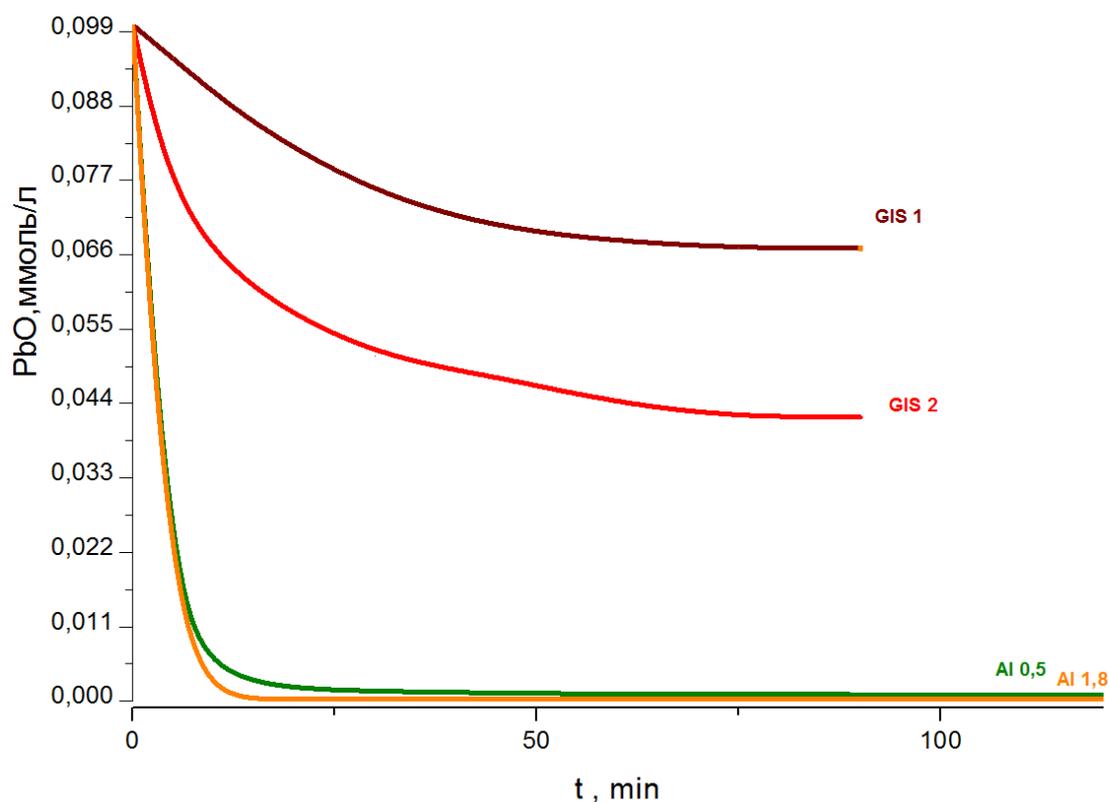


Рис. 1. Сравнение кинетической зависимости снижения концентрации ионов  $Pb^{2+}$  в модельном растворе ( $C_0=0.1$  ммоль/л) образцами Al 0.5; Al 1.8; природной (GIS1) и обогащенной природной (GIS2) глинами

В лаборатории исследования наноструктур ИХС РАН был успешно разработан метод гидротермального синтеза для получения соединений со структурой монтмориллонита. Гидротермальной обработке подвергали гели, состав которых рассчитывали, исходя из идеальной формулы конечного продукта, имеющей следующий вид  $Na_x(Al, Mg)_{2-3}Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ . Дефицит поверхностного заряда  $x$  варьировали от 0 до 1.9. Постепенное замещение части магния на алюминий в исходном геле, подвергаемом гидротермальной обработке, позволило получить образцы, характеризующиеся определенными, зависящими от состава характеристиками. Средний размер частиц монтмориллонитов, определенный по данным рентгеновской дифракции, составляет  $40 \pm 7$  нм. Для синтезированных образцов

величина удельной поверхности находится в диапазоне от 90 до 200 м<sup>2</sup>/г в зависимости от состава (AlI.8 (Na<sub>1.5</sub>Al<sub>1.8</sub>Mg<sub>0.2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) Суд.=92 м<sup>2</sup>/г; Al0.2 (Na<sub>0.74</sub>Al<sub>0.2</sub>Mg<sub>1.33</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) Суд.=201 м<sup>2</sup>/г; Al 0.5(Na<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Mg<sub>1.5</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) Суд.=143 м<sup>2</sup>/г.

Величина межслоевого расстояния синтезированных образцов в зависимости от состава находится в пределах от 0,9 до 1,2 нм, катионно-обменная емкость – от 20 до 120 мг-экв./100г.

Для синтезированных образцов была исследована кинетика сорбции ионов свинца из раствора. Сорбцию проводили из модельных растворов нитрата свинца (II) с начальной концентрацией ионов металлов 0,1 ммоль/дм<sup>3</sup> при соотношении 0.5 г монтмориллонита на 25 дм<sup>3</sup> раствора. Из рис. 1 видно, что образцы сорбируют максимальное количество металла уже через 30 минут после начала опыта, концентрация ионов свинца за это время уменьшается в 250 раз, в то время как природная и обогащенная природная глины могут снизить концентрацию максимально в 5 раз.

Синтезированные образцы обладают разными структурными характеристиками, и разной удельной поверхностью, а следовательно и сорбционными свойствами, что позволяет разрабатывать на их основе сорбционные материалы с оптимальными характеристиками.

Сфера использования синтетических образцов может заключаться в извлечении металлов из растворов, а также в использовании их в качестве сорбентов и носителей в изделиях специальной техники и для очистки сточных вод, а также в качестве материалов для создания фильтров.

А.О. Колинченко (студент группы ЭМ-95, ФМА)

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель – Гурова Е.Г., ФГБОУ ВПО «НГТУ», к.т.н.,

доцент кафедры ЭТК

## ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА С НУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Использование энергетических машин не только на производстве, но и на всех видах транспорта (автомобили, суда, метро, трамваи, троллейбусы) неизбежно приводит к возникновению вибрации. Вибрация отрицательно влияет на надежность, долговечность самих машин, на сооружения, аппараты, в которых они установлены, а также на системы автоматического управления. Не редкость, что вибрация является одной из причин аварий. Но особенно вредно вибрация влияет на человека. Человек, управляя и пользуясь всеми видами транспорта почти каждый день, невольно попадает

под негативное влияние вибрации, которая в последствии вызывает различные заболевания. Поэтому сегодня остро стоит проблема снижения уровней передаваемых вибраций.

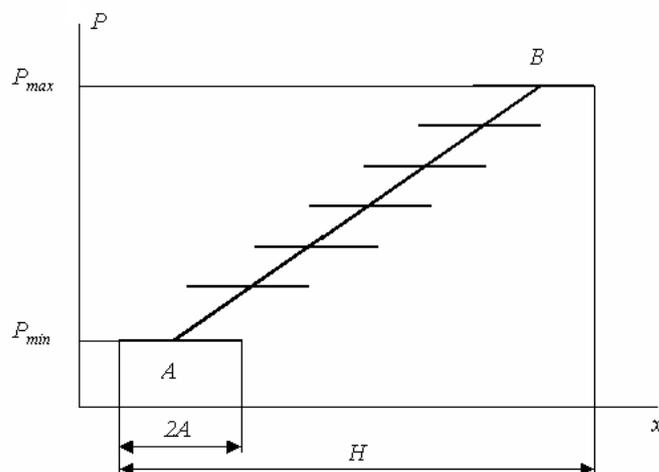


Рисунок 1 – Силовая характеристика перестраиваемого виброизолирующего механизма

За последнее время создано достаточно много средств виброзащиты, но большинство из них не снижают уровни колебаний до норм, требуемых ГОСТами. Наиболее перспективным методом снижения уровней вибраций, создаваемых энергетическими установками, является использование виброзащитных подвесок с плавающим участком нулевой жёсткости. Принцип работы таких устройств показан на рисунке 1. При ограниченных значениях виброизолирующего хода подвески  $H$  и при заданном диапазоне изменения усилий от  $P_{max}$  до  $P_{min}$ , передаваемых от защищаемого объекта вибрирующему, силовые характеристики виброизолирующих механизмов, обеспечивающих идеальную виброизоляцию, представляют собой бесконечное множество отрезков прямых, равных по длине  $2A$  (размах колебаний), параллельных оси абсцисс и расположенных своими серединами на отрезке  $AB$  прямой, наклоненной к оси абсцисс под углом. Тангенс такого угла равен жёсткости подвески [3].

В таких подвесках присутствуют две основные составляющие: упругий элемент и включенный параллельно ему компенсатор жёсткости – устройство, имеющее падающую силовую характеристику, то есть отрицательный коэффициент жёсткости. Суммарная жёсткость виброизолятора определяется суммой жёсткостей упругого элемента и компенсатора, следовательно, жёсткость подвески может быть сведена к нулю, что позволяет обеспечить идеальную виброизоляцию.

Предлагаемый в [1, 2] электромагнитный компенсатор жёсткости (ЭКЖ) наиболее полно отвечает требованиям идеальной виброизоляции и обладает рядом преимуществ над ранее предложенными механическими компенсаторами жёсткости. Такой виброизолятор характеризуется отсутствием сил трения и инерции, легко

поддается автоматизации, а также он обладает системой перестройки, перераспределяющей напряжение на катушках электромагнитов при изменении нагрузки.

В связи с вышесказанным, создание и исследование виброизолирующих систем с перестраиваемыми компенсаторами жесткости является актуальной научной задачей. Поэтому работа направлена на разработку конструкции и исследование виброизолирующей подвески с электромагнитным компенсатором жесткости, которая может служить эффективным виброзащитным средством на любом виде транспорта.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент № 004696 Виброизолятор с электромагнитным компенсатором жесткости / ФГОУ ВПО «НГавт», авторы: Е.Г. Гурова, В.Ю. Гросс (РФ). – № 2011103409/11; заявл. 31.01.2011. – 4 с.: ил.
2. Гурова, Е. Г. Виброизолирующие подвески транспортных энергетических установок с нелинейными электромагнитными компенсаторами жесткости / Е.Г.Гурова. – 2012. – Издательство НГТУ: Новосибирск, 2012. – 156 с.
3. Зуев, А. К. Высокоэффективная виброизоляция судового энергетического оборудования [Текст] / А.К.Зуев, О.Н. Лебедев. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 1997. – 119 с.

А.В. Ледовских, В.В. Иванов (студенты группы ЭМ-95, ФМА)  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»  
Научные руководители – Гурова Е.Г., Мятаж С.В., ФГБОУ ВПО «НГТУ», к.т.н.,  
доценты кафедры ЭТК

### РАЗРАБОТКА ФАЗОВОГО РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Развитие микроэлектроники и широкое применение ее изделий в промышленном производстве, в устройствах и системах управления самыми разнообразными объектами и процессами является в настоящее время одним из основных направлений научно-технического прогресса. Использование микроконтроллеров в изделиях производственного и культурно-бытового назначения не только приводит к повышению технико-экономических показателей изделий (стоимости, надёжности, потребляемой мощности, габаритных размеров) и позволяет многократно сократить сроки разработки и отодвинуть сроки морального старения изделий, но и придаёт им принципиально новые потребительские качества, такие как расширенные функциональные возможности, модифицируемость, адаптивность и т.д.

Развитие электромеханических систем привело к созданию широкого спектра систем управления на основе микроконтроллерных устройств. Целью научно-

исследовательской работы является разработка фазового регулятора на основе управляемого выпрямителя.

Задачи: создание схемы управления нагрузкой (лампа накаливания) на основе управляемого выпрямителя; выбор микроконтроллера; разработка драйвера.

В результате можно сказать, что основная цель работы была выполнена - разработан фазовый регулятор на основе управляемого выпрямителя. Для этого была создана схема управления нагрузкой на основе управляемого выпрямителя, выбран микроконтроллер ATmega16 [1], разработан драйвер на основе биполярного транзистора.

Достоинством данной научно-исследовательской работы является её достаточно простое исполнение на практике, и сама по себе она имеет множество направлений, которые можно взять для дальнейшего более глубокого изучения, такие как: программирование микроконтроллера, программирование драйвера, улучшение схемы управления нагрузкой на основе управляемого выпрямителя в сторону её упрощения и уменьшения стоимости за счёт выбора другого микроконтроллера или драйвера.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Курилин, А. Микроконтроллеры AVR Atmel: развитие продолжается. Компоненты и технологии./А.Курилин. – 2006. – № 1. – С. 84–87.

О.А. Михалёва (студент, 5 курс)  
ФГБОУ ВПО «НГТУ»

Научный руководитель – А.А. Штанг, к.т.н., доцент кафедры ЭТК НГТУ

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В условиях глобализации Российская Федерация принимает международные стандарты качества, в том числе экологические стандарты Евросоюза для автомобилей, которые регламентируют содержание в выхлопе автомобилей углеводородов, оксидов азота, угарного газа и твердых частиц [9]. В России по состоянию на 2012 год действует стандарт Евро-2 для топлива и Евро-3 для автомобилей [4]. В современное время на автомобильный транспорт приходится от 39 до 63% загрязнения окружающей среды, масштабы которой глобальны [3]. Многие производители уделяют этому внимание, постоянно разрабатывая новые конструкции экологического гибридного транспорта, являющегося наименее вредным для окружающей среды. Ценность гибридных транспортных средств (ТС) в том, что они значительно снижают вредные выбросы в

окружающую среду, что соответствует стандартам, и при этом не теряют динамических качеств и остаются привычным для всех видов транспорта.

Целью работы является проектирование гибридного автомобиля на основе современных электрохимических накопителей энергии (ЭХН) и конденсаторов двойного электрического слоя (КДЭС).

Поставленные задачи:

- провести ретроспективный анализ отечественного и зарубежного рынка гибридомобилей с учетом установленных критериев;
- на основе проведенного анализа определить модель ТС для последующих расчетов;
- выбрать оптимальную схему гибридной установки для данного ТС;
- провести аналитический обзор существующих в настоящее время ЭХН и КДЭС разного типа;
- выполнить тяговый энергетический расчет для заданного типа гибридного ТС;
- определить динамические показатели движения ТС на основе перспективных видов ЭХН и КДЭС.

На основе проведенного анализа определена модель ТС для расчетов – гибридомобиль Citroen C4 HDi Hybrid. В работе предложен проект оснащения данного гибридомобиля последовательной гибридной конфигурацией как наиболее эффективной при движении в режиме частых остановок, торможений и ускорений, движении на низкой скорости, что соответствует движению ТС в городском цикле [2].

В работе проанализированы различные типы ЭХН и КДЭС по выделенным критериям, таким как удельная энергоемкость, удельная мощность, срок службы и др. В свою очередь, выявлено, что КДЭС перспективны для применения на ТС в следующих типах: пусковые, буферные, тяговые. В проекте гибридного автомобиля предложено аккумулирование энергии электрических торможений осуществлять с помощью КДЭС, т.к. они выдерживают множество циклов заряд/разряд и обладают высокой удельной мощностью.

Из всего многообразия АБ наиболее распространенными являются: кислотные (свинцово-кислотные), щелочные (NiCd и Ni-MH), литиевые. В работе проведен сравнительный обзор ЭХН следующих типов:

- свинцово-кислотных (PbSO<sub>4</sub>) АБ [7];
- никель-металлогидридных (Ni-MH) АБ [6];
- литий-ионных (Li-ion) АБ [5];
- литий-полимерных (Li-pol) АБ;
- серебряно-цинковых (AgZn) АБ [8].

На основе полученных данных выбран тип ЭХН – литий-ионная АБ, обладающая рядом преимуществ, такими как: высокая энергетическая плотность, низкий саморазряд, отсутствие эффекта памяти, простота обслуживания.

Проведен тягово-энергетический расчет для определения необходимой мощности источника энергии на движение ТС, в результате которого получен расход

энергии на движение в режиме тяги  $195 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}$  и в режиме торможения  $105,6 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}$ . В частности была получена тяговая характеристика  $F(V)$ , характеристики действующих сил тяги и торможения, а так же кривая основного удельного сопротивления движению.

В ходе работы построены кривые движения гибридомобиля графоаналитическим методом, на основе которых проводился энергетический расчет. В результате получен расход энергии на движение в режиме тяги и в режиме торможения с учетом расхода энергии на собственные нужды ТС.

На основе тяговых расчетов устанавливались массогабаритные и энергетические показатели накопителей энергии. Для обеспечения энергией гибридомобиля в режиме тяги наиболее подходящим является Li-ion аккумулятор. В работе выбрана экспериментальная Li-ion АБ фирмы Envia Systems, обладающая высокой удельной энергоемкостью при значительно небольшой массе. С учетом величины рассчитанного расхода энергии подобран блок АБ массой 40,88 кг, от которого ТЭД получает питание в экстренном режиме движения.

Так же в работе установлена зависимость объема накопительного элемента (КДЭС) от энергии, вырабатываемой в режиме электрического торможения. На основе графического построения однозначно определяется скорость максимального разгона ЭПС от буферного накопителя в зависимости от скорости начала рекуперативного торможения. При проектировании гибридомобиля принят модуль КДЭС фирмы MAXWELL/BCAP1200P270 K04, который оптимально подходит для обеспечения запаса энергии торможения на ПС.

Результатом данного исследования является значительное повышение конкурентоспособности гибридного ТС Citroen C4 HDi Hybrid по сравнению с предыдущей его модификацией.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Аккумуляторные батареи для электромобилей. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://www.electro-mobiles.ru>
2. Виды гибридных приводов. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://www.autoorsha.com>
3. Гибридные автомобили - экологичный и экономичный транспорт XXI века. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://7ya.tomsk.ru>
4. Лента.ру. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://www.lenta.ru/articles/2012/08/17/gases>
5. Литиево-ионный аккумулятор. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://lithium.ru>
6. Никель-металл-гидридный аккумулятор. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki>
7. Свинцовые и щелочные аккумуляторы - технические характеристики аккумуляторов. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://roadmachine.ru>

8. Серебряно-цинковый аккумулятор. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki>
9. Экологические стандарты Евросоюза для автомобилей. [Электронный ресурс] – Режим доступа – URL: <http://eco.ria.ru/documents/20090901>

Д.В. Немова (студент 5 курс)  
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

Научный руководитель – Ватин Н.И., д.т.н., проф., декан ИСФ, зав. каф. «ТОЭС»,  
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ ДЕТСКИХ САДОВ

*Целью данной работы* является анализ результатов энергетических обследований и поиск возможных путей решения энергосбережения и повышения энергетической эффективности бюджетных организаций (детских садов) с учетом особенности этих объектов и обоснование их экономической эффективности.

В России на энергопотребление зданий уходит около 43 % всей вырабатываемой тепловой энергии. Для решения проблемы энергоэффективности необходим комплексный подход. Здание тем более энергоэффективно, чем меньше оно теряет тепла, энергии, чем выше сопротивление теплопередаче его ограждающих конструкции и чем более экономически целесообразны введенные в нем мероприятия по энергосбережению.

Проведенное энергетическое обследование бюджетных учреждений (детские сады) показывает большие резервы энергосбережения. По результатам обследований, было установлено, что наибольший процент от затрат на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) составляет тепловая энергия (40-50% в среднем), стоимость которой с каждым годом возрастает. Из данного вывода можно сделать заключение, что наибольший потенциал в энергосбережении имеют инженерно-технические мероприятия по экономии тепловой энергии.

Одним из параметров оценки энергоэффективности здания является удельная тепловая характеристика здания  $q$ . Ее фактическое значение может быть определено по формуле:

$$q = \frac{1000 \times Q \times 4187}{D_d \times V_{зд}} \times 0,0116 \text{ (Вт/куб.м } C^0 \text{)},$$

где  $Q$  – фактическое потребление тепловой энергии в Гкалл,  $D_d$  – градусо-сутки отопительного периода, 1000, 4187 и 0,0116 – переводные коэффициенты,  $V_{зд}$  – отапливаемый объем здания (куб. м).

Во время проведения энергетического обследования по всем объектам была определена расчетно-нормативная и фактическая удельная тепловая характеристика здания а также зависимость ее фактического значения от качества строительства и эксплуатации здания (процент износа), степени остекления фасада, площади здания, года ввода в эксплуатацию здания и других параметров, влияющих на потребление тепловой энергии. Полученные в результате анализа зависимости представлены на рис. 1, 2, 3, 4.

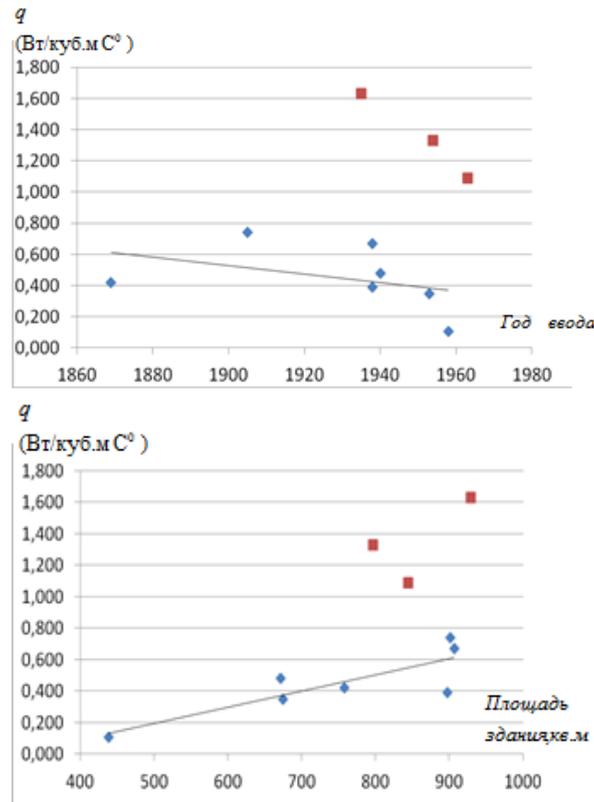


Рис. 1, 2. Зависимость удельной тепловой характеристики от года постройки и площади здания.

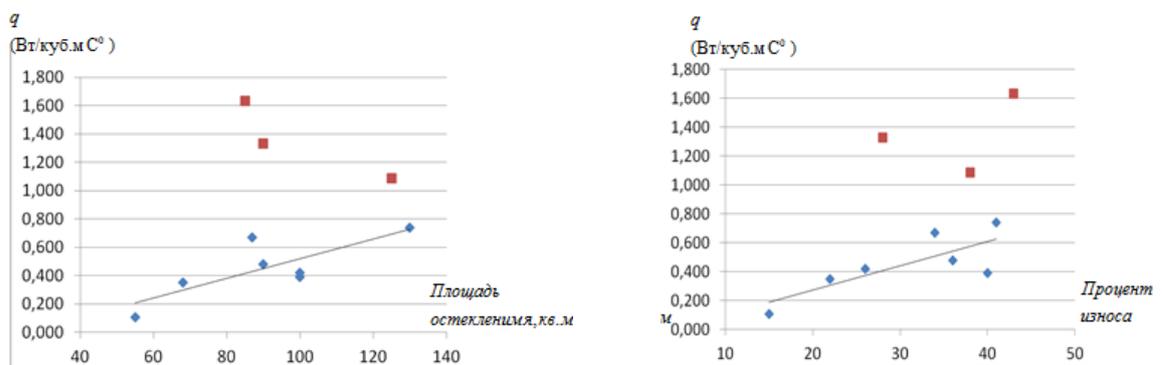


Рис. 3, 4. Зависимость удельной тепловой характеристики от площади остекления процента износа здания

Как видно из рисунка 1, чем «старше» здание, тем больше потребление тепловой энергии. Это связано с деградацией свойств ограждающих конструкций со временем и с применением новых, более энергоэффективных строительных материалов.

Удельная тепловая характеристика здания зависит также и от площади самого объекта (рис. 2) Большое влияние на теплотребление оказывает коэффициент компактности. Здания, имеющие прямоугольную форму в плане, имеют тепловую характеристику ниже, чем здания разной этажности с большей площадью ограждающих конструкций.

При проведении энергетических обследований было выявлено, что до 20 % тепловой энергии расходуется на обогрев инфильтрованного через неплотные стыки дверных и оконных блоков воздуха. И чем больше площадь остекления, тем больше потребление тепловой энергии (рис. 3). Оконные блоки в зданиях большинства детских садов находятся в плохом состоянии и требуют замены на энергосберегающие двойные стеклопакеты.

По результатам энергоаудита был сделан вывод о том, что фактические теплопотери зданий детских садов превышают расчетно-нормативные в среднем на 30-40%. Основная причина такого расхождения нормативных и фактических показателей связана с дефектами ограждающих конструкций и чем выше процент износа здания, тем больше таких дефектов и тем выше теплопотери (рис. 4).

Для экономии тепловой энергии необходим ряд энергосберегающих мероприятий, позволяющих устранить дефекты ограждающих конструкций или снизить их влияние на теплотребление здания. Примерам инженерного решения по повышению теплозащитных свойств ограждающих стен может стать строительство навесных вентилируемых фасадов при одновременном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов с погодозависимой автоматикой.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Горшков А. С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий / А.С. Горшков// Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9-13.
2. Тазеева Е.Т., Горшков А.С. Расчет энергоэффективных зданий // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: сборник трудов Всеросс. научно-технич. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 74-75.
3. Малоедов С.Д., Выгузов В.Н. Вентилируемы фасады-эффективное решение проблемы энергосбережения. // Строительные материалы. 2001. № 5. С. 24-24.
4. Стародубцев В.Г., Поветкин С.В. Обеспечение эксплуатационных свойств ограждающих конструкций//Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 5. С. 45-46.

А.Г. Николаева (магистрант, 1 курс)

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Научный руководитель – П.Н. Дробот, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Управление  
инновациями»

## ШАХМАТЫ КАК ИННОВАЦИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ РАЗВИТИЯ КРЕАТИВНОСТИ МЫШЛЕНИЯ СТУДЕНТОВ

В условиях развития инновационной деятельности совершенно меняется отношение к главной производительной силе общества – человеку. Для нашего времени актуальна личность оригинальная, остроумная, способная к творчеству и научным достижениям, способная быстро перерабатывать информацию об изменениях и новизне окружения, анализировать и структурировать происходящее. Интеллект стал новой формой собственности. Направленный интеллект, то есть способность приобретать и применять знания, является новым источником дохода.

В инновационной деятельности очень важна роль высококвалифицированных специалистов и она постоянно будет расти. Поэтому в центре внимания находится становление креативной личности, способной генерировать новое знание, разрабатывать и внедрять инновационные идеи, способной к творческой самореализации.

Творческое наследие отечественных и зарубежных психологов по исследованию проблемы интеллекта и креативности велико и разнообразно. Опираясь на материалы, полученные в результате многочисленных исследований, можно говорить о существовании взаимосвязи интеллекта и креативности. Эта взаимосвязь является одним из катализаторов развития личности и нашего общества в целом.

Поиск новых форм и методов развития личностных качеств инноваторов, приводит к забытому старому. Роль шахмат в развитии качеств мышления и, следовательно, качества жизни, неоспорима. Шахматы уже давно стали символом интеллектуальной деятельности. По словам Стефана Цвейга, «эта игра выдержала испытание временем лучше, чем все книги и творения людей, это единственная игра, которая принадлежит всем народам и всем эпохам, и никому не известно имя божества, принесшего ее на землю, чтобы рассеивать скуку, изощрять ум, ободрять душу» [1].

Известно, что занятия шахматами положительно влияют на развитие таких психических процессов, как восприятие, воображение, память, мышление, внимание. В ходе обучения азам мудрой игры формируются волевые качества: целеустремленность, дисциплинированность, настойчивость. Игра в шахматы содействует совершенствованию таких ценнейших качеств, как усидчивость, внимательность, самостоятельность, терпеливость, изобретательность, гибкость. Бесспорно положительное влияние шахмат на самообладание и выдержку, что является

неизбежной борьбой с отрицательными эмоциями: неуверенностью, страхом и тревогой.

Шахматы учат рассуждать, считать на несколько ходов вперед, раскрывать замысел другого человека, критически мыслить. Самостоятельно принимая решения в ответственный момент, играющий учится рисковать. Развитие креативного мышления у студентов возможно путем творческого выражения самого себя через самооценку и личностные индивидуальные особенности. Это открывает пути к дальнейшему самосовершенствованию, самореализации и творческому росту, соответствующему современному социально-культурному запросу, и способностью в последующем обеспечить предпосылки более высокого уровня развития креативного мышления у студентов в учебном процессе и профессиональной деятельности [2].

Автором разработана методика занятий шахматами для развития познавательных процессов и креативного мышления [3], по которой в настоящее время на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники запущен проект по исследованию динамики развития способностей студентов. Эксперимент состоит из трех этапов и будет проходить в течение 2-х лет. Первый этап – вводное исследование креативности мышления с помощью методик Э.Торренса, Дж.Гилфорда и Д.Векслера. Второй этап – проведение систематических занятий по шахматам со студентами, входящими в экспериментальную группу. Третий этап – заключительное тестирование и анализ результатов. Для проверки влияния предложенной инновационной методики по обучению шахматам на развитие творческого мышления, параллельно с экспериментальной группой будут проводиться исследования контрольной группы, в которую входят студенты не подверженные экспериментальному воздействию. Положительные результаты исследований могут способствовать возрождению интереса к интеллектуальной игре, утверждению мнения о включении шахмат в образовательные программы в высшем учебном заведении для подготовки кадров, способных на научные открытия и инновации.

Помимо исследований динамики качества мышления студентов, считаю целесообразным для научно-практической деятельности, развития и становления личности инноватора, вовлечение молодых людей в разработку систем искусственного интеллекта. Разработанный автором проект основывается на создании шахматной лаборатории под названием «Chess4i» в Студенческом Бизнес Инкубаторе ТУСУРа. Основываясь на идеях шахматного всеобуча в Томске, создание шахматной лаборатории – первого в России научно-исследовательского центра шахмат, послужит укреплению за Томской областью звания старинного города науки, культуры и образования. Направления научно-исследовательской работы шахматной лаборатории определены. Студенты разных факультетов смогут найти здесь свое направление с учетом особенностей своей специальности. Будущие специалисты в области электронной техники, радиотехники и радиоконструкторы смогут разрабатывать электронные компоненты: электронные шахматные доски и часы. Студентам факультета вычислительных систем и систем управления будет интересно направление

работы с интернет пространством и направление по созданию программ различного целевого назначения: разработка сайтов для дистанционного обучения шахматам; разработка программ для проведения шахматных турниров в сети интернет; разработка программ, обучающих игре на различных стадиях шахматной партии и другие. Наиболее интересным и наукоемким направлением работы лаборатории, с точки зрения автора, является направление по созданию алгоритма принятия решений с использованием искусственного интеллекта. На базе лаборатории студенты смогут писать курсовые, дипломные и диссертационные работы, а так же может быть реализовано групповое проектное обучение.

Важнейшим направлением образования является стимулирование инновационной активности и научно-технического творчества студентов, без чего невозможно формирование нового поколения глобально конкурентоспособных кадров в сфере науки и инновационного предпринимательства. Именно этому посвящены все стороны предложенного инновационного проекта.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Г.К. Каспаров. Шахматы как модель жизни // Изд. М., «Эксмо» 2007.
2. З.Л. Тульженкова. Инновационный подход к развитию креативного мышления современной молодежи // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Психологические науки. – 2012. – №1. – с.17-21.
3. В.В. Орлова, А.Г. Николаева. Исследование познавательных процессов у детей с ограниченными возможностями здоровья. Влияние игры в шахматы на их развитие // Научный журнал «Alma Mater» (Вестник высшей школы). Педагогика и психология. – 2012 г. – №11. – с.61–69.

А.А. Сергеев (студент группы ЭМ-95, ФМА)  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»  
Научный руководитель – Гурова Е.Г., ФГБОУ ВПО «НГТУ», к.т.н.,  
доцент кафедры ЭТК

### ВИБРОЗАЩИТНОЕ КРЕСЛО ВОДИТЕЛЯ ТРОЛЛЕЙБУСА С ЭФФЕКТОМ НУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ

Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция уменьшения веса конструкций различных транспортных средств, при одновременном увеличении мощности их энергетических установок, приводит к значительному росту уровней вибраций на этих транспортных средствах. Наиболее остро проблема виброзащиты стоит в автомобилестроении, судостроении и локомотивостроении, где в качестве энергетических установок используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Низкочастотные колебания, создаваемые ДВС, оказывают значительное негативное влияние на надёжность и работоспособность различных устройств, и наиболее вредны для человека, вызывая различные заболевания. На транспорте преобладают низкочастотные колебания, которые совпадают с частотой собственных колебаний тела человека, что очень вредно сказывается на организме. Поэтому сейчас применяются разные конструкции виброзащитных кресел, которые позволяют защитить водителя (оператора) [2]. А также применяется множество способов уменьшения вибрации – это динамическое уравнивание двигателей, применение динамических гасителей колебаний, активные виброзащитные системы с дополнительным источником вибрации и т.д. Наиболее распространенным способом уменьшения передаваемой от двигателей вибрации является установка этих двигателей на виброизоляторы. Виброизоляторы (как правило, резинометаллические) имеют простую конструкцию, достаточно надежны и практически не требуют обслуживания. Однако существующие пассивные виброизоляторы не отвечают современным требованиям виброизоляции. Наиболее перспективным методом снижения уровней вибраций является применение виброизолирующих устройств с плавающим участком нулевой жёсткости. Этот тип устройств наиболее полно отвечает требованиям идеальной виброизоляции.

В результате исследований из всех компенсаторов жёсткости в виброизолирующих креслах транспортных средств наиболее применим электромагнитный компенсатор жёсткости [1], который обладает рядом преимуществ над другими компенсаторами и наиболее эффективно защищает человека от вредного влияния вибрации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гурова, Е. Г. Виброизолирующие подвески транспортных энергетических установок с нелинейными электромагнитными компенсаторами жёсткости / Е. Г. Гурова. – 2012. – Издательство НГТУ: Новосибирск, 2012. – 156 с.
2. Пахомова, Л. В. Интегрированная система снижения вибрации: автореферат дис. канд. техн. наук / Пахомова Людмила Владимировна. – Новосибирск, 2009. – 19 с.

А.Е. Тептин (студент, курс 1М)  
Новосибирский государственный технический университет  
Научный руководитель – Е.В. Рабинович, д.т.н., проф. кафедры Вычислительной  
техники, НГТУ

## ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ ПЛАСТА

Одним из наиболее распространенных методов интенсификации работы малорентабельных нефтяных скважин является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Технология ГРП заключается в формировании трещин в нефтенасыщенных горных породах, что приводит к значительному увеличению проницаемости пласта. Трещины закрепляются специальным зернистым материалом – проппантом, который препятствует их смыканию. Для того чтобы правильно распределить проппант, важно знать геометрию трещины, поэтому при повышении давления, колебания земной поверхности, в области вокруг забоя, фиксируются специальными сейсмодатчиками, для того, чтобы впоследствии, по полученным данным можно было построить пространственную модель трещины. Стоит отметить, что существуют и альтернативные способы определения геометрии трещин, но они предполагают значительные материальные затраты, поэтому для построения моделей, чаще всего используются данные, полученные сейсмодатчиками [2].

Проблема такого подхода состоит в том, что сейсмодатчики фиксируют не только колебания, связанные с разрывом, но и колебания, вызванные сторонними источниками. Поэтому, для выделения полезного сигнала на фоне помех применяется частотно-временная фильтрация.

При выполнении фильтрации в частотно-временной области, учитывается ряд особенностей сигнала, позволяющих различать между собой колебания земной поверхности. Идея заключается в том, что колебания, вызванные разными источниками, происходят на разных частотах, следовательно, можно выявить частоты мешающих колебаний, и подавить их в частотном спектре. Для анализа частотных составляющих сигнала применяются алгоритмы быстрого и оконного преобразования Фурье [1].

Анализируя частотный спектр сигнала можно сделать определенные выводы о том, какие частоты подвергнуть фильтрации, опираясь при этом на уже имеющиеся данные. Так, например, известно, что помехи с частотой 50 Гц, могут быть созданы, находящимися вблизи скважины линиями электропередач. Оконное преобразование Фурье дает относительное представление о временной протяженности сигнала на определенной частоте. Сигналы, с протяженностью, превышающей допустимые

временные рамки, подвергаются фильтрации, с использованием специальных частотных фильтров, реализованных в среде MATLAB.

Для выявления дополнительных фильтруемых частот, строится гистограмма зависимости сильнейшей частоты в спектре сигнала, от максимума амплитуды на определенном отрезке. На гистограмме производится поиск обертонов – частот, кратных опорной частоте. Впоследствии обертоны подвергаются фильтрации режекторным фильтром, при этом опорная частота не фильтруется, так как предполагается, что сигнал на данной частоте может относиться к ГРП.

Для устранения частот мешающих колебаний применяются фильтры различных типов: фильтры высоких частот (ФВЧ), низких частот (ФНЧ), а так же режекторные и полосовые фильтры.

Результатом частотно-временной фильтрации являются файлы, составленные отдельно для каждого набора точек (суммарных сейсмограмм, полученных сейсмодатчиками в различных областях нефтеносного пласта). Каждый такой файл состоит из записей, последовательно внесенных в него, при обходе отфильтрованного набора. Запись включает в себя параметры, характеризующие конкретную точку. Этими параметрами являются координаты точки  $X$  и  $Y$ , глубина измерения  $H$ , максимальное значение амплитуды в данной точке  $A$ , а так же момент времени  $T$ , в который это значение было зафиксировано.

Перед тем как записывать в файл данные о конкретной точке, производится проверка на ее соответствие определенному критерию. Изначально мы вычисляем значение максимальной амплитуды в данной точке. И если это значение оказывается меньше заданного нами порога, то в этом случае точка отбрасывается. Если максимальная амплитуда больше этого порога, то информация о точке заносится в файл.

В дальнейшем, на основании полученных файлов строится пространственная модель трещины.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гурвич И. И. Сейсмическая разведка / И. И. Гурвич, Г. Н. Боганик. – М.: Недра, 1980. – 551с.
2. Геофизические методы исследований / В. К. Хмелевской [и др.]. – Петропавловск-Камчатский.: КГПУ, 2004. – 232 с.

## **РАБОТЫ ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ПРОЕКТ АСПИРАНТА»**

А. В. Лысянников (аспирант)

ФГАОУ ВПО Сибирский Федеральный Университет Институт нефти и газа  
Научный руководитель – Р. Б. Желукевич, к.т.н.,  
профессор кафедры АвиаГСМ СФУ ИНиГ

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНЕГООЧИСТКИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКТА НАВЕСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

#### **Реферат**

*Ключевые слова:* снежно-ледяные образования, энергоемкость, дисковый рабочий орган, цепной ударный рабочий орган.

Из всех существующих способов борьбы с гололедом (фрикционный; химический; тепловой, механический), механический способ является наиболее экономичным, технологически простым в применении, экологически чистым и обеспечивает практически полное восстановление качеств дорожного покрытия по сцеплению с шинами автомобилей, но существующие снегоуборочные машины, не способны достаточно эффективно и своевременно разрушать снежно-ледяные образования в силу их высокой прочности и конструктивной непригодности рабочего оборудования, поэтому для обеспечения требуемого качества очистки дорожных покрытий используется одновременно три единицы снегоуборочной техники.

Для уменьшения количества задействованной техники в технологическом процессе снегоочистки разработан комплект навесного снегоуборочного оборудования, использование которого, позволит совместить операции по разрушению и удалению снежно-ледяных образований, увеличить производительность и эффективность применения базовой техники, снизить экономические расходы на зимнее содержание дорог (на топливо – 62,4 %, на заработную плату обслуживающему персоналу – 63,8 %).

#### **Введение**

Проблема зимнего содержания покрытий автомобильных дорог и на территории Российской Федерации является весьма актуальной, так как в последнее десятилетие

наблюдается стремительный рост сети автомобильных дорог, их грузонапряженности, интенсивности и скорости движения автомобилей. Согласно утвержденной программы Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», протяженность автомобильных дорог общего пользования в РФ к 2030 году достигнет более 1,35 миллиона километров.

При не своевременном удалении снега с поверхности дороги или посыпки противогололедным составом, через некоторое время вследствие прикатывания его колесами автомобилей на дорожном покрытии образуется снежный накат, плотность которого достигает  $500 \text{ кг/м}^3$ . Наличие уплотненного снега на дорожном покрытии чревато изменением транспортно-эксплуатационных характеристик автомагистралей и как следствие увеличением случаев дорожно-транспортных происшествий, образованием автомобильных пробок и снижением скорости движения транспортных средств в 2 – 2,5 раза, их производительности на 30 – 40% и увеличению себестоимости перевозок на 25 – 30%. Зимняя скользкость является причиной до 40% дорожно-транспортных происшествий [1].

Среди основных задач зимнего содержания дорожных покрытий можно выделить: сроки ликвидации снежно-ледяных образований, качество и технологичность снегоочистки. Работы по борьбе с зимней скользкостью должны обеспечивать транспортно-эксплуатационное состояние дорог, удовлетворяющее требованиям ГОСТ Р 50597-93. Улучшение сцепления колес автомобилей с обледенелым покрытием осуществляется путем посыпки их фрикционными материалами, удалением снежно-ледяных образований с дорожных покрытий, применением антигололедных средств предотвращающих образование снежно-ледяных отложений. В соответствии с этими направлениями разработаны способы борьбы с зимней скользкостью: фрикционный, химический, тепловой и механический. Наиболее широкое распространение получили механические способы разрушения снежно-ледяных образований рабочими органами снегоуборочных машин, так как являются более экономичными, технологически простыми в применении, экологически чистыми и обеспечивают практически полное восстановление первоначального качества дорожного покрытия по сцеплению. Существующие снегоуборочные машины, основными рабочими органами которых являются отвалы и ротационные щетки, успешно используются при уборке рыхлого снега, не способны достаточно эффективно и своевременно разрушать снежно-ледяные образования в силу высокой прочности и конструктивной непригодности рабочего оборудования, поэтому для обеспечения требуемого качества очистки дорожных покрытий в настоящее время используется одновременно три единицы рабочей техники, существующие схемы снегоочистки автомобильных дорог представлены на рис. 1, 2.

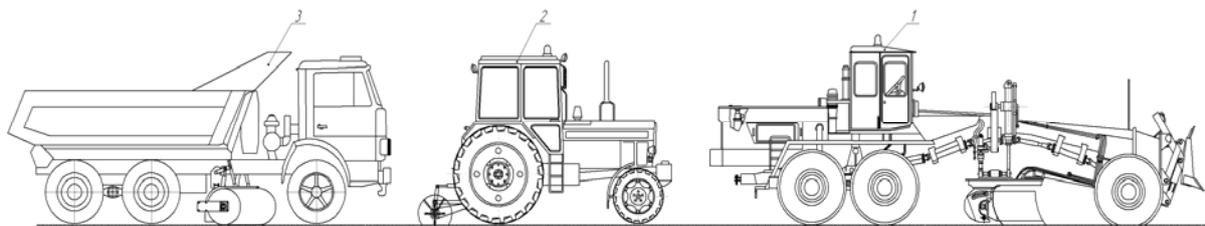


Рис. 1. Схема очистки дорог от снежно-ледяных образований: 1 – автогрейдер; 2 – скалыватель льда УДМ-2000; 3 – машина, оборудованная щеточным рабочим органом

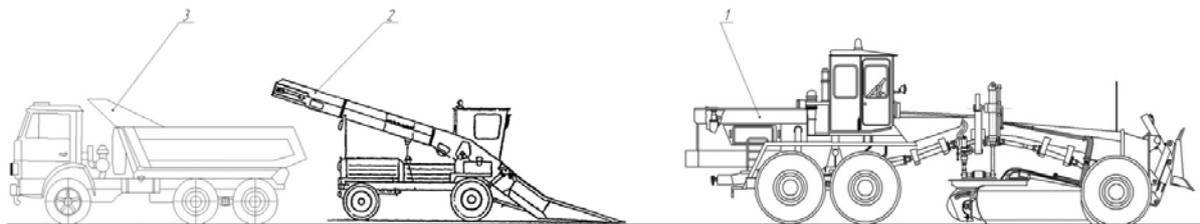


Рис. 2. Схема очистки дорог от снежно-ледяных образований: 1 – автогрейдер; 2 – снегопогрузчик с рабочим органом лапового типа; 3 – грузовой автомобиль

На схеме (рис. 1) первым движется автогрейдер, он разрушает верхний слой снежно-ледяного наката, оставшиеся на дорожном покрытии снежно-ледяные образования после прохождения отвала, разрушает скалыватель льда УДМ-2000, последним движется машина, оборудованная щеточным рабочим органом, который сметает разрушенные снежно-ледяные образования в сторону с проезжей части. На схеме (рис. 2) первым движется автогрейдер, он разрушает снежно-ледяной накат отвалом, образуя на проезжей части снежный вал, после него следует снегопогрузчик с рабочим органом лапового типа, который подбирает разрушенные снежно-ледяные образования и грузит их в кузов транспортного средства. Существующие схемы уборки снежно-ледных образований с дорожных покрытий экономически не выгодны. Разработка и применение комплекта навесного оборудования для удаления снежно-ледяных образований, монтируемого на автогрейдере позволит уменьшить количество используемой техники, повысить производительность и эффективность снегоочистки, снизить расходы на ГСМ, заработную плату, а значит в целом и на содержание дорожных покрытий в зимний период.

Схематичное изображение конструкции предлагаемого рабочего органа оборудованного дисковым инструментом представлено на рис. 3 [2].

Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог, состоит из каркаса 1, с установленными на нем двумя отвалами 3, размещенными друг к другу под углом  $60\text{--}70^\circ$ . Изменение угла установки отвалов на величину меньшую  $60^\circ$  с постоянным шагом установки и количеством дисков 5, повлечет за собой уменьшение ширины захвата. При изменении угла установки отвалов на величину большую  $70^\circ$  при постоянных параметрах отвала, не будет обеспечено взаимное

перекрытие рабочих зон режущих дисков 5, в промежутках между дисками будет оставаться участки не разрушенного массива.

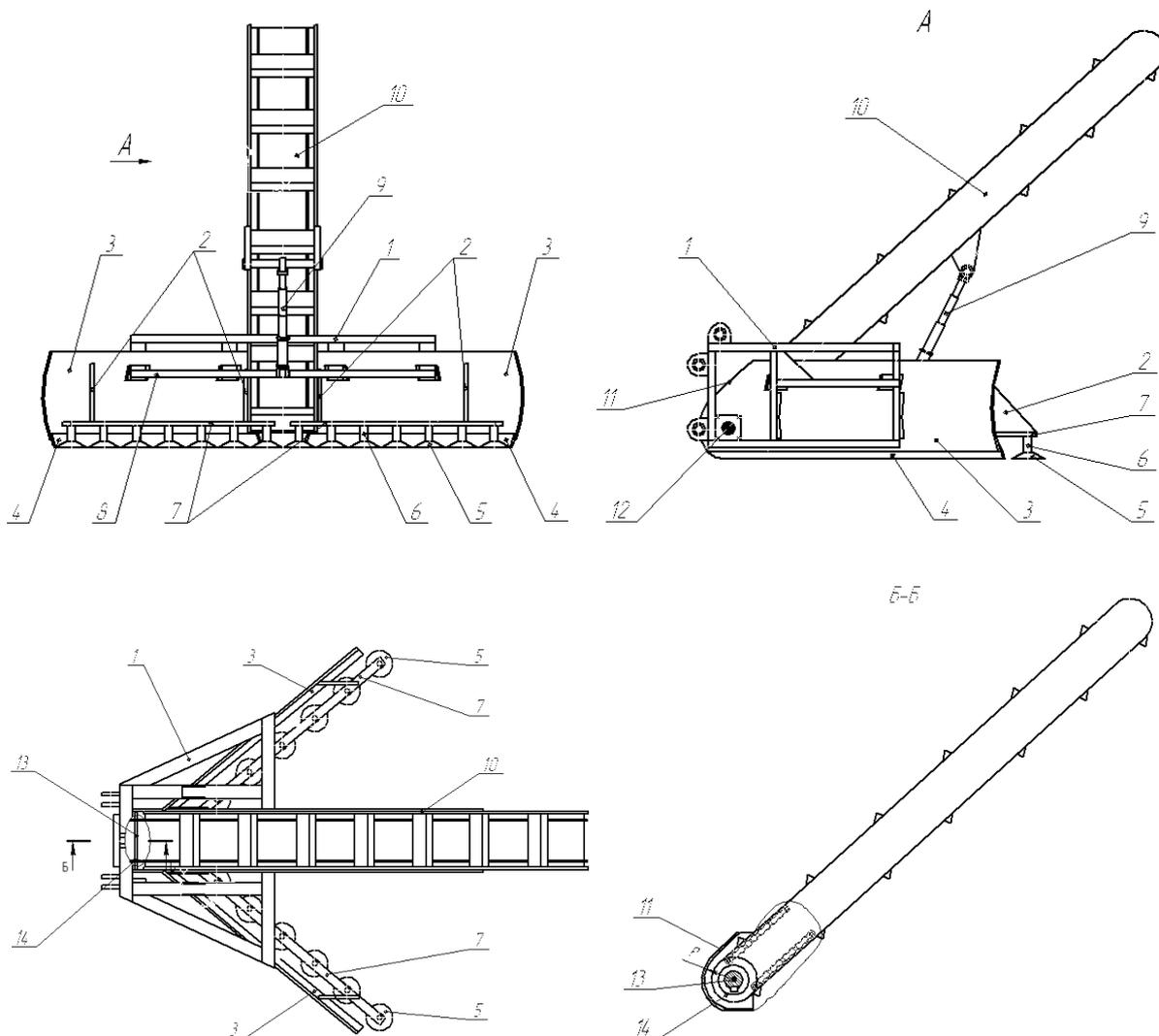


Рис. 3. Дискový рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с дорожных покрытий:

- 1 – каркас; 2 – кронштейн; 3 – отвалы; 4 – ножи; 5 – режущие диски;  
 6 – ось; 7, 8 – пластина; 9 – гидроцилиндр; 10 – ковшовый транспортер; 11 – пластина  
 закругленная по радиусу; 12 – мотор-редуктор; 13 – привод транспортера;  
 14 – звездочка

Кроме того, каждый режущий диск будет взаимодействовать с цельным, закрытым со всех сторон массивом (блокированная схема резания), что значительно увеличит усилие резания и энергоемкость процесса по сравнению с резанием при перекрытии рабочих зон, когда каждый режущий диск (кроме крайних) взаимодействует с массивом, частично разрушенным соседним предыдущим диском (полублокированная схема резания). Отвалы 3 установлены на каркасе 1 и соединены между собой с помощью пластины 8, закрепленной между отвалами 3 на их рабочих

поверхностях. Каждый из отвалов 3 снабжен двумя вертикальными передними кронштейнами 2, с закрепленной на них пластиной 7, с размещенными в нижней части пластины 7 режущими дисками 5 с возможностью перекрытия режущей кромки предыдущего диска, последующим не более чем на половину, каждый из которых установлен на оси 6, с возможностью свободного вращения вокруг нее, с углом наклона нижнего основания диска 5 к поверхности снежно-ледяного наката не более  $10^\circ$ . Установка режущих дисков под таким углом обеспечивает оптимальные усилия резания и энергоемкость процесса в целом, которые будут увеличиваться по мере заглабления диска в разрабатываемый массив. Вдоль нижней кромки отвалов 3 закреплены ножи 4. Между отвалами 3 в нижней части каркаса 1 установлен ковшовый транспортер 10, продольная ось которого совпадает с продольной осью базовой машины. Сходящиеся концы отвалов соединены пластиной 11, выполненной с закруглением по радиусу. Пластина 11 является для транспортера 10 направляющей движения разрушенных снежно-ледяных образований. На пластине 8 одним концом шарнирно установлен гидроцилиндр 9 для подъема и опускания транспортера, а другим концом шарнирно соединен с ковшовым транспортером 10. На каркасе 1 установлен мотор-редуктор 12, соединенный с валом 13 привода транспортера 10, на котором установлены звездочки 14.

Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с дорожных покрытий работает следующим образом. Рабочий орган устанавливается на автогрейдер. Подъем и опускание ковшового транспортера 10 на требуемую высоту для погрузки снежно-ледяных образований в кузов транспортного средства осуществляется с помощью гидроцилиндра 9. При передвижении автогрейдера режущие диски 5, врезаясь под острым углом резания в снежно-ледяной накат, разрушают его, продукты разрушения перемещаются к ножам 4, которые придают направленное движение разрушенному снежно-ледяному накату к продольной оси передвижения базовой машины и сдвигают его к пластине 11, где разрушенный снежно-ледяной накат захватывается ковшовым транспортером 10 и загружается в кузов транспортного средства. Применение рабочего органа оборудованного дисковым инструментом позволит эффективно удалять с дорожного покрытия снежно-ледяной накат толщиной до 10–15 см.

Схематичное изображение предлагаемого цепного ударного устройства представлено на рис. 4 [3]. Устройство состоит из опорной плиты 1 на которой закреплена рама 2, с установленным на ней цепным редуктором 4 с гидроприводом, и горизонтальным приводным валом 5 на котором смонтированы цепные тяги 6 кинематически соединенным с приводным гидромотором 3 через цепной редуктор 4, снаружи приводной вал 5 закрыт предохранительным кожухом 7.

Каждая тяга (рис. 5) состоит из двух частей, одна из которых связана с валом 5 и содержит гибкое звено, в виде цепи 10 свободно размещенной во внутренней полости пружины сжатия 11, цепь 10 гибкого звена каждой тяги одним концом закреплена внутри приводного вала 5 на пальцах 8, установленных внутри приводного вала 5 параллельно его оси, проходящих сквозь крайнее звено цепи 10, установленной одним

концом в упорной втулке 9, установленной на поверхности приводного вала 5. В нижней части гибкого звена тяги установлена втулка 12, внутри которой размещены пальцы 12, 15 и кольцо 13 для соединения гибкого звена тяги с ударной цепью 16 и центрации ударной цепи 16 относительно продольной оси втулки. Длина тяги изменяется прямопропорционально оборотам горизонтального приводного вала, в результате чего расширяется диапазон величины силы удара и углов удара ударником, глубина обрабатываемого слоя в период разрушения снежно-ледяных образований на дорожных покрытиях, без изменения исходной высоты вала относительно уровня обрабатываемой поверхности.

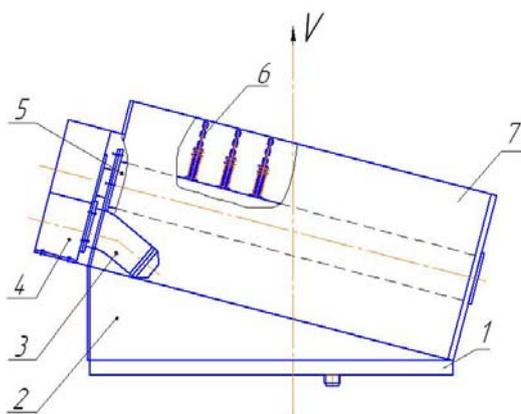


Рис. 4. Ударный рабочий орган для разрушения снежно-ледяных образований на дорожных покрытиях: 1 – опорная плита; 2 – рама; 3 – гидромотор; 4 – цепной редуктор; 5 – горизонтальный приводной вал; 6 – тяга; 7 – кожу

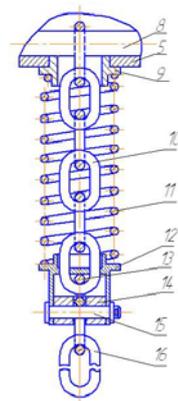


Рис. 5. Тяга: 10 – цепь; 11 – пружина сжатия; 8 – палец; 9, 12 – упорная втулка; 13, 15 – палец; 14 – кольцо; 16 – ударная цепь

Цепное ударное устройство для разрушения снежно-ледяных образований на дорожных покрытиях работает следующим образом. При вращении вала гидромотора 3 крутящий момент передается через цепной редуктор 4 на приводной вал 5. При этом приводной вал 5 вращается с угловой скоростью во встречном направлении. Под действием пружин 11 и центробежных сил цепи 10 ударные цепи 16 занимают радиальное положение и наносят последовательные удары по обледеневшему покрытию, разрушая слой тонкого льда за счет деформации сжатия. Размещение цепей 10 и соединенных с ними ударных цепей 16 по наружной поверхности приводного вала продольными рядами, со смещением относительно предыдущего ряда на полшага, позволяет каждой ударной цепи разрушать лед по всей длине соприкосновения цепи с поверхностью покрытия, а в поперечном направлении за счет скола льда, увеличивать ширину разрушаемой полосы льда. Оставшиеся выступы между линиями скола разрушаются за счет установки оси приводного вала под углом к направлению движения базовой машины и встречного направления вращения приводного вала, увеличивающего путь скольжения цепи после удара. Увеличивая частоту вращения гидромотора 3 и уменьшая поступательную скорость базовой машины, обеспечивается

сплошное разрушение слоя льда. Величина ударной нагрузки выбирается изменением массы ударных цепей 16, а расположение тяг продольными рядами, параллельно оси вала, с определенным шагом установки в каждом ряду, с продольным смещением каждого последующего ряда тяг относительно предыдущего на полшага, обеспечивает блокированное разрушение ударными цепями 16, расположенными в средней части приводного вала 5, остальные ударные цепи, расположенные с правой и левой сторон разрушают лед по полублокированной схеме, что значительно уменьшит усилия разрушения и энергоемкость процесса.

Разработанное оборудование монтируется на автогрейдер (рис. 6), дополнительно устанавливается дорожно-подметальная щетка 1, обеспечивающей удаление в сторону от базовой машины снежно-ледяных образований с дорожного покрытия, разрушенных цепным рабочим органом.

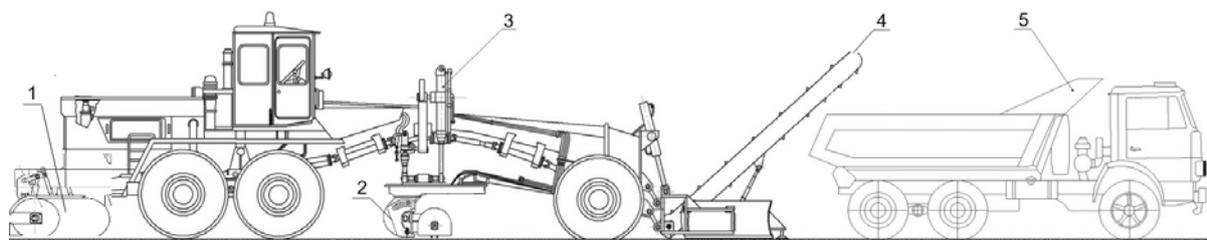


Рис. 6. Предлагаемая схема очистки дорог от снежно-ледяных образований:

1 – щетка, 2 – цепной ударный рабочий орган; 3 – автогрейдер; 4 – передний рабочий орган с дисковым инструментом; 5 – грузовое транспортное средство

Применение комплекта навесного оборудования позволит снизить количество машин, участвующих в технологическом процессе снегоочистки дорожных покрытий, совместить операции по разрушению и удалению снежно-ледяных образований, обеспечить требуемое качество очистки дорожных покрытий, увеличить коэффициент сцепления колес с дорожным покрытием тем самым повысить безопасность дорожного движения, увеличить производительность и эффективность применения базовой техники, снизить экономические расходы на уборку снежно-ледяных образований (на топливо – 62,4 %, на заработную плату обслуживающему персоналу – 63,8 %). Отвал, оборудованный дисковым инструментом снижает энергоемкость процесса удаления снежно-ледяных образований в 2,3 раза по сравнению с обычным отвалом. Новизна конструкторских решений подтверждена патентами на изобретение [2, 3].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бялобжеский Г.В., Дербенева М.М. Борьба с зимней скользкостью на автомобильных дорогах.- М.: Транспорт, 1975.

2. Пат. №111149 Российская Федерация, МПК E01H 5/12 Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов / Р. Б. Желукевич, А. В. Лысянников, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов, Е. К. Фомичев; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011124434/13; заявл. 16.06.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.
3. Пат. № 2463407 Российская Федерация, МПК E01H5/12 / Устройство для разрушения снежно-ледяных образований на дорожных покрытиях / Р. Б. Желукевич, В. А. Ганжа, А. В. Лысянников, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011114706/13; заявл. 14.04.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.

А.С. Цой (аспирант, 1 год обучения)

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Научный руководитель – Снегирёв А.Ю., д.т.н., проф. кафедры «Компьютерные технологии и эксперимент в теплофизике», Физико-механический факультет СПбГПУ

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРОТУШЕНИЯ РАСПЫЛЁННОЙ ВОДОЙ: РАЗРАБОТКА, АПРОБАЦИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ

### Реферат

*Ключевые слова:* численное моделирование, апробация модели, пожаротушение распыленной водой

Цель работы заключается в разработке новой вычислительной технологии моделирования динамики пожаров и пожаротушения в помещениях и в открытой атмосфере с использованием «облачных» высокопроизводительных ресурсов, а также применении этой технологии для обоснования эффективности инновационного алгоритма групповой активации управляемых спринклеров. В основе математической модели лежит система уравнений дозвукового турбулентного потока с учётом реакций горения и теплового излучения. Моделирование турбулентной газочапельной струи огнетушащей жидкости выполняется дискретно-траекторным методом с учётом испарения капель. Учитывается возможность локального погасания пламени и снижение скорости газификации горючих материалов при смачивании. Расчёты выполняются на многопроцессорных кластерах СПбГПУ и в рамках программы облачных вычислений «Университетский кластер». Используется открытое программное обеспечение FDS и OpenFOAM. В ходе работы выполняется апробация математических моделей и программных кодов путём сравнения с данными натурных испытаний, анализируется эффективность параллельных вычислений, как традиционных (локальных), так и облачных.

Результаты работы включают рекомендации по практическому применению моделей пожара и пожаротушения для прогноза эксплуатационных качеств и эффективности систем пожаротушения на основе распылённых испаряющихся жидкостей, демонстрацию эффективности облачных вычислительных технологий для практического применения моделирования на производственных объектах и объектах с большим скоплением людей, прогноз эффективности групповой активации управляемых спринклеров.

## Введение

По данным международной статистики [1], Российская Федерация устойчиво занимает одно из первых мест в мире по количеству погибших на пожарах. Снижение риска гибели людей и уровня материальных потерь требует применения надёжных систем пожаротушения, наиболее эффективными из которых являются системы на основе распылённой воды.

Разработка, апробация и сертификация средств пожаротушения на основе распылённых жидкостей требует выполнения многочисленных натуральных испытаний, в которых должны максимально точно воспроизводиться условия возможного пожара. Выполнение указанного требования может оказаться недостижимым и требует значительных материальных и временных затрат. Программа натуральных испытаний должна быть оптимизирована на основе результатов математического моделирования. В свою очередь, математическое моделирование пожара и пожаротушения является физически и математически сложной, ресурсоёмкой задачей, требующей использования мощных многопроцессорных компьютеров, эффективных технологий параллельных вычислений. К настоящему времени не достигнуто достаточно полное понимание механизмов воздействия струй огнетушащей жидкости на турбулентное пламя и на поверхность горючего материала. Это препятствует созданию и апробации универсальной математической модели пожаротушения распылёнными жидкостями. Интенсивные исследования в данном направлении выполняются в ведущих исследовательских лабораториях и международных компаниях (Sandia Labs, FM Global Research и др.), но задача создания надёжной методики моделирования динамики пожаротушения к настоящему времени не решена. Работа соискателя является важным шагом решения данной задачи.

При реализации численного моделирования пожаротушения в ходе данного проекта были применены технологии облачных вычислений. Облачные вычисления (cloud computing) представляют такую технологию распределённой обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и программное обеспечение предоставляются пользователю как интернет-сервис. Облачные вычисления – динамично развивающаяся технология использования информационной инфраструктуры, преимущества которых могут быть использованы в полной мере лишь в отсутствие лицензионных ограничений, т.е. при использовании открытого (свободного) программного обеспечения. Применение открытого программного обеспечения стало тенденцией численного моделирования в последние годы, однако его надёжное и эффективное использование невозможно без всесторонней оценки достоверности и точности моделей в составе существующих компьютерных кодов. Такая оценка должна включать проверку качества и обоснованности моделей, роль численных эффектов, достаточность пространственного и временного разрешения. Ответ на эти вопросы может быть получен только в ходе сопоставления результатов моделирования с

результатами измерений. Однако апробация моделей на задачах пожаротушения затруднена в связи с ограниченным объёмом доступных экспериментальных данных.

К настоящему времени облачные технологии практически не используются для прикладных инженерных расчётов. Это значит, что остаются неиспользованными значительные потенциальные преимущества облачных технологий: экономическая эффективность (резкое снижение затрат на аппаратное и программное обеспечение, на обслуживание и электроэнергию), высокая скорость обработки данных, отказоустойчивость. Данная работа представляет **первую** попытку применить облачные многопроцессорные вычисления для моделирования пожаротушения.

В настоящее время опубликовано лишь несколько работ, выполненных с помощью математической модели FDS-5, в которых результаты численного моделирования пожаротушения сравниваются с результатами натурных исследований. Однако эти работы либо не учитывают прямого влияния струи жидкости на пламя и исследуют лишь взаимодействие струи воды с припотолочным слоем продуктов сгорания, либо рассматривают лишь интегральные характеристики (полное время) тушения. При этом рассматриваются только процессы в газовой фазе и не учитывается влияние орошения поверхности горючего материала на скорость его газификации. В данной работе **впервые** оценивается способность модели FDS-5 адекватно воспроизводить динамику пожаротушения с учётом как объёмного, так и поверхностного механизмов погасания пламени.

Технологии пожаротушения распылённой водой очень консервативны и почти не менялись после изобретения спринклеров 130 лет назад. Однако в настоящее время ведётся разработка новых интеллектуальных технологий активации спринклеров в составе систем пожаротушения с большим числом спринклеров. Указанная новая технология предложена и практически реализуется в группе компаний «Гефест» (Санкт-Петербург), специализирующейся на разработке и внедрении инновационных технологий противопожарной защиты. Данная технология не имеет действующих аналогов на международном рынке, для выхода на который в настоящее время идёт процесс сертификации. Теоретическое обоснование данной технологии ведётся при участии автора.

В соответствии с изложенным выше, **целью** данной работы является разработка и апробация эффективной методики моделирования пожара и пожаротушения, которая позволит провести многовариантный анализ и дать рекомендации для проектирования и эксплуатации систем пожаротушения на основе распылённой воды, а также выполнить количественный анализ режимов пожаротушения.

Научные результаты проектов, выполненных при участии соискателя, опубликованы в российских и международных изданиях и представлены на конференциях:

1. A.Yu. Snegirev, V.A. Talalov, **A.S. Tsoi**, S.S. Sazhin, C. Crua . Advancements into turbulent spray modelling: the effect of internal temperature gradient in the droplets//

Proceedings of CHT-12 CHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer. July 1-6, 2012, Bath, England.

2. Снегирёв А.Ю., Фролов А.С., Цой А.С. Вихреразрешающие технологии численного моделирования турбулентного диффузионного пламени / Труды 5й Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 25–29 октября 2010). М: Изд-во МЭИ, 2010. Т. 3. С. 316–319.
3. Цой А.С., Снегирёв А.Ю. Режимы и механизмы пожаротушения распылёнными огнетушащими жидкостями: численное моделирование // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», г. Санкт-Петербург, 18-19 апреля 2012 года.
4. Цой А. С., Снегирёв А.Ю. Численное моделирование затопленной турбулентной струи методом крупных вихрей // XXXIX неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно-практической конференции, ч. V. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010 г., С. 117–118.

Данное исследование является продолжением ряда работ, выполняемых в настоящее время при участии автора и выполненных в последние годы в СПбГПУ:

1. Грант (№ 2.2/07-06/018) для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, 2010 (Исполнитель – автор данной работы Цой А.С.).
2. Грант для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, 2012 (Исполнитель – автор данной работы Цой А.С.).
3. Грант Российского фонда фундаментальных исследований и Королевского общества (Великобритания) на выполнение совместного проекта СПбГПУ и Университета Брайтона (Великобритания) «Универсальная модель газокапельной струи для инженерных приложений», 2010-2012(проект 10-08-92604\_КО\_a).
4. НИР «Численное моделирование опасных факторов пожара (горения и распространения дыма) и пожаротушения тонкораспылённой водой». СПбГПУ, 2010-2012 гг. (заказчик ООО "Гефест").
5. НИР «Моделирование и визуализация проектного пожара в помещениях вычислительного центра университета и определение времени блокирования путей эвакуации людей» (Тема 09-12 в рамках ФЦП «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года»). СПбГПУ, 2010 г.
6. НИР «Разработка норм обеспечения объектов сферы науки и образования современными средствами пожаротушения на основе методики численного моделирования подавления пожара распылёнными огнетушащими жидкостями» (Контракт 2011-08-708-47-008 в рамках ФЦП «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года»). СПбГПУ, 2011 г.

Автор данной работы **Цой А.С.** была удостоена стипендии Президента Российской Федерации на 2011/2012 год.

### Методы исследования

Современный подход к математическому моделированию горения и тепломассообмена при пожаре использует средства вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Моделируемые течения турбулентны, неізотермичны, многофазны, нестационарны, имеют сложный химический состав и сопровождаются горением и сложным сопряжённым теплообменом с ограждающими конструкциями. Модели такого типа дают гораздо больше информации, чем зонные модели, до сих пор иногда применяемые в инженерной практике.

В настоящее время в инженерной и научной практике используются три вида программных средств для численного моделирования горения при пожаре. К **первому** виду относятся мощные *универсальные вычислительные гидродинамические пакеты, доступные на коммерческой основе*. Использование таких пакетов позволяет моделировать процесс в условиях сложной, нестандартной геометрии помещений с использованием многопроцессорных кластеров. Универсальность указанных пакетов приводит к большой длительности расчётов. Вместе с высокой стоимостью лицензий это повышает общие затраты на моделирование. Ко **второму**, относительно новому виду программных средств относятся программные *коды открытого доступа*. В свою очередь, эти коды либо узко специализируются на задачах пожарной безопасности (например, FDS), либо разрабатываются как гидродинамические коды общего назначения. К **третьему** виду можно отнести *коды собственной разработки*. Использование кодов открытого доступа и программ собственной разработки позволяет существенно снизить стоимость вычислений и даже выполнять расчёты на персональном компьютере.

В данной работе использована программа FDS 5.5 [11], разработанная в NIST (США). В качестве основного метода моделирования динамики сплошной среды используется метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES). Математической моделью течения является система уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной реагирующей смеси и соответствующих замыкающих соотношений. В её основе лежат осреднённые (отфильтрованные) уравнения сохранения массы, импульса и энергии. К замыкающим соотношениям относятся уравнение состояния газовой смеси, (подсеточные) модели турбулентности и горения. Система решается в существенно дозвуковом приближении. Перенос теплового излучения моделируется методом конечных объёмов. Спектральный состав излучения приближённо описывается с помощью модели узкой полосы (narrow-band model). При моделировании турбулентного горения применяется концепция микроламинарного пламени (Laminar Flamelet Model) с использованием формализма функции плотности вероятности для пассивного скаляра (смесевой доли). Для описания движения распылённой жидкости

используется лангранжев подход. Изменение скорости капель в потоке является результатом действия силы тяжести и силы трения со стороны газовой фазы. Учитывается нагрев-остывание и испарение капель. Истечение струи распылённой воды моделируется с учётом экспериментально наблюдаемых распределений числа частиц по направлениям и скоростям вылета и по размерам. Используется модель погасания фрагментов турбулентного пламени при достижении температуры погасания, либо при достижении нижнего концентрационного предела воспламеняемости смеси [4,5].

Расчёты выполняются с использованием вычислительных ресурсов Информационно-телекоммуникационного комплекса (ИТК СПбГПУ).

Использование облачных сервисов и иных технологий обеспечивается ресурсами вычислительной лаборатории Unihub (<http://unihub.ru/>) в рамках программы «Университетский кластер» [14].

### Апробация математической модели

Для практического применения компьютерного моделирования в инженерной практике необходима оценка достоверности и точности моделей в составе существующих компьютерных кодов. В данной работе такую оценку выполнялась путем сравнения результатов расчётов с экспериментальными данными.

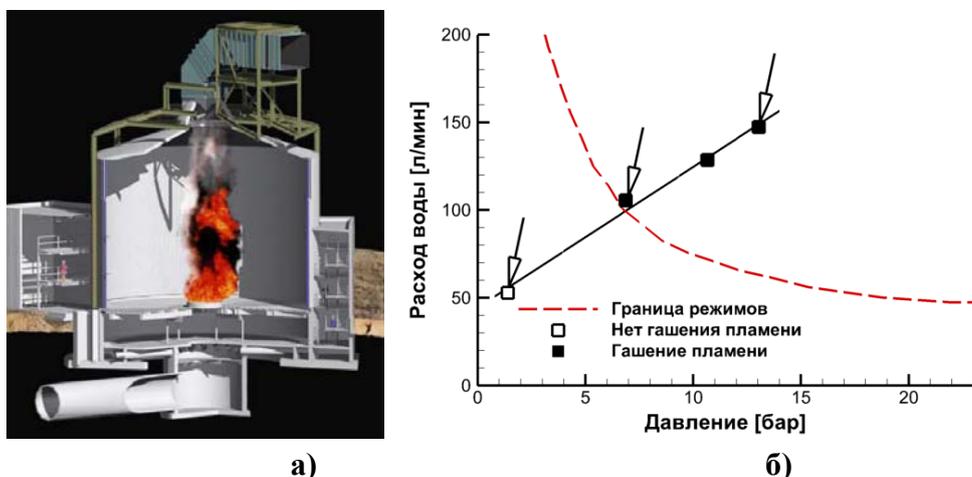


Рис. 1. Натурные испытания горения и пожаротушения распылённой водой: а) – установка FLAME (Sandia Laboratories, США [13]); б) – критические условия подавления пламени и результаты экспериментов (стрелками показаны эксперименты, воспроизводимые в данной работе)

В качестве экспериментального прототипа были использованы результаты крупномасштабных испытаний в установке FLAME (Sandia Laboratories, США (Рис.1), приведённые в [13]. В расчётах анализируется горение жидкого горючего (керосин  $C_{11}H_{21}$ ) над круглым резервуаром диаметром 2 м. Поскольку в [13] нет данных о

скорости выгорания, для целей данной работы мощность тепловыделения (2500 кВт) приближённо оценивали по формуле Хескестада [15] для высоты пламени, изображённого на фотографиях из [13].

В экспериментах [13] использовалось сопло с диаметром отверстия  $D_0 = 8.74$  мм, расположенное на высоте 5 м над уровнем очага. Поток жидкости направлялся либо вертикально вниз к центру очага (при этом сопло располагалось на вертикальной оси факела). Рассматриваемое сопло имеет узкий конус распыла ( $30^\circ$ ). При данной взаимной ориентации очага и сопла ширина конуса на уровне пола примерно соответствует размеру очага.

В экспериментах изменяли избыточное давление воды в распылителе, что приводило к одновременному изменению расхода воды  $Q_l$ , начальной скорости вылетающих капель  $V_0$  и начального распределения капель по размерам. В частности, увеличение давления приводит к уменьшению характерного начального диаметра капель (реализуется такой режим истечения, когда происходит быстрая атомизация жидкости на достаточно малом расстоянии от среза сопла). В данной работе для проверки адекватности модели FDS выполнен расчёт трёх экспериментальных сценариев, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Параметры распыла воды в экспериментах [14]  
(диаметр отверстия  $D_0 = 8.74$  мм).

$\Delta P_0$ , бар	$Q_l$ , л/мин	$V_0$ , м/с	$d_{v50}$ , мм
1.72	53.0	14.7	0.825
6.90	106.0	29.4	0.520
13.1	147.6	41.0	0.417

Расчётная область представляла собой параллелепипед  $8 \times 8 \times 6$  м. Боковые и верхняя границы области полагались проницаемыми для потока. На поверхности очага был задан постоянный расход горючего, соответствующий тепловой мощности 2.5 МВт при полном сгорании горючего. Расчёт выполнен на интервале времени 40 с от начала подачи горючего.

Расчёты производились на неравномерных декартовых сетках с количеством элементов 384 000, 800 000, 1 296 000. Элементы с наименьшими размерами сконцентрированы вблизи оси, где характерный размер ячейки сетки равен 0.06 м, 0.048 м, 0.04 м соответственно.

Результаты расчёта пламени при установившемся горении над очагом приведены на рис. 2, где также показана высота пламени в соответствии с

эмпирической корреляцией Хескестада [15]:  $L_f = 0.235\dot{Q}^{2/5} - 1.02D$  ( $\dot{Q}$  — тепловая мощность пламени в кВт,  $D$  — диаметр очага), получено хорошее согласование. Оценка характерной частоты крупномасштабных пульсаций по эмпирической формуле  $f = 0.5\sqrt{g/D}$  [4] даёт значение 1.1 Гц, что согласуется с результатами моделирования 1.25 Гц. Отметим также, что расчётное распределение осреднённой по времени температуры факела на оси очага согласуется с известными экспериментальными данными для естественно-конвективного горения в открытом пространстве, приведёнными, например, в [10]. Таким образом, можно заключить, что в расчётах адекватно воспроизводятся как осреднённые по времени характеристики пламени, так и его крупномасштабные пульсации.

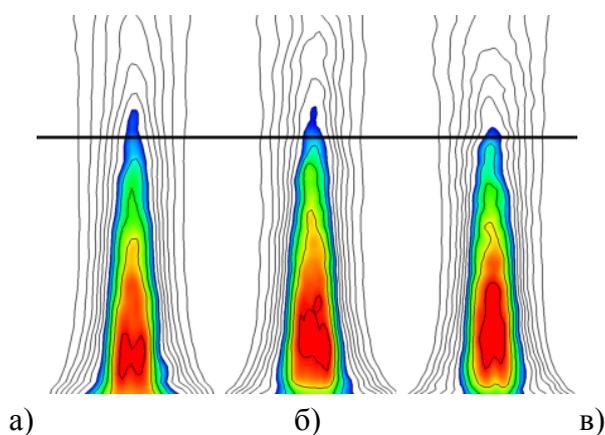


Рис. 2. Осреднённое поле температуры при установившемся горении (диаметр очага 2 м, тепловая мощность 2.5 МВт). Количество элементов расчётной сетки а) – 384 000, б) – 800 000, в) – 1 296 000. Цветом выделена область с температурой  $> 600^\circ\text{C}$ . Прямой показана высота пламени 3.3 м, вычисленная по Хескестаду [15]

Результаты расчётов подавления рассматриваемого пламени струями распылённой воды приведены на рис. 3-5 (показаны изоповерхность мощности тепловыделения  $0.2 \text{ МВт/м}^3$ , концентрация сажи и мгновенное положение некоторых капель) и в табл. 2. Как и наблюдалось в экспериментах (см. рис. 1, б), в одном из рассматриваемых сценариев, соответствующем наименьшему избыточному давлению в распылителе, погасания пламени не наблюдается (рис. 3). Расчёты показали, что струя дестабилизирует пламя, но неспособна преодолеть импульс восходящих продуктов сгорания. При этом внедрение турбулентной газок капельной струи в высокотемпературную зону интенсифицирует смешение реагентов, что увеличивает локальную мощность тепловыделения и может сопровождаться повышенной светимостью пламени.

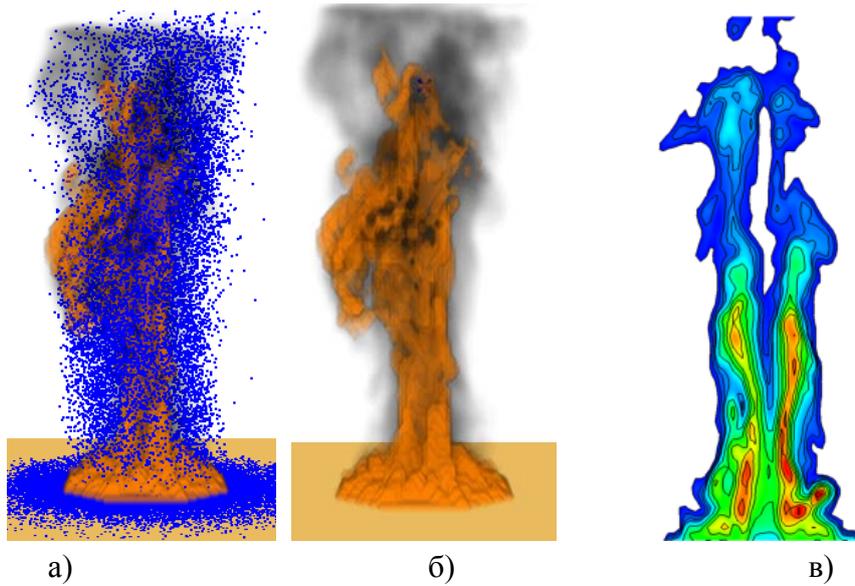


Рис. 3. Воздействие вертикальной струи распылённой воды на пламя. Избыточное давление воды в распылителе 1.72 бар (10 сек после активации спринклера):  
 а) изоповерхность мощности тепловыделения  $0.2 \text{ MW/m}^3$  и расположение частиц,  
 б) изоповерхность мощности тепловыделения 200 кВт и концентрация сажи,  
 в) мгновенное поле температуры в осевой плоскости

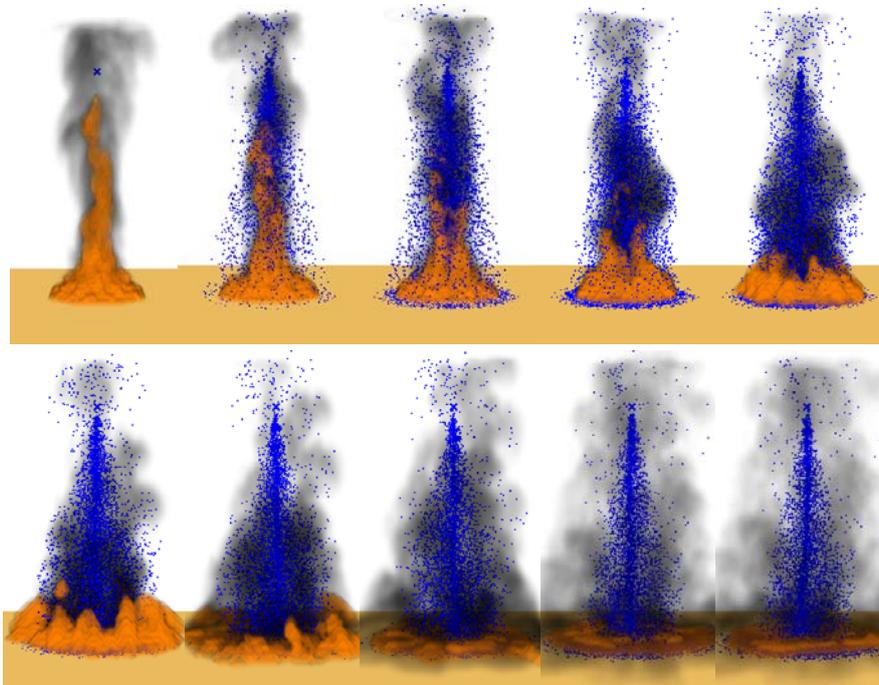


Рис. 4. Воздействие вертикальной струи распылённой воды на пламя. Избыточное давление воды в распылителе 13.1 бар. Временной шаг 0.4 с (Первый кадр соответствует началу подачи воды)

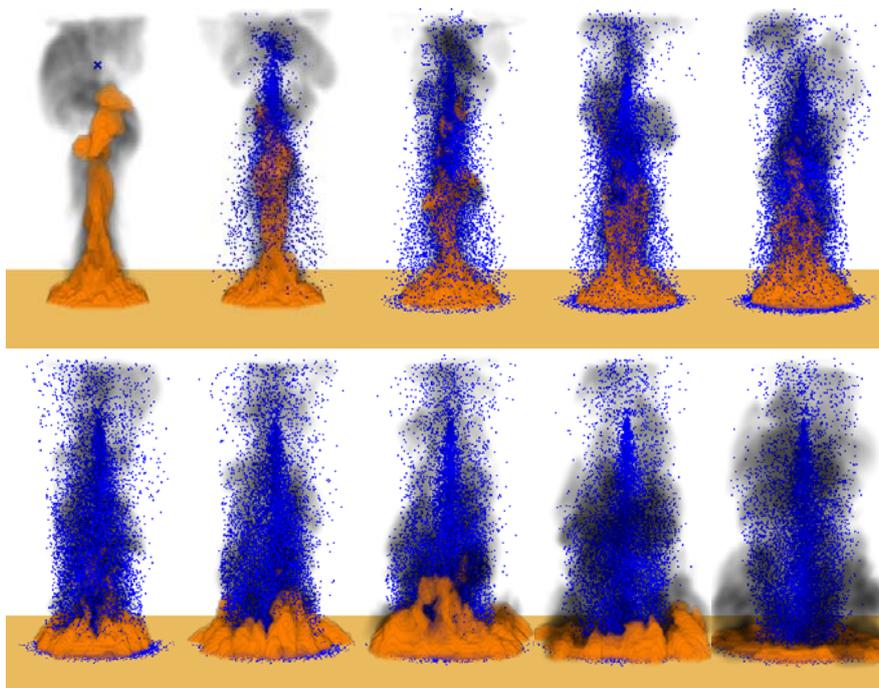


Рис. 5. Воздействие вертикальной струи распылённой воды на пламя.  
 Избыточное давление воды в распылителе 6.89 бар.  
 Временной шаг 0.4 с (первый кадр соответствует началу подачи воды)

Таблица 2. Воздействие вертикальной струи распылённой воды на пламя.  
 Сравнение результатов расчётов и натуральных испытаний

$\Delta P_0$ , бар	Расчёт (Сетка 80x80x60)	Расчёт (Сетка 100x100x80)	Эксперимент
1.72	Нет тушения	Нет тушения	Нет тушения
6.90	$\approx 3.4$	$\approx 3.2$	$3 \pm 0.3$
13.1	$\approx 2.8$	$\approx 2.6$	$2.7 \pm 0.3$

В отличие от сценария, показанного на рис. 3 (струя низкого давления), активация струй высокого давления (6.9 и 13.1 бар) приводит к быстрому подавлению пламени (см. рис. 4 и 5). Струя испаряющейся жидкости внедряется в зону горения, преодолевает импульс восходящих продуктов сгорания и достигает поверхности очага. В данной серии расчётов не учитывали влияние струи на скорость испарения жидкого горючего. Это обусловлено тем, что до достижения фронтом струи поверхности горючего указанное влияние мало, а после этого момента приводит к быстрому погасанию пламени. В связи с этим, момент погасания приблизительно определяли визуально как момент достижения фронтом струи (а не отдельными каплями) поверхности очага, сопровождающийся резким сокращением размеров зоны горения. Сравнение полученных результатов с данными экспериментов приводится в табл. 2, которая показывает, что имеет место не только качественное, но и количественное согласие результатов расчёта и натуральных испытаний [14]. Следует отметить, что

возможно как увеличение, так и снижение интенсивности испарения жидкости при попадании струи распылённой воды на её поверхность. В самом деле, интенсификация испарения возникает при попадании небольшого количества капель воды в жидкое горючее с высокой температурой кипения, в то время как большое количество воды охлаждает испаряющуюся жидкость и препятствует её испарению.

### Оценка масштабируемости компьютерного кода FDS

Полевое моделирование динамики пожара – практически важная, мультфизическая и ресурсоёмкая задача. При использовании недостаточного количества вычислительных ресурсов единичный расчёт может занимать недели. Для внедрения численного моделирования в широкую инженерную практику требуются параллельные вычисления на большом числе процессоров, способные значительно сократить время расчётов. При этом необходима количественная информация об изменении скорости вычислений в зависимости от числа активных ядер в условиях заданной архитектуры кластера. Такой анализ масштабируемости задачи важен для оценки вычислительных возможностей, ограничений по размерам пространственных сеток и для прогноза длительности расчётов.

При оценке масштабируемости компьютерного кода FDS в качестве тестовой была выбрана задача моделирования установившегося естественно-конвективного диффузионного турбулентного пламени в открытом пространстве над круглой пористой горелкой диаметром 30 см. Постановка задачи соответствует условиям эксперимента [5]. Расход горючего (пропан) обеспечивал мощность тепловыделения от 15,8 до 37,9 кВт. [5]. Характерная форма и мгновенное поле температуры в осевой плоскости пламени показаны на рис. 6.

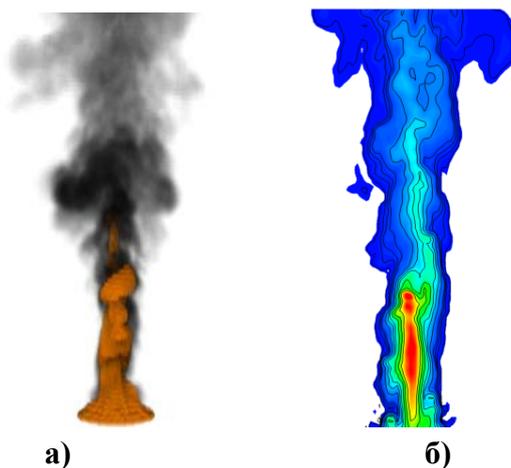


Рис. 6. Расчетные форма пламени (а) и мгновенная температура в осевой плоскости пламени (б). Тепловая мощность пламени 15.8 кВт

Тестирование FDS 5.5 выполнялось на базе технологической платформы UniHUB программы «Университетский кластер». Платформа UniHUB разработана и поддерживается Институтом системного программирования РАН [14].

Для реализации параллельных вычислений данный компьютерный код использует протоколы MPI, при этом пространственная сетка разбивается на блоки, количество которых соответствует числу задействованных ядер. Декомпозиция в FDS осуществлялась вручную таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение ячеек сетки по ядрам кластера.

При тестировании FDS рассматривался временной интервал 1 с, что соответствовало 80 шагам по времени. В качестве характеристик эффективности параллельных вычислений использованы два параметра: ускорение (продолжительность вычислений на одном ядре, отнесённая к продолжительности вычислений на нескольких ядрах) и эффективность (ускорение, отнесённое к числу используемых ядер). При тестировании использованы ресурсы 8 процессоров одного вычислительного узла.

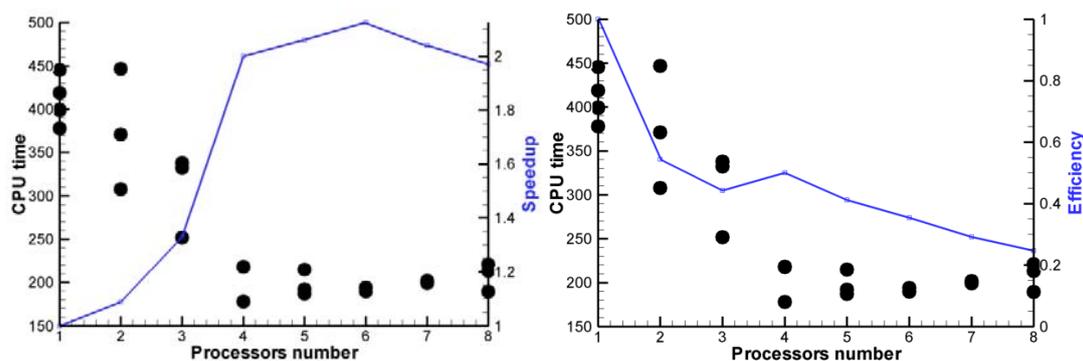


Рис. 7. Ускорение расчётов (слева) и эффективность использования процессоров (справа) при вычислении в параллельном режиме на 1 узле

Времена, затраченные на расчет, ускорение расчета и эффективность использования одного процессора приведены на рис. 7. Видно, что для расчётной сетки с числом ячеек 1,28 миллионов максимальное ускорение на одном узле составляет 2,5–2,6, а для числа ядер более четырёх значительного роста ускорения не наблюдается.

### Обоснование эффективности инновационного алгоритма активации системы пожаротушения

Используя апробированную методику численного моделирования, можно решать практически важные задачи увеличения эффективности систем пожаротушения на основе распылённой воды. Ниже представлен пример использования математической модели FDS для доказательства эффективности нового алгоритма системы пожаротушения.

Существуют опытные данные, подтверждающие, что для высоких помещений применение традиционных спринклеров в некоторых случаях оказывается неэффективным. Чтобы повысить степень безопасности объекта, можно использовать управляемую систему пожаротушения. Управляемый алгоритм активации спринклеров, предложенный группой компаний ОАО «Гефест» [17], подразумевает, что при срабатывании одного спринклера подаётся сигнал управляющей системе, которая после некоторой задержки автоматически активирует динамическую группу из соседних восьми спринклеров. Подобный алгоритм активации оросительной системы позволяет подавить пламя на начальном этапе пожара и не допустить его распространения.

Для демонстрации оправданности использования управляемой системы пожаротушения на основе распылённой воды в условиях реального пожара проведён следующий расчёт. Расчётная область представляет собой пространство 20 x 20 x 5 м, ограниченное только полом и потолком с постоянной температурой. Горючие материалы сосредоточены в центре области на квадратной поверхности размером 6x6, т.е. полная площадь очага составляет 36 м<sup>2</sup>. Предполагается крайне неблагоприятный сценарий развития пожара, когда масса горючего материала в очаге настолько велика, что расходование материала при горении не успевает сказаться за время развития пожара. В рамках данной модели интенсивность газификации горючего материала пропорциональна площади поверхности, охваченной пламенем. Зажигание происходит в центре горючей поверхности, после этого пламя распространяется радиально с линейной скоростью 0.01 м/с, при этом максимальная мощность очага, развивающегося в таких условиях составила 300 кВт/м<sup>2</sup>.

Над очагом на уровне потолка расположено 9 одинаковых оросителей. Взаимное расположение оросителей и очага приведено на рис. 8. Расход воды через каждый ороситель принимали 28.9 л/мин, начальную скорость вылета капель – 15 м/с. Спрей, образующийся в результате активации оросителя, имеет полидисперсный состав, средний объёмный медианный диаметром капель составляет 500 мкм.

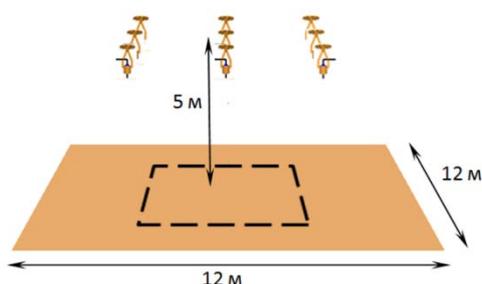


Рис. 8. Взаимное расположение очага пожара и спринклеров

Традиционная или термическая активация спринклера происходит при разрушении стеклянной колбы, препятствующей потоку воды. Тепловая инерционность активации может быть охарактеризована двумя параметрами – индексом RTI и

температурой активации. В данном расчёте использованы значения  $RTI = 148 \text{ (м·с)}^{1/2}$ , температура активации  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для моделирования альтернативного алгоритма активации спринклеров постулируется следующее. Первый спринклер, расположенный на оси пламени активируется по термическому механизму (рис. 9). После этого с задержкой в 10 с активируются остальные 8 спринклеров. Расход воды через спринклер, дисперсность распыла частиц, конфигурация распыла и другие параметры сопел-распылителей берутся одинаковыми в обоих расчётах.

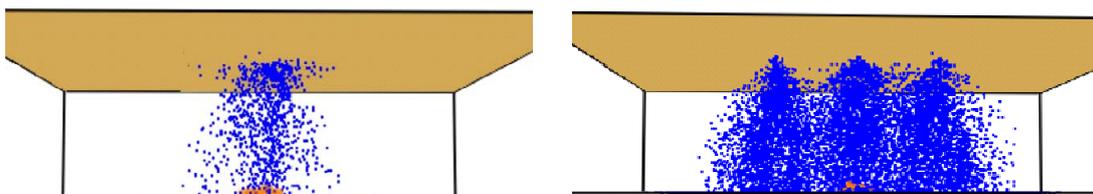


Рис. 9. Активированные спринклеры через 87 секунд после начала экспозиции. Слева – термическая активация, справа – управляемая активация системы пожаротушения

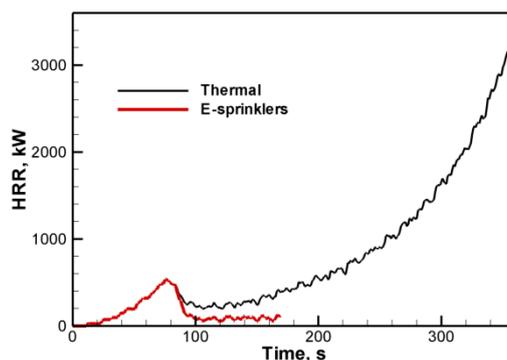


Рис. 10. Снижение тепловыделения при подавлении пламени тонкораспылённой водой. Чёрная кривая соответствует термическому алгоритму активации спринклеров, красная кривая соответствует контролируемой активации спринклеров

На рис. 10 представлены результаты расчёта для объёмного тепловыделения в помещении с помощью FDS. Видно, что в то время как система пожаротушения с управляемой активацией способствует резкому снижению тепловыделения, традиционная система не способна справиться с ростом мощности. Продолжительный рост мощности тепловыделения на практике означает значительное увеличение ущерба, нанесённого пожаром. Таким образом, можно заключить, что система пожаротушения с управляемым алгоритмом активации способна подавить пожар на ранней стадии и не допустить его дальнейшего распространения.

## Заключение

В ходе работы автором были получены следующие результаты:

1. Разработана методика численного моделирования взаимодействия турбулентной газочапельной струи с пламенем и продуктами сгорания при пожаротушении с помощью компьютерного кода FDS и «облачных» высокопроизводительных ресурсов программы «Университетский кластер».

2. Для апробации компьютерного кода и математической модели FDS выполнены расчеты подавления крупномасштабного пламени над поверхностью жидкого горючего и произведено сравнение с соответствующим экспериментом. Показана способность моделей и компьютерного кода адекватно воспроизводить полное время и динамику подавления пламени над поверхностью жидкого горючего.

3. Выполнена оценка эффективности параллельных вычислений с помощью «облачных» технологий для задачи естественно-конвективного пламени над горелкой. Максимальное ускорение на одном узле составляет 2,5 – 2,6, а для числа ядер более четырех значительного роста ускорения не наблюдается.

4. Произведен расчёт сценариев нарастания и подавления пожара с помощью традиционного (теплого) метода и нового алгоритма управляемой активации систем пожаротушения. Показаны преимущества использования систем пожаротушения с управляемой активацией.

5. Результаты данной работы, опубликованы в российских и международных изданиях и представлены на конференциях:

- International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer . July 1-6, 2012, Bath, England [10]
- VII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», г. Санкт-Петербург, 18-19 апреля 2012 года [8].
- Международная научно-практическая конференция «XL неделя науки СПбГПУ», 2011 г [9].

В настоящее время результаты работы используются:

1. В группе компаний «Гефест» (Санкт-Петербург), специализирующейся на разработке и внедрении инновационных технологий противопожарной защиты, — для теоретического обоснования новой управляемой технологии пожаротушения.

2. В СПбГПУ при выполнении государственного контракта на НИР в 2010 г. по заказу Министерства образования и науки РФ по теме 09.12 в рамках Федеральной целевой программы «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 г.» — в качестве методики прогнозирования времени блокирования путей эвакуации при пожаре.

Кроме того, результаты данной работы могут быть использованы:

- Для разработки, апробации и сертификации современных совершенных средств пожаротушения на основе распыленной и тонкораспыленной воды.

- Для разработки рекомендаций по использованию существующих, прошедших сертификацию систем пожаротушения в нестандартных помещениях сложной геометрии и повышенной пожарной опасности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Брушлинский Н.Н., Халл Дж. Р., Соколов С.В., Вагнер П.. Мировая пожарная статистика. Отчёт №17. Международная ассоциация пожарно-спасательных служб, 2012 г. ([www.ctif.org](http://www.ctif.org))
2. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учеб. Пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000, 118с.
3. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2009, 143 С.
4. Снегирев А.Ю., Талалов В.А. Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности. Горение неперемешанных реагентов: Учеб. Пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008, 212 С.
5. Снегирев А.Ю., Талалов В.А. Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности. Горение перемешанных реагентов: Учеб. Пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007, 215 С.
6. Снегирёв А.Ю., Фролов А.С., Цой А.С. Вихреразрешающие технологии численного моделирования турбулентного диффузионного пламени / Труды 5й Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 25–29 октября 2010). М: Изд-во МЭИ, 2010. Т. 3. С. 316–319
7. Цой А.С., Снегирёв А.Ю. Режимы и механизмы пожаротушения распылёнными огнетушащими жидкостями: численное моделирование // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», г. Санкт-Петербург, 18-19 апреля 2012 года.
8. Цой А. С., Снегирёв А.Ю. Численное моделирование пожаротушения распылённой водой. // XL неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно-практической конференции, ч. V. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011 г., С. 127–128.
9. A.Yu. Snegirev, V.A. Talalov, A.S. Tsoi, S.S. Sazhin, C. Crua . Advancements into turbulent spray modelling: the effect of internal temperature gradient in the droplets// Proceedings of CHT-12 CHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer . July 1-6, 2012, Bath, England.
10. Gengembre E., Cambray P., Karmed D., Bellet J.C. Turbulent Diffusion Flames with Large Buoyancy Effects // Combustion Science and Technology. - 1984. - Vol. 41. – P. 55-67.
11. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermott R. Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5, 2008.
12. Snegirev A.Yu. Statistical Modeling of Thermal Radiation Transfer in Buoyant Turbulent Diffusion Flames // Combustion and Flame. – 2004. – Vol. 136, No 1-2. – P. 51-71.
13. Blanchat T.K., Nichols R.T., Figueroa V.G. Benchmark Enclosure Fire Suppression. Experiments – Phase 1 Test Report. Sandia Report SAND 2007-3220, – 2007. – P. 59.
14. Unihub.ru, проект ИСП РАН. Технологическая платформа программы «Университетский кластер». [Электронный ресурс] – URL: <https://unihub.ru/>
15. Heskestad G. Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment / SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA: NFPA, - 2002.- PP. 2-1–2-17.

16. Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of Electronically Controlled Sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels / Proc. of the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, NY, USA, March 14-16. – 2012. – Vol. 1, pp. 87-92.

Л.Б. Матюшкин (аспирант)

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
Научный руководитель – В.А. Мошников, д.ф.-м.н., профессор

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ НА ОСНОВЕ УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ И КРЕМНИЕВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

### Реферат

*Ключевые слова:* солнечная энергетика, квантовые точки, сульфид свинца

Цель работы – получение систем с квантовыми точками на основе узкозонных полупроводниковых материалов (сульфида свинца) и исследование их оптических свойств для применения в солнечной и кремниевой энергетике.

Использованные экспериментальные методы: метод атомно-силовой микроскопии, метод растровой электронной микроскопии, методы оптической микроскопии, метод люминесцентной спектроскопии, компьютерное моделирование.

Сформированы квантовые точки на основе сульфида свинца, созданы структуры с квантовыми точками на различных типах подложек, проведено исследование структурных и оптических свойств полученных систем. Проведена оценка возможности применения коллоидных квантовых точек в солнечной энергетике.

Работа включает:

- описание технологии получения коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца методами органического синтеза и растворной химии;
- экспериментальные данные по исследованию топологии образцов подложек различных материалов методами атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии;
- экспериментальные данные по исследованию оптических свойств образцов коллоидных квантовых точек, нанесенных на подложки различными методами;
- экспериментальные данные по фотолюминесценции образцов коллоидных квантовых точек на подложках пористых материалов различной морфологии.

### ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост энергопотребления – одна из характерных особенностей технической деятельности человечества во второй половине XX и в начале XXI веков. В начале XXI в. мировая экономика столкнулась с необходимостью резкого изменения структуры источников потребляемой энергии, что обусловлено рядом причин: рост населения Земли к 2050 г. до 10-11 млрд. человек; рост мировой экономики в целом, в

том числе заметный экономический рост развивающихся стран; невозможность удовлетворить возрастающие потребности человечества в энергии только за счет традиционных ископаемых источников энергии; экологическое и тепловое загрязнение Земли, изменение климата; обеспечение безопасности снабжения энергетическими источниками.

Все это привело к тому, что в последнее время значительное внимание уделяется развитию нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Из всех видов возобновляемых источников энергии наиболее привлекательной представляется энергия Солнца, особенно непосредственное ее преобразование в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических преобразователей энергии. К достоинствам солнечной энергетики можно отнести следующее: неисчерпаемый источник энергии – Солнце; высокая экологичность при использовании; простота и гибкость реализации, модульная структура; широкий диапазон вырабатываемых мощностей; надежность; простое техническое обслуживание; небольшая масса; бесшумность и безопасность.

Несмотря на значительные темпы роста солнечной энергетики, объем вырабатываемой в настоящее время фотовольтаикой электроэнергии мал по сравнению с другими источниками возобновляемой энергии. Основным барьером, препятствующим широкому внедрению солнечных элементов, является высокая стоимость фотовольтаической энергии.

Цена на электроэнергию, вырабатываемую фотовольтаикой, составляет 0,25-0,65 евро/кВтчас, а на вырабатываемую традиционными источниками энергии составляет в настоящее время 0,02-0,035 евро/кВтчас и по прогнозам к 2020 году возрастет до 0,05-0,06 евро/кВтчас [1].

Таким образом, для того, чтобы фотовольтаика могла конкурировать с ископаемыми источниками энергии, цена на электроэнергию, производимую солнечными элементами, должна быть снижена примерно в 5-10 раз. Для этого необходимо разработать значительно более эффективные технологии и преобразователи и сделать это необходимо в очень сжатые сроки. В настоящее время до 93% всех выпускаемых солнечных элементов изготавливаются на основе кристаллического кремния (1/3 на основе монокристаллического и 2/3 на основе поликристаллического). Однако в последнее время наблюдается некоторое замедление роста КПД солнечных элементов на основе кристаллического Si. Объяснить это можно тем, что технология уже подошла к теоретическому пределу. Рекордное значение КПД для однопереходного кремниевого солнечного элемента составляет 85% от теоретически возможного. Для того чтобы преодолеть эту тенденцию нужны новые прорывные технологии.

Одним из направлений повышения КПД солнечных батарей является использование коллоидных квантовых точек (ККТ) непосредственно в конструкциях фотоэлектрических преобразователей [2], что может привести к существенному расширению суммарной запрещенной зоны фотоэлектрического преобразователя и соответственно к расширению спектральной области эффективного фотоэлектрического

преобразования. Кроме этого, ККТ, как и органические люминофоры, могут применяться для создания вспомогательных конструкций с целью увеличения их КПД и выхода мощности. Люминесцентные концентраторы могут быть заменены слоями, содержащими квантовые точки, в которых положение края поглощения будет определяться квантоворазмерными эффектами [3].

Длина волны поглощения квантовой точки зависит от эффективной ширины запрещенной зоны, то есть от размера нанокристалла [4]. При уменьшении размера квантовой точки до величины, меньшей значения радиуса экситона, ширина энергетического зазора начинает изменяться, и например, для PbS возрастает от 0,4 эВ (значение для объемного образца) до 1,3 эВ (при диаметре квантовой точки менее 5 нм). В зависимости от размера нанокристаллов фотолюминесценция квантовых точек PbSe может изменяться в диапазоне 800-2000 нм, PbS – в диапазоне 800-1500 нм [5].

Проблема заключается в нахождении зависимости термодинамических и кинетических условий получения коллоидных квантовых точек с заданным размером и унимодальным распределением по размеру, что позволит воспроизводимо получать их оптические характеристики в заданном спектральном диапазоне. Полупроводниковые нанокристаллы могут быть синтезированы из коллоидных растворов, образованных растворением исходных соединений, содержащих необходимый полупроводник, в соответствующем растворителе. В растворе происходит образование нанокристаллов, при этом лиганды присоединяются к их поверхности, замедляя и контролируя рост. Далее нанокристаллы могут быть покрыты оболочкой из широкозонного полупроводника, которая предотвращает окисление и замыкает оборванные связи на поверхности [6-9]. В дальнейшем синтезированный материал может использоваться для получения слоев на основе изолирующих или проводящих полимерных матриц [10, 11], заполненных нанокристаллами, с применением таких простых и дешевых методов, как центрифугирование, диспергирование или окунание в раствор.

Задачей работы является развитие методики формирования коллоидных квантовых точек сульфида свинца методами коллоидной химии и исследование оптических свойств коллоидных квантовых точек и структур на их основе для целей солнечной энергетики.

## **1. ФОРМИРОВАНИЕ РАСТВОРОВ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**

Известно, что уменьшение линейных размеров полупроводникового кристалла до десятков нм приводит к изменению практически всех его свойств: параметров кристаллической решетки, температуры плавления, теплоемкости, электропроводности и т.д. Кроме этого, возникают новые оптические, магнитные и электронные эффекты, изменяются каталитические и реакционные свойства. Эти изменения и эффекты проявляются тем сильнее, чем меньше размеры наночастиц.

Коллоидные квантовые точки представляют собой неорганические частицы нанометрового размера, выращенные в растворе и покрытые тонким слоем молекул

поверхностно активного вещества. Неорганическое ядро обладает полезными свойствами, определяемыми его составом, размером и формой, в то время как покрывающий слой органических молекул стабилизирует эти свойства и препятствует агрегации частиц.

В настоящее время коллоидные нанокристаллы с высоким квантовым выходом флуоресценции и малым разбросом по размерам получают в процессе органического синтеза в среде инертного газа. Добавляемые в реакционную систему стабилизирующие вещества образуют на поверхности зародышей кристаллов органическую оболочку, уменьшающую скорость их роста. Такая оболочка обеспечивает образование коллоидного раствора квантовых точек в неполярных и слабополярных органических растворителях [12].

Существенным преимуществом в использовании коллоидных квантовых точек для солнечных элементов по сравнению с квантовыми точками, получаемыми методами молекулярно-лучевой эпитаксии, является свобода в выборе подложки. Частицы могут наноситься из органических и водных растворов на жесткие и гибкие, гладкие и ровные, изогнутые и плоские подложки. Материал основы может быть и неорганическим, и органическим (включая биологические материалы), кристаллическим и аморфным, проводником, полупроводником или изолятором. Коллоидные квантовые точки могут быть нанесены в виде пленки или смешаны с проводящими полимерами.

Типичная система синтеза коллоидных нанокристаллов содержит три составляющие: прекурсоры, стабилизатор и растворитель. Общие требования к прекурсорам состоят в том, что они должны быстро разлагаться или взаимодействовать с отдельными компонентами реакции при требуемой температуре роста, доставляя в зону реакции необходимые ионы. На стадии зародышеобразования прекурсоры разлагаются или взаимодействуют с образованием пересыщенного раствора мономеров, после чего начинается взрывообразный рост числа ядер нанокристаллов. Далее эти ядра растут, захватывая дополнительные момеры. Частицы, достигшие критического размера, начинают расти за счет растворения более мелких частиц (созревание Оствальда). В каждый момент времени имеется некоторый критический размер, выше которого частицы растут, а ниже – растворяются. Данный процесс является исключительно диффузионным, поэтому основным параметром регулирования является температура роста [13].

Отдельного внимания заслуживает вопрос стабилизации – необходимо достичь не только заданной дисперсности, но и стабилизировать коллоидную систему. Стабилизатор обычно имеет высокомолекулярную природу. Динамически адсорбируясь на границе раздела фаз, он создает барьер, препятствующий агрегации частиц. Удачный выбор стабилизатора имеет решающее значение в коллоидном синтезе квантовых точек. Поэтому к стабилизатору предъявляются очень высокие требования: во-первых, он должен предотвращать агрегацию частиц дисперсной фазы; во-вторых, не препятствовать диффузионному росту квантовых точек; в-третьих,

ориентируясь на поверхности коллоидной частицы, молекулы стабилизатора должны быть крепко связаны с ней ковалентной связью, в то время как свободный конец молекулы должен иметь сильное сродство к растворителю, то есть к дисперсионной среде, обеспечивая «растворимость» квантовых точек; в-четвертых, молекулы стабилизатора должны пассивировать поверхность квантовой точки, локализуя внутри нее носители заряда [13].

Стабилизатором в методике синтеза коллоидных квантовых точек в водных растворах выступали длинноцепочечные молекулы поливинилового спирта. В качестве источника ионов выступала соль ацетата свинца, в качестве ионов серы – сероводород.

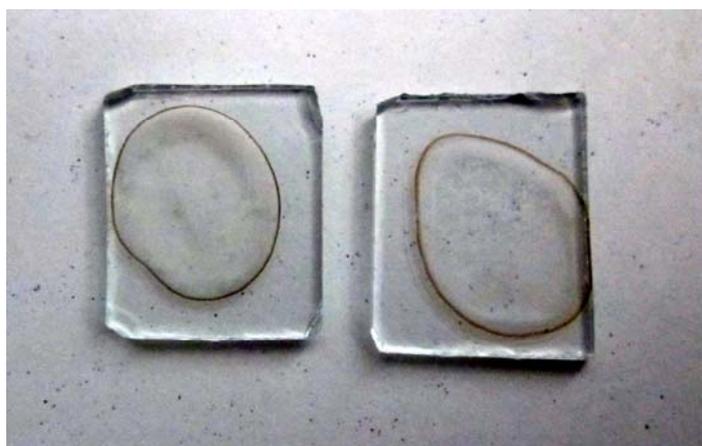
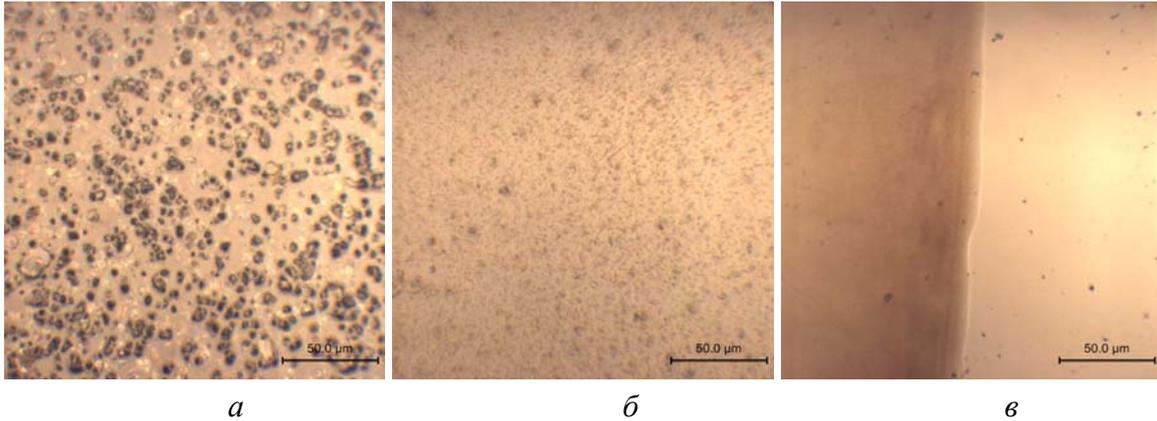


Рис. 1. Примеры высохших капель коллоидного раствора квантовых точек с перераспределением частиц на краю капли. В качестве подложки выступает оптически прозрачное кварцевое стекло

Водный раствор сероводорода прикапывался к раствору ацетата свинца  $Pb(CH_3COO)_2$  в однопроцентном растворе поливинилового спирта, выступающего в качестве стабилизатора частиц. В ходе происходящей химической реакции и последующего высыхания капли частицы сульфида свинца перераспределяясь внутри реакционного объема (рис. 1). Так были получены образцы, представляющие собой высохшие капли, прозрачные в центре и темные на краю.

При изучении образцов при помощи оптического микроскопа было обнаружено, что размеры частиц уменьшаются от центра к краю капли (рис. 2). Это распределение частиц по размерам было тщательно изучено средствами оптической микроскопии.

По изображениям на экране случайным образом выбирались изображения десяти частиц, программными средствами измерялся их размер. Операция повторялась от предположительного центра до края через каждые 0,5 мм. Точки на рис. 3 отражают среднее значение размера частиц на определенном расстоянии от центра, бары – минимальное и максимальное обнаруженные значения. Как видно из рисунка, все эти значения также уменьшаются при рассмотрении направления от центра к краю капли.



*a*

*б*

*в*

Рис. 2. Изображения оптического микроскопа: *a*) в центре образца, *б*) между центром и краем образца, *в*) темного ободка высохшей капли. Сравнительная линия соответствует 50 мкм

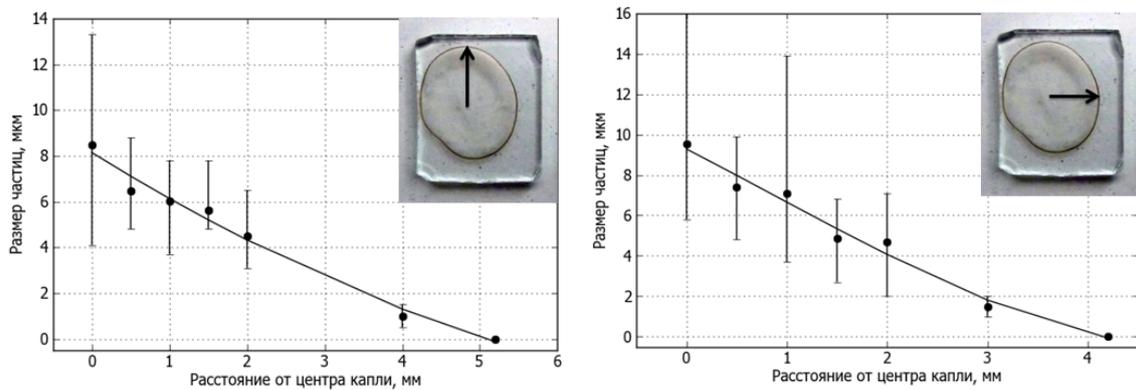


Рис. 3. Распределение размеров частиц в продольном и поперечном направлениях. На вставках приведена фотография образца, стрелками указаны направления измерения размеров частиц

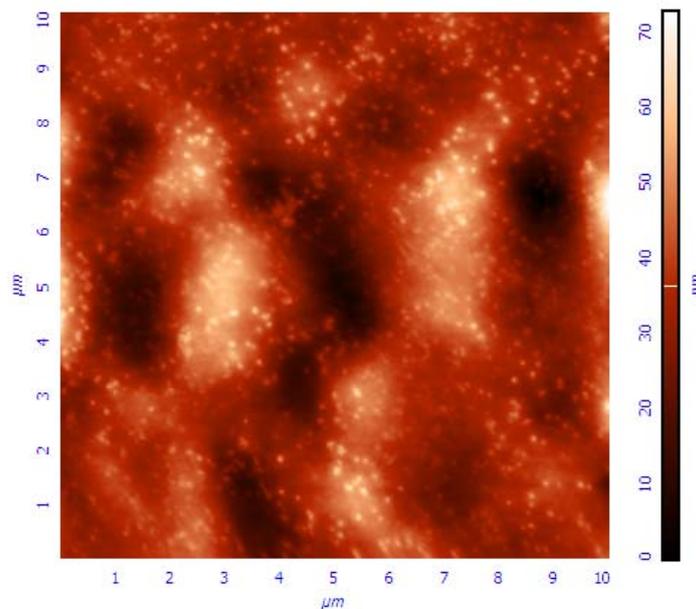


Рис. 4. АСМ-изображение области края образца

Радиальная протяженность области темного ободка равна 150 мкм. Перепад высот на краю капли, определенный методом расфокусировки оптического микроскопа, составляет единицы микрометров. На АСМ-изображении, сделанном в области темного ободка (рис. 4), наблюдается наличие множества близких по размеру частиц, судя по всему, представляющих небольшие агломераты частиц. Все эти данные указывают на возможность существования в данной области большого количества квантовых точек сульфида свинца, значительно большего, чем в центральной области образца.

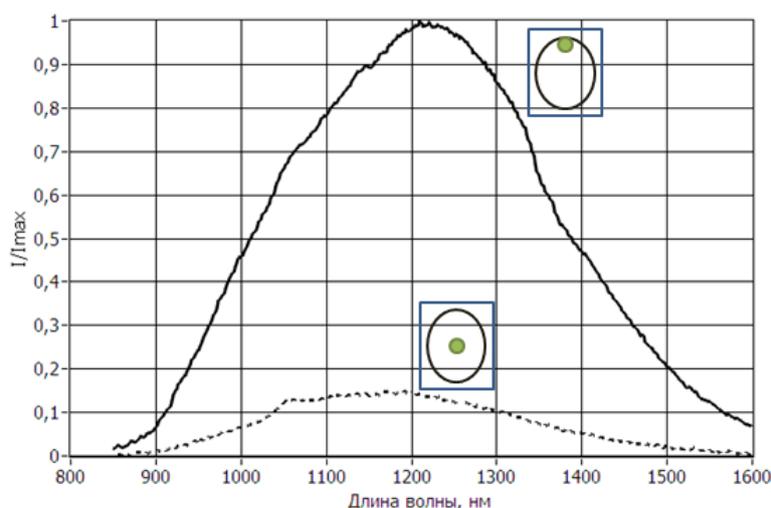


Рис. 5. Сравнение спектров фотолюминесценции для различных областей образца – центра и края высохшей капли. Схематически изображено положение пятна лазера относительно образца

В соответствии с высказанными предположениями был проведен эксперимент по сравнению спектров фотолюминесценции при различном положении пятна лазера относительно образца – в центре и на краю высохшей капли (рис. 5). Интенсивность сигнала на краю капли оказалась в 8 раз выше, чем в центре образца. Положение длины волны и полуширина максимума сигнала при этом сохранились теми же. Этот факт показывает, что частицы во всей капле имеют одинаковый разброс по размерам и присутствуют во всем образце, в том числе и в его центре, но наиболее благоприятные условия их нуклеации были созданы на краю капли, в области тонкого краевого слоя.

Интенсивность синтезированных образцов близка к значениям интенсивности образцов сравнения (коллоидных квантовых точек сульфида свинца из Университета Торонто, Канада), взятых в тех же количествах, но обладает в 3-4 раза бóльшим значением параметра полуширины.

Получение коллоидных квантовых точек в безводных органических растворах проводилось следующим образом. Тригидрат ацетата свинца  $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$  смешивался с олеиновой кислотой, смесь энергично перемешивалась и нагревалась до  $70\text{ }^\circ\text{C}$  в течение трех часов. Длительный нагрев требуется для удаления остатков воды и

уксусной кислоты из тригидрата ацетата свинца и получения олеата свинца. Олеиновая кислота в данном случае выступала одновременно и как растворитель, и как стабилизатор частиц. Сероводород растворялся в неполярном растворителе уайт-спирите.

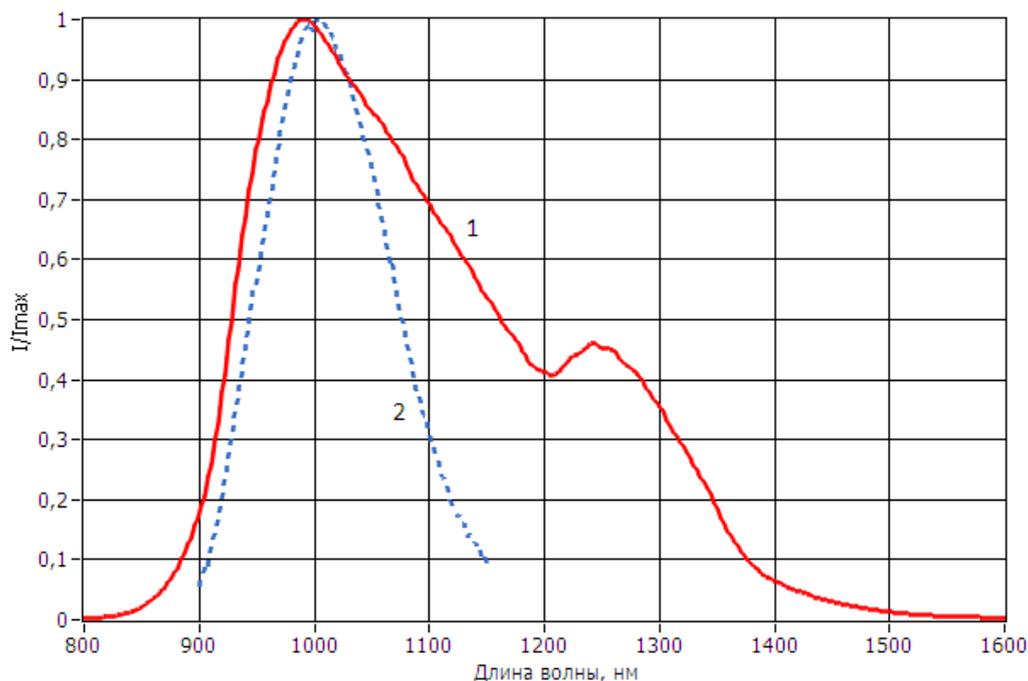


Рис. 6. Сравнение спектра фотолюминесценции раствора квантовых точек в органическом растворе 1 и спектра эталонных квантовых точек близкой длины волны 2

Далее раствор сероводорода впрыскивался в нагретый раствор олеата свинца. Во время инъекции цвет смешанного раствора мгновенно изменялся от масляно-желтого до кофейно-черного, характерного для растворов квантовых точек сульфида свинца. Проверка стабильности коллоидного раствора была осуществлена центрифугированием пробирок с раствором в течение 10 минут на скорости 10000 оборотов в минуту. Центрифугирование оставило раствор в коллоидном состоянии.

Результаты оптических измерений вместе со спектром фотолюминесценции образца сравнения с близкой длиной волны приведены на рис. 6. Сравнение двух сигналов показывает, что в полученном нами растворе наблюдается то же самое распределение для левого склона максимума, что и у образца сравнения. За счет низкотемпературного режима синтеза удалось получить значение максимума на еще меньшей длине волны, чем наименьшая из длин волн максимумов четырех имеющихся образцов сравнения. Характер левого склона спектра фотолюминесценции указывает на то, что в предложенном методе синтеза удалось получить распределение частиц наименьших размеров такое же, как в образце сравнения, представляющем один из лучших лабораторных образцов растворов коллоидных квантовых точек, известных на сегодняшний день.

Правый пик сигнала люминесценции полученного раствора на длине волны 1250 нм имеет нормальное распределение и представлен группой частиц, которые можно выделить из раствора методами хроматографии. В таком случае значение полуширины также будет приближено к значению образцов сравнения и форма сигнала станет более симметричной.

Методами компьютерного моделирования было показано, что общий спектр можно представить суммой трех гауссовых распределений.

## **2. СОЗДАНИЕ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ НА РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПОДЛОЖЕК. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ**

Наиболее распространенной современной технологией интеграции коллоидных квантовых точек в электронные устройства является технология смешивания коллоидного раствора с различными проводящими полимерами.

В основе технологии получения полимерных пленок и пластин с квантовыми точкам лежат три способа:

- 1) введение коллоидных квантовых точек в растворы полимеров с последующим формированием пленок из этих растворов и удалением растворителя;
- 2) полимеризация мономеров в присутствии квантовых точек;
- 3) импрегнация полимеров квантовыми точками (внедрение готовых квантовых точек в полимерные материалы из растворов) [3].

Данные подходы обусловлены перспективой применения подобных материалов в гибкой электронике и доступностью технологии. Однако такие решения не допускают полной интеграции с существующими технологиями солнечной энергетики, в частности технологией изготовления солнечных элементов на основе кристаллического кремния. Поэтому в качестве фиксирующей частицы среды были предложены объемные полупроводниковые матрицы с порами нанометрового диапазона. В качестве матриц выступили образцы пористого кремния и пористого диоксида олова.

Использование пористого кремния может позволить интегрировать коллоидные квантовые точки в традиционную кремниевую технологию и совместить в одном устройстве решения микроэлектроники и фотовольтаики. В качестве матрицы в первом случае использовался пористый кремний марки КЭФ-5 ориентации [111], полученный методом электрохимического травления в плавиковой кислоте. Относительно большие поры развились на линиях шлифовки пластины, однако основную площадь поверхности занимают поры нанометрового диапазона со средним размером 20 нм (рис. 7).

Размер пор ограничен не только стремлением лучшего закрепления наночастиц сульфида свинца на поверхности. Определенную сложность составляет вопрос переноса заряда и взаимного расположения слоев, поглощающих излучение различных интервалов длин волн. На этапе данной работы было предложено рассмотреть

принципиальную возможность закрепления коллоидных квантовых точек на поверхности кремния, а также изучить влияние морфологии пористой поверхности на спектральные характеристики конечной системы.

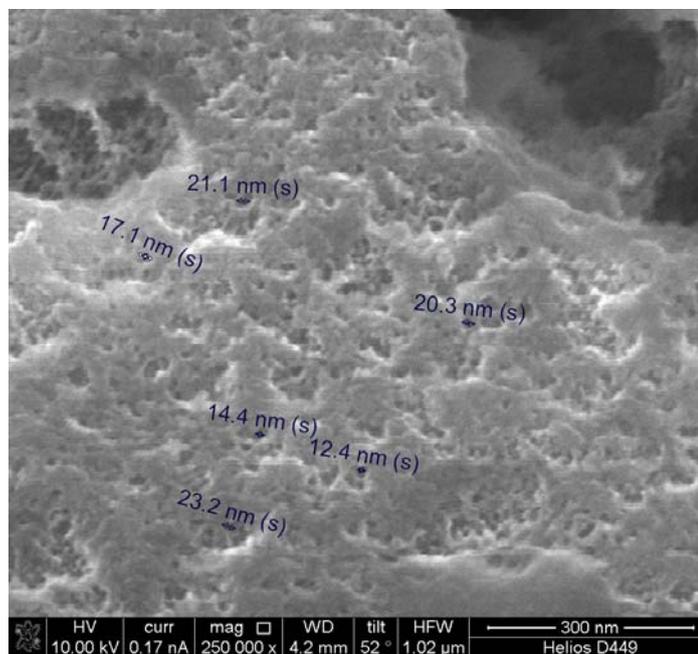


Рис. 7. РЭМ-изображение пористого кремния, использовавшегося в качестве твердотельной матрицы, увеличение 250000 раз

В качестве второй матрицы использовалась четырехслойная матрица 90% SnO<sub>2</sub> – 10 %SiO<sub>2</sub>, изготовленная методами золь-гель технологии на подложке из кварцевого стекла.

Диоксид олова является оптически прозрачным широкозонным полупроводником ( $E_g \approx 3,6$  эВ). Благодаря широкому диапазону электропроводности, которая обеспечивается кислородными вакансиями, пленки SnO<sub>2</sub> применяются в качестве оптически прозрачных электродов [14]. Таким образом, стекло, покрытое слоем проводящего оксида, является одной из классических составляющих солнечных элементов, на которой можно закрепить получаемые квантовые точки.

Слои раствора, содержащего золь диоксида олова, наносились центрифугированием на скорости 3000 об/мин в течение 15 секунд. После нанесения каждого слоя производился отжиг при 600°C в течение пяти минут. Конечная четырехслойная структура отжигалась при той же температуре в течение получаса. На рис. 8 приведено АСМ-изображение первого слоя образца. Как и у пористого кремния, имеются и относительно крупные поры размером около 200 нм, и малые поры в перешейках между ними. Также был получен образец, у которого производился отжиг только конечной структуры, а отдельные слои после нанесения только сушились на воздухе в нормальных условиях. Такая структура представляет собой непористую аморфную фазу диоксида олова наподобие стекла.

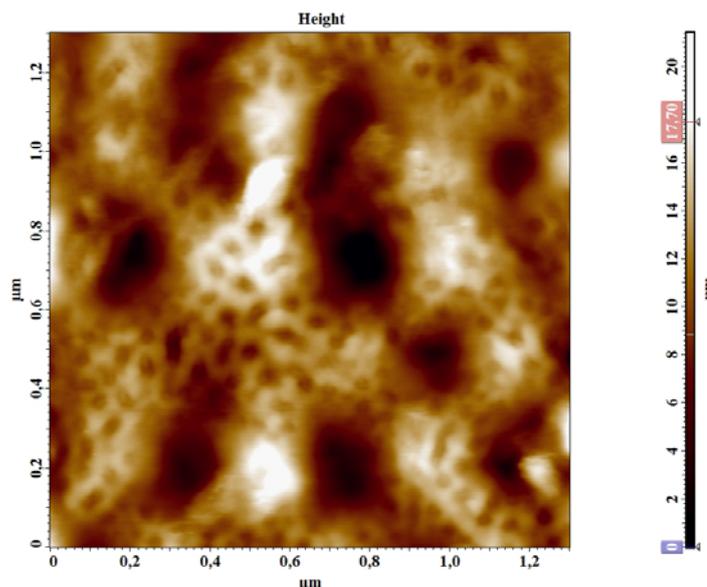


Рис. 8. АСМ-изображение однослойной матрицы диоксида олова

Коллоидные растворы квантовых точек наносились на описанные подложки следующим образом. На разогнанную на центрифуге до 1500 оборотов в минуту подложку капали 20 мкл разбавленного изопропиловым спиртом в соотношении 1:1 раствора квантовых точек. Слой растекался по образцу тонким слоем, изопропил и исходный растворитель испарялись на воздухе в нормальных условиях.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ СИСТЕМ. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В предположении изменения оптических свойств системы при различной морфологии подложки были проведены дополнительные оптические опыты. Для получения спектров фотолюминесценции (ФЛ) с высоким соотношением сигнал/шум, установка по их измерению должна иметь чувствительный приемник излучения с низким уровнем собственных шумов, а также мощный источник возбуждения. Блок-схема установки для измерения спектров ФЛ изображена на рис. 9.

В качестве источника возбуждающего излучения используется твердотельный лазер на  $\text{Nd:YVO}_4$  / с диодной накачкой и удвоением частоты ( $\lambda = 532$  нм). Оптическая мощность выходного излучения задается регулятором тока. Для реализации схемы синхронного детектирования на пути лазерного луча установлен электрооптический модулятор 2.

Сигнал ФЛ исследуемого образца фокусируется на входную щель автоматизированного решеточного монохроматора 8. Внутри монохроматора регистрируемый сигнал разлагается в спектр при помощи дифракционной решетки с периодом 300 штрихов/мм.

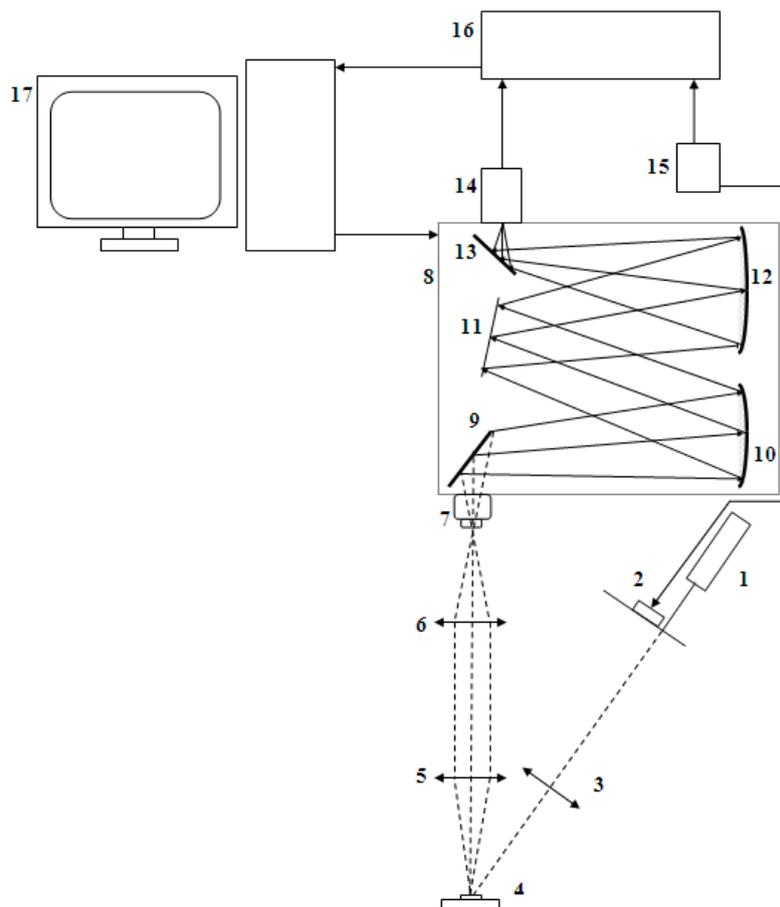


Рис. 9. Функциональная схема установки для измерения фотолюминесценции: 1 – лазер; 2 – электромеханический модулятор; 3, 5, 6 – собирающие линзы; 4 – исследуемый образец; 7 – светофильтр; 8 – решеточный монохроматор; 9, 11, 13 – плоские зеркала; 10, 12 – сферические зеркала; 14 – фотоприемник; 15 – контроллер электромеханического модулятора; 16 – синхронный усилитель; 17 – компьютер

На выходе монохроматора располагается фотодетектор 14. Выход фотодетектора подключен к сигнальному входу синхронного усилителя 16. На тактовый вход усилителя подается синхронизирующий сигнал от контроллера электромеханического модулятора 15. Оцифрованные данные передаются на компьютер 17 через интерфейс RS-232. К этому же компьютеру подключен монохроматор.

Сравнение спектров фотолюминесценции квантовых точек, нанесенных из одного раствора на матрицы, полученные различным образом, представлено на рис. 10 и 11. В пористых матрицах по сравнению с непористыми подложками наблюдается сдвиг максимума, при этом наибольший сдвиг длины волны при одинаковых условиях нанесения обнаружен у пористого кремния, предварительно окисленного на воздухе. Направление сдвига одинаково, как для пористого кремния, так и для пористого диоксида олова.

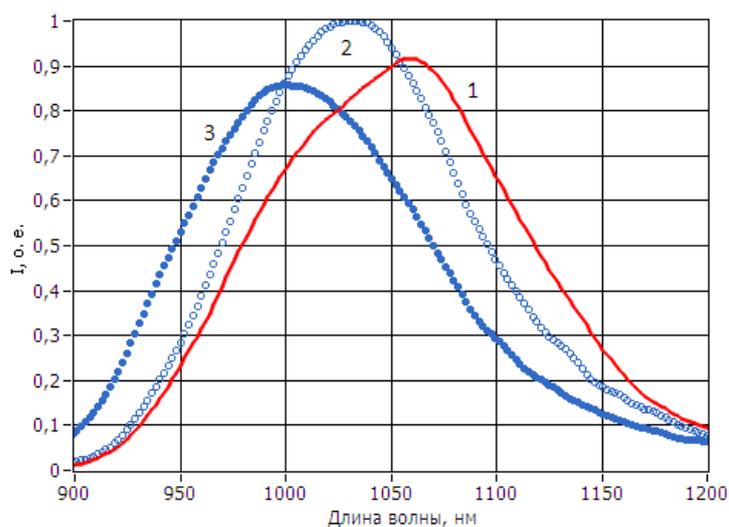


Рис. 10. Спектры фотолуминесценции коллоидных квантовых точек раствора, нанесенного на различные подложки: 1 – монокристаллический кремний, 2 – пористый кремний сразу после травления, 3 – пористый кремний, окислявшийся на воздухе в течение двух недель

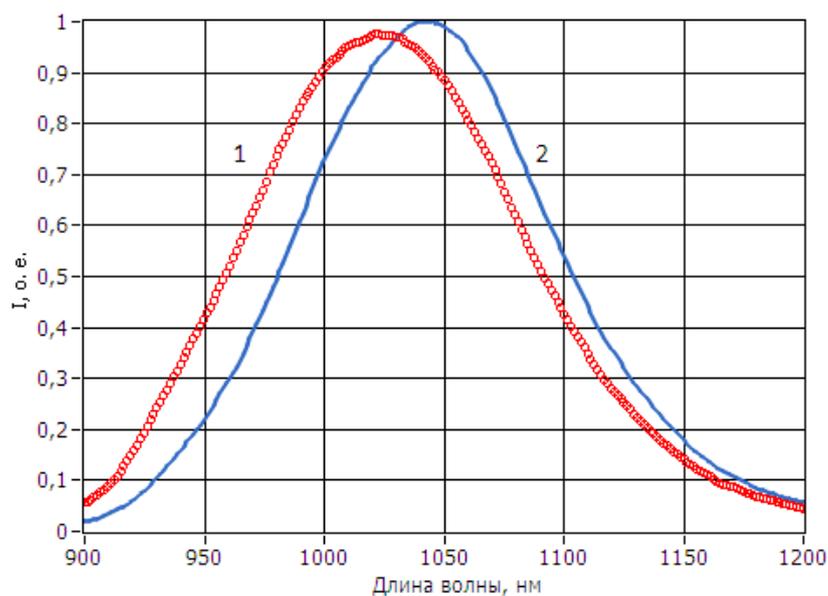


Рис. 11. Спектры фотолуминесценции коллоидных квантовых точек раствора, нанесенного на подложки диоксида олова: 1 – с отжигом каждого слоя, 2 – с отжигом только конечной структуры

Учитывая сохранение полуширины сигнала, можно предположить, что сдвиг обусловлен тем, что частицы в пористых системах меньше способны образовывать агломераты – уменьшается перекрытие между волновыми функциями частиц. Это означает, что уменьшается число частиц, у которых происходило расщепление уровней, близких к энергетическому зазору, то есть увеличивается эффективная ширина запрещенной зоны, и в общем спектре континуума частиц происходит сдвиг в более коротковолновую область.

Значительного увеличения интенсивности (более 10%) в пористых образцах не обнаружено. Это означает, что частицы либо не попадают внутрь пор, либо не закрепляются в самих порах. Возможно, более правильным методом оценки является «пропитка» таких матриц в коллоидном растворе квантовых точек. С другой стороны, на возможность закрепления частиц могут влиять размер пор и привитые функциональные группы.

Еще одним методом, предложенным в ходе обработки результатов работы, является метод, когда квантовые точки наносятся на остывающую, только что разогретую подложку и происходит «вталкивание» частиц внутрь пор за счет перепада давлений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены методики синтеза коллоидных квантовых точек сульфида свинца в водных и органических растворах. Получены и исследованы спектры фотолюминесценции коллоидных квантовых точек сульфида свинца на подложках различной природы и морфологии. Длины волн максимумов фотолюминесценции для указанных методов синтеза составили 1200 и 980 нм. Исследован эффект перераспределения квантовых точек при высыхании капли коллоидного раствора.

Методами атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии определена структура поверхности подложек пористого кремния и пористого диоксида олова, использовавшихся в качестве матриц для закрепления частиц. Установлено, что оптическими свойствами системы «подложка-коллоидные квантовые точки» можно управлять, изменяя материал и морфологию подложки. Сдвиг спектров по сравнению с непористыми материалами составил от 20 до 50 нм. Показана принципиальная возможность совмещения методик синтеза коллоидных квантовых точек с изготовлением кремниевых солнечных элементов. Технология пористого кремния является продолжением методик различных модификаций солнечных элементов на основе моно- или поликристаллического кремния, а технология пористого диоксида олова развивает новые методики получения прозрачных электродов.

Общая стоимость компонентов синтеза существенно меньше стоимости реагентов, используемых для получения образцов сравнения. Разработанный метод синтеза коллоидных квантовых точек позволяет масштабировать реакции в широких пределах относительно масс исходных компонентов и, соответственно, массы конечного продукта.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков / СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.

2. Sun B., Findikoglu A.T., Sykora M., Werder D.J., Klimov V.I. // Nano Letters. 2009. V.9. № 3. P. 1235-1241.
3. Люминесцентные фильтры и концентраторы солнечного света на базе коллоидных квантовых точек и органических люминофоров / Гладышев П. П. и др. // Сборник тезисов докладов Второго Международного форума по нанотехнологиям Rusnanotech 2009 (6-8 октября 2009 г, г. Москва). С. 61-62.
4. Квантовые точки: синтез, свойства, применение. Методические материалы. / Сост.: Р. Б. Васильев, Д. Н. Дирин. М.: ФНМ, 2007.
5. Синтез полупроводниковых наночастиц сульфида свинца и сульфида кадмия / Сост.: Лукашин А. В., Елисеев А. А. М.: МГУ. 2011.
6. Lambert K., Geyter B., Moreels I., Hens Z. PbTe|CdTe Core|Shell Particles by Cation Exchange, a HR-TEM study // Chemistry of Materials. 2009. V. 21, P. 778-780.
7. Влияние присоединения биомолекул на фотолюминесцентные и структурные характеристики квантовых точек CdSe-ZnS / Л. В. Борковская, Н. Е. Корсунская, Т. Г. Крыштаб и др. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, №6. С. 804-810.
8. Динамика спектрально-люминесцентных свойств квантовых точек CdSe-ZnS в гидрофобных растворителях / В. Е. Адрианов, А. О. Орлова, В. Г. Маслов и др. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 5. С. 30-35.
9. Люминесценция квантовых точек CdSe/ZnS инфильтрованных в опаловую матрицу / А. Н. Грузинцев, Г. А. Емельченко, В. М. Масалов и др. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, №2. С. 209-213.
10. Мусихин С. Ф., Ильин В. И. Гибридные полимер-полупроводниковые наноструктуры, технология, приборы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. №4-1. С. 105-112.
11. Vakueva L., Musikhin S., Hines M. A., Chang T.-W. F., Tzolov M., Scholes G. D., Sargent E. H. Size-tunable infrared 1000–1600 nm electroluminescence from PbS quantum-dot nanocrystals in a semiconducting polymer // Applied physics letters. V. 82. P. 2895-2897.
12. Методы получения и физико-химические свойства фотостабильных полупроводниковых нанокристаллов / Р. В.Новичков, М. С. Вакштейн, С. В. Дежуров и др. // Вестник МГОУ. 2009. №4. С. 61-64.
13. Марков С. А. Органический синтез коллоидных квантовых точек // Окно в микромир. 1998. №4. С. 18-24.
14. Домашевская Э. П., Рябцев С. В., Тутов Е. А., Юраков Ю. А., Чувенкова О. А., Лукин А. Н. Оптические свойства слоев SnO<sub>2</sub>-х // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 18. С. 7-13.

Е.С. Сенченко (аспирант, 3 год обучения)  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН)  
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)  
Научный руководитель – Ю.В. Чугуй, д.т.н., директор КТИ НП СО РАН

## АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ 3D ОБЪЕКТОВ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

### Реферат

*Ключевые слова:* дифракция на 3D объектах, теневой метод, размерный контроль, частично-когерентное освещение.

Применительно к размерному контролю изучены особенности формирования изображений 3D объектов с чёткой теневой проекцией при освещении их квазимонохроматическим частично-когерентным светом на основе конструктивной теории формирования изображений 3D объектов с использованием модели эквивалентных диафрагм.

Предложены и разработаны два пороговых алгоритма нахождения положения границы 3D края.

Результаты исследований использованы при разработке измерительной системы для промышленного контроля высоковольтных кольцевых изоляторов. Предложенный алгоритм вычисления размеров изделия по его теневому изображению, учитывающий влияние объёмности измеряемого объекта, а также угловые размеры источника света и апертуры оптической системы, позволил значительно снизить погрешность измерения: с 20 до 2 мкм.

### 1. Введение

Среди оптических средств бесконтактного размерного контроля промышленных изделий особое место занимают теневые системы благодаря высокой точности и быстродействию, широкому диапазону измерений [1]. Суть теневого метода измерений заключается в формировании теневого изображения объекта проекционным путем и нахождении в нем пороговым методом истинных его границ, исходя из которых далее определяются геометрические размеры объекта (ширина, длина, диаметр отверстия и пр.). В случае одномерных тонких объектов (нулевой толщины), как известно, истинная граница определяется с помощью пороговой обработки теневого изображения либо на уровне 25 % от интенсивности освещающей объект волны при их когерентном освещении, либо на уровне 50 % от интенсивности при некогерентном освещении [2].

При контроле 3D объектов в когерентном свете, как показано в [3-7], имеет место смещение этого порога на величину, пропорциональную зоне Френеля, что приводит к необходимости коррекции уровня порога при нахождении истинного положения границы 3D объекта.

В связи с трудностями, возникающими при использовании когерентного освещения (спекл-шумы), более перспективным представляется освещение контролируемых 3D объектов частично-когерентным светом с использованием, например, малогабаритных светодиодов. Влияние конечных угловых размеров таких источников света на точность определения положения границы 3D объекта впервые было изучено в [8, 9].

В настоящей работе более полно исследованы особенности формирования изображений 3D объектов в дифракционно-ограниченной системе при освещении их частично-когерентным светом. Предложены алгоритмы аналитического определения границ 3D объектов в зависимости от их толщины, угловых размеров источника света и апертурной диафрагмы проекционной системы. Теоретически и экспериментально показано, что их применение позволяет заметно повысить точность измерений протяженных объектов теневым методом.

## 2. Теневой метод измерения 3D объектов в частично-когерентном свете

Оптическая схема проекционной дифракционно-ограниченной системы, реализующей теневой метод контроля 3D объектов, показана на рис. 1, а. Квазимонохроматический частично-когерентный (по пространству) источник 1 с угловыми размерами  $2\theta_{ист}$  через коллимирующий объектив 2 освещает контролируемый объект 3 в виде «толстой» полуплоскости толщиной  $d$  (3D край). Проекционные объективы 4 и 6 формируют его теневое изображение на фотоприемной матрице 7. На фокусном расстоянии от объектива 4 находится апертурная диафрагма 5 с угловыми размерами  $2\theta_{ан}$ . Типичный профиль интенсивности света  $\tilde{I}(x)$  в изображении края 3D объекта показан на рис. 1, б. Для удобства изложения интенсивность света представлена в нормированном виде:  $\tilde{I}(x) = I(x)/I_0$ , где  $I_0$  – интенсивность выходного распределения в отсутствие объекта. Отметим, что при такой нормировке  $\tilde{I}(x \rightarrow \infty) \rightarrow 1$ . Выбор такого 3D объекта обусловлен тем, что он является основным (элементарным) фрагментом многих объемных тел. Существенно, что результаты, полученные для 3D края, могут быть обобщены на случай более сложных 3D объектов (например, объемная щель-зазор и т.п.)

Суть порогового метода определения положения границы в теневом изображении объекта состоит в установлении такого порога интенсивности  $\tilde{I}_{пор}$ , при

котором положение пиксела многоэлементного фотоприемника с выходным сигналом, пропорциональным  $\tilde{I}_{пор}$ , соответствует истинной границе 3D объекта.

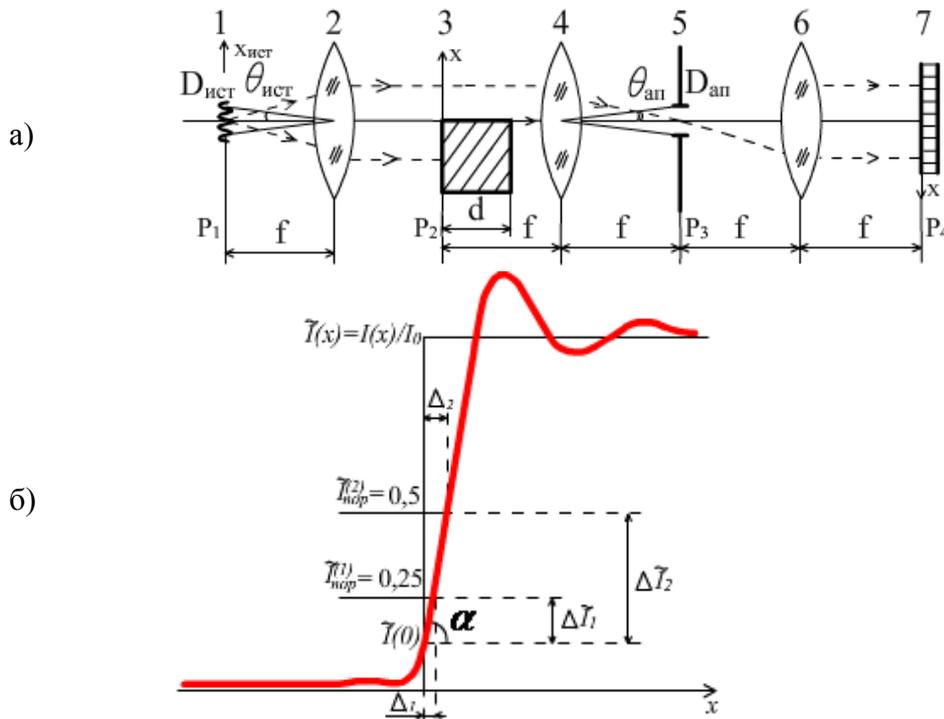


Рис. 1. Формирование изображения 3D объекта в проекционной дифракционно-ограниченной системе: оптическая схема (а) и профиль изображения 3D края в виде «толстой» полуплоскости (б)

Величина порога  $\tilde{I}_{пор} = \tilde{I}(x=0)$  зависит от ряда параметров, в том числе от угловых размеров источника освещения, объемности объекта, величины апертурной диафрагмы. Этот порог при контроле плоских объектов ( $d = 0$ ) в когерентном свете, как известно, равен  $\tilde{I}_{пор}^{(1)} = 0.25$  ( $\theta_{ист} \rightarrow 0$ ), а в некогерентном свете  $\tilde{I}_{пор}^{(2)} = 0.5$  ( $\theta_{ист} \rightarrow \pi/2$ ) [2]. При частично-когерентном освещении величина порога имеет промежуточное значение:  $0.25 < \tilde{I}_{пор} < 0.5$  ( $0 \text{ рад} < \theta_{ист} < \pi/2 \text{ рад}$ ) [10].

Степень влияния объемности объекта на структуру поля в его изображении определяется, как известно из [4], отношением критического угла дифракции  $\theta_{кр} = \sqrt{\lambda/d}$  ( $\lambda$  – длина волны излучения), при котором наиболее полно проявляются объемные эффекты, к угловому половинному размеру апертурной диафрагмы  $\theta_{ап}$ . Если  $\theta_{кр} \gg \theta_{ап}$ , или, иными словами, если глубина резкости оптической системы  $\Delta z = \lambda/\theta_{ап}^2$  много больше толщины объекта  $d$ , т. е.  $\lambda/\theta_{ап}^2 \gg d$ , то имеют место слабые объемные эффекты, и наоборот, при  $\theta_{кр} \ll \theta_{ап}$ , т. е. при  $\Delta z \ll d$ , влияние их достаточно велико.

Далее при расчетах  $\tilde{I}(0)$  ограничимся слабыми объемными эффектами, что часто имеет место на практике.

### 3. Алгоритмы высокоточного определения положения границ 3D объектов

Разработаны два пороговых алгоритма определения положения геометрической границы 3D края, которые основаны на использовании или истинного (вычисленного) порога, или стандартного порога с внесением в него корректирующей добавки. Остановимся сначала на результатах, полученных для первого алгоритма. В этом случае вычисляется порог, равный значению интенсивности в изображении «толстой» полуплоскости в точке, соответствующей ее геометрической границе:  $\tilde{I}_{пор} = \tilde{I}(0)$  (рис. 1, б). Он учитывает угловые размеры источника  $\theta_{ист}$  и протяженность объекта  $d$ . На основе конструктивной теории формирования изображений протяженных объектов с четкой теневой проекцией [3-7] применительно к 3D краю вычислена нормированная интенсивность света в его изображении в точке  $x = 0$ , соответствующей геометрическому положению границы объекта, для случая, когда угловой размер апертурной диафрагмы больше углового размера источника, но меньше критического угла дифракции, т.е. при  $\theta_{ист} \ll \theta_{ан} \ll \theta_{кр}$  (Приложение А). Выражение для интенсивности света  $\tilde{I}(0)$  в точке, соответствующей положению границы 3D края, имеет следующий вид (А6):

$$\tilde{I}(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{ист}^2}{\theta_{ан}^2} - \frac{\theta_{ан}}{\sqrt{2\pi}\theta_{кр}}. \quad (1)$$

Видно, что величина  $\tilde{I}(0)$  определяется тремя слагаемыми, первое из которых соответствует случаю освещения плоского объекта точечным осевым источником (когерентное освещение), вторая составляющая отражает влияние конечных угловых размеров источника, которое имеет квадратичный характер и приводит к увеличению  $\tilde{I}(0)$ ; третье слагаемое обусловлено объемностью изделия и ведет к уменьшению уровня порога  $\tilde{I}(0)$ . Так как второе и третье слагаемые имеют разные знаки, то таким образом при заданных параметрах  $d$  и  $\theta_{ан}$  открывается возможность выбором углового размера источника  $2\theta_{ист}$  несколько скомпенсировать влияние объемности на изменение значения интенсивности света в точке геометрического положения границы 3D объекта ( $x = 0$ ).

Нами исследовано поведение положения порога в зависимости от угловых размеров источника света для тонких и толстых объектов. С помощью компьютерного моделирования оптической системы с параметрами, представленными в табл. 1 (варьировался диаметр источника), получены графики зависимости уровня порога от углового размера источника света (рис. 2). Из расчетов следует, что уровни порога для

толстого и тонкого краев при различных размерах источника отличаются на постоянную величину, равную третьему слагаемому в выражении (1), что подтверждает правильность выведенной формулы.

Таблица 1. Параметры моделируемой оптической системы.

Длина волны, $\lambda$	0.65 мкм
Толщина края, $d$	3.6 мм
Диаметр источника, $D_{ист}$	от 0 до 50 мм
Фокусное расстояние коллимирующего объектива, $f_1$	210 мм
Ширина апертуры, $D_{ап}$	1.2 мм
Фокусное расстояние проекционных объективов, $f_2$	200 мм

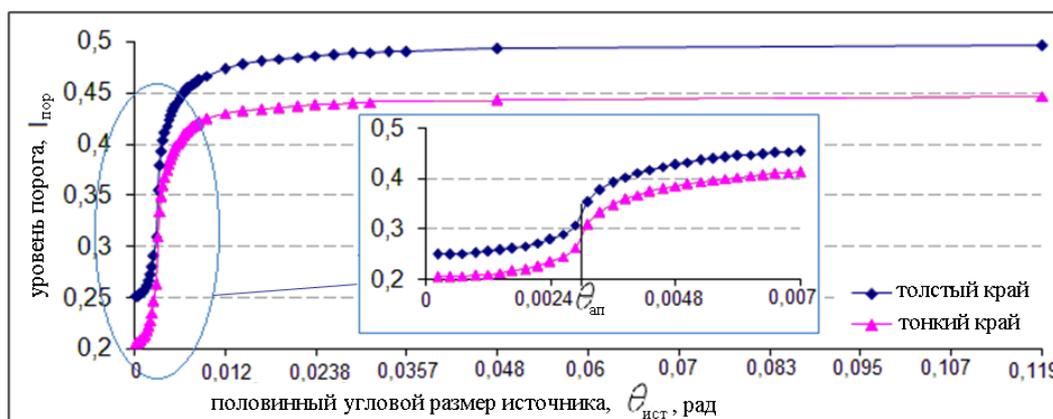


Рис. 2. Зависимость уровня порога теневого изображения от угловых размеров источника света

Как и следовало ожидать, из рис. 2 видно, что при освещении тонкого объекта ( $d = 0$ ) точечным источником уровень порога  $\tilde{I}_{пор}$  строго составляет 0.25, а при освещении достаточно протяженным источником  $\tilde{I}_{пор}$  стремится к 0.5.

Уровень порога при освещении толстого объекта оказывается меньше, чем для тонкого. Это свидетельствует о том, что, благодаря объемности объекта, его изображение сдвинуто вправо в сравнении с изображением тонкого объекта: в сторону светлой части изображения 3D края (рис. 1, б). Иными словами, влияние объемности в случае, например, 3D щели приводит к уменьшению ее ширины.

Разница уровней порога тонкого и толстого объектов при изменении диаметра источника в широком диапазоне изменяется в диапазоне от 0.045 до 0.041.

Из рис. 2 видно, что при  $\theta_{ист} \sim \theta_{ап}$  поведение указанных зависимостей резко меняется: наблюдается быстрый рост уровня порога. Эта область разделяет две подобласти ( $\theta_{ист} < \theta_{ап}$  и  $\theta_{ист} > \theta_{ап}$ ), в которых имеет место плавное поведение функций.

Второй алгоритм высокоточного определения геометрического положения границы 3D края предусматривает ее определение стандартным пороговым методом при использовании двух широко применяемых на практике порогов:  $\tilde{I}_{пор}^{(1)} = 0.25$  и  $\tilde{I}_{пор}^{(2)} = 0.5$ . Существенно, что для точного определения положения границ 3D объектов в этом алгоритме вводятся корректирующие поправки  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , которые определяются следующим образом (рис. 1, б):

$$\Delta_1 = \frac{0.25 - \tilde{I}(0)}{\tilde{I}'(0)} = \frac{\Delta\tilde{I}_1}{tg\alpha}, \quad \Delta_2 = \frac{0.5 - \tilde{I}(0)}{\tilde{I}'(0)} = \frac{\Delta\tilde{I}_2}{tg\alpha}, \quad (2)$$

где  $\alpha = \arctg \tilde{I}'(0)$  – угол наклона профиля изображения границы 3D края на выбранном уровне. В этом случае, необходимо иметь информацию о значении величины  $\tilde{I}'(0)$ . В результате проведенных нами расчетов  $\tilde{I}'(0)$  установлено (Приложение Б), что при  $\theta_{уст} \ll \theta_{ан} \ll \theta_{кр}$  наклон зависит от параметров оптической системы следующим образом (Б4):

$$\tilde{I}'(0) = \frac{2\theta_{ан}}{\lambda} + \frac{4}{\sqrt{2\pi\lambda\theta_{кр}}} \left( \frac{1}{3}\theta_{уст}^2 - \theta_{ан}^2 \right) \quad (3)$$

Выражения (2) для поправок  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  с учетом формулы (3) принимают следующий вид:

$$\Delta_1 = \frac{\lambda}{\theta_{ан}} \left[ \frac{3}{2\sqrt{2\pi}} \frac{\theta_{ан}}{\theta_{кр}} - \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}^2} \right], \quad \Delta_2 = \frac{\lambda}{\theta_{ан}} \left[ 0,25 + \frac{3}{2\sqrt{2\pi}} \frac{\theta_{ан}}{\theta_{кр}} - \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}^2} \right]. \quad (4)$$

Видно, что величины поправок зависят от угловых размеров апертуры системы  $2\theta_{ан}$  и источника света  $2\theta_{уст}$ , а также от критического угла  $\theta_{кр}$ . Так как слагаемые в формулах имеют противоположные знаки, то, очевидно, что путем выбора соответствующих значений параметров системы можно минимизировать поправки (4).

На рис. 3 приведены вычисленные профили изображений объемного края с переменной толщиной  $d$ : от 0 до 9 мм. Подчеркнем, что угловой размер источника при расчетах был несколько больше углового размера апертуры системы. Можно видеть, что при изменении  $d$  имеет место в основном смещение профиля относительно положения реального края объекта. При этом угол наклона  $\alpha$  профиля изображения 3D края меняется незначительно. Этот эффект особенно заметен при малых угловых размерах источника  $\theta_{уст} \ll \theta_{ан}$  (3). В этом случае, основной вклад в угол наклона  $\alpha$  дает первый дифракционный член  $2\theta_{ан}/\lambda$ . При этом влияние угловых размеров источника на угол  $\alpha$  (второй член в (3)) при указанных выше соотношениях между  $\theta_{уст}$ ,  $\theta_{ан}$  и  $\theta_{кр}$  может быть пренебрежимо малым.

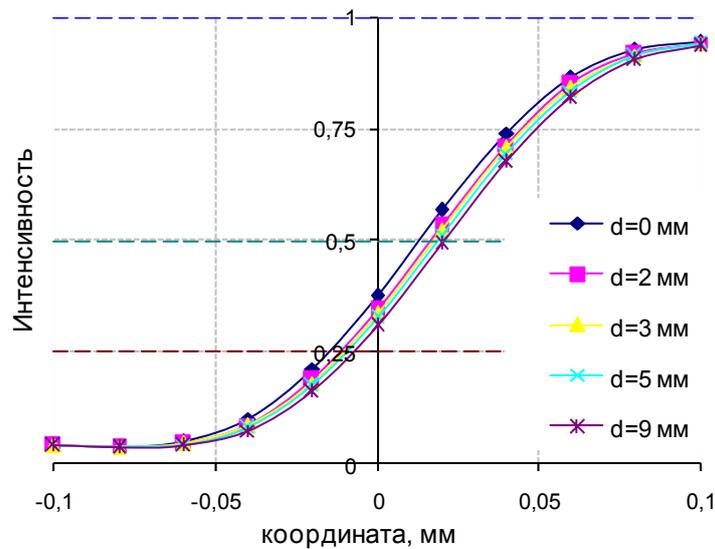


Рис. 3. Профиль изображения 3D края в области реальной границы ( $x = 0$ ) при разных значениях его толщины  $d$  ( $\lambda = 650 \text{ нм}$ ,  $\theta_{\text{уст}} = 3.33 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ ,  $\theta_{\text{ан}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ )

#### 4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Полученные нами теоретические результаты проверены экспериментально. Схема оптической системы, на базе которой проводились эксперименты, представлена на рис. 1, а. В качестве источника освещения 1 использовался светодиод со средней длиной волны  $\lambda_0 = 628 \text{ нм}$ , спектральная ширина составляла  $\Delta\lambda = 15 \text{ нм}$ . Необходимый угловой размер источника освещения задавался фокусным расстоянием коллимирующей линзы и размером диода (табл. 1, диаметр источника 1,4 мм). Исходный толстый объект 3 системой линз 4, 6 проецировался на фотоприемную камеру с размерами матрицы  $2210 \times 3002$  пикселей (размер одного пикселя 3.5 мкм). В эксперименте моделировалась ситуация  $\theta_{\text{уст}} \approx \theta_{\text{ан}}$ .

В качестве протяженных объектов измерения использовались керамические изоляционные кольца с толщинами от 0.8 до 80 мм с наружными диаметрами от 28 до 80 мм и внутренними диаметрами от 23 до 62 мм. Положение края 3D объекта определялось на уровне  $\tilde{I}_{\text{пор}}^{(2)} = 0.5$ , т.к. профиль края на этом уровне достаточно точно аппроксимируется прямой линией, что заметно облегчает обработку результатов. Поведение профилей изображений тонкой и «объемной» полуплоскостей при таких соотношениях  $\theta_{\text{уст}}$  и  $\theta_{\text{ан}}$  показано на рис. 3.

На рис. 4 приведены экспериментально полученные данные в виде точек, отражающие смещение положения геометрической границы кольца от его толщины. Эти данные аппроксимированы кривой (толстая линия). Расчетные данные представлены нижней кривой при выборе порога  $\tilde{I}_{\text{пор}}^{(2)} = 0.5$ .

Экспериментально выявлено и теоретически подтверждено заметное влияние толщины объекта, а также параметров оптической системы на положение профиля его изображения. Так, при изменении толщины объемного края в диапазоне от 2 до 10 мм, изменение смещения положения его границы составило 4.77 мкм. Видно, что отличие экспериментальных и теоретических данных в среднем не превышает нескольких мкм, что может объясняться невысокой точностью калибровки исходных объектов (они измерялись микрометрами с погрешностью ~ 2 мкм).

Полученные результаты использованы при разработке и создании измерительной системы для промышленного контроля 3D объектов в виде высоковольтных кольцевых изоляторов. Используя предложенный алгоритм, удалось снизить систематическую погрешность измерительной системы на порядок: с 20 мкм до 2 мкм.

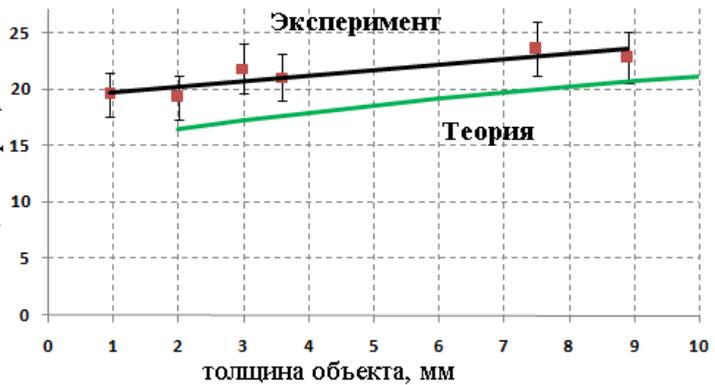


Рис. 4. Зависимость смещения положения края 3D объекта от его толщины: точки – экспериментальные данные, толстая линия – усредненная экспериментальная кривая, нижняя кривая – расчетные данные

## 5. Заключение

Применительно к размерному контролю изучены особенности формирования изображений 3D объектов с четкой теневой проекцией при освещении их квазимонохроматическим частично-когерентным светом на основе конструктивной теории формирования изображений 3D объектов с использованием модели эквивалентных диафрагм.

Исследования проводились на примере типичного фрагмента 3D объектов в виде «объемной» полуплоскости с толщиной  $d$ . В результате расчетов установлено, что в изображении такого объекта наблюдается смещение его профиля (в сравнении со случаем тонкой полуплоскости с  $d = 0$ ), которое зависит от толщины объекта  $d$ , угловых размеров источника  $2\theta_{ист}$  и апертуры  $2\theta_{ан}$  оптической проекционной системы. При использовании стандартных пороговых алгоритмов (для случаев когерентного и некогерентного освещения 3D объекта) это приводит к погрешности определения положения геометрической границы 3D края.

Предложены и разработаны два пороговых алгоритма нахождения положения границы 3D края.

Первый из них основан на установлении уровня порога  $\tilde{I}_{пор}$ , равного значению интенсивности света  $\tilde{I}(0)$  в изображении 3D края в точке, соответствующей его геометрической границе. Найдена аналитическая зависимость интенсивности света  $\tilde{I}(0)$  от параметров  $d$ ,  $2\theta_{уст}$  и  $2\theta_{ан}$ . Показано, что при  $\theta_{уст} \ll \theta_{ан} \ll \theta_{кр}$  интенсивность  $\tilde{I}(0)$  определяется двумя составляющими, одна из которых прямо пропорциональна квадрату углового размера источника света, а другая – обратно пропорциональна критическому углу дифракции (или прямо пропорциональна корню квадратному из толщины объекта). Так как эти составляющие имеют разные знаки, то выбором угловых размеров источника (при заданной толщине объекта  $d$ ) можно минимизировать смещение границы в изображении 3D края.

Второй алгоритм основан на использовании стандартных пороговых алгоритмов для случаев когерентного ( $\tilde{I}_{пор}^{(1)} = 0.25$ ) и некогерентного ( $\tilde{I}_{пор}^{(2)} = 0.5$ ) освещений с внесением в них корректирующих поправок. Полученные аналитические выражения позволяют в зависимости от параметров  $d$ ,  $\theta_{уст}$  и  $\theta_{ан}$  определять достаточно точно положение границы 3D края.

Результаты исследований использованы при разработке измерительной системы для промышленного контроля высоковольтных кольцевых изоляторов. Предложенный алгоритм вычисления размеров изделия по его теневому изображению, учитывающий влияние объемности измеряемого объекта, а также угловые размеры источника света и апертуры оптической системы, позволил значительно снизить погрешность измерения: с 20 до 2 мкм.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании теневых систем прецизионного контроля 3D объектов с четкой теневой проекцией в части оптимального выбора их параметров, обеспечивающего высокие технические характеристики измерительной аппаратуры.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Найдём выражение (1) при  $\theta_{уст} \ll \theta_{ан} \ll \theta_{кр}$ . Как известно из [3], Фурье-спектр абсолютно поглощающего 3D края («толстой» полуплоскости) при освещении его нормально падающей плоской волной (сформированной осевым точечным источником) определяется следующей формулой:

$$F(\omega) = \pi\delta(\omega) + \frac{\tilde{Y}_d(\omega)}{j\omega} + \frac{Y(0)}{j\omega} e^{\frac{j\omega^2 d}{2k}}, \quad (A1)$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака;  $Y(x)$  – ступенчатая функция Хевисайда;  $\omega = k\theta$  – угловая спектральная частота;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\tilde{Y}_d(\omega)$  – функция, описывающая френелевское изображение тонкой полуплоскости на расстоянии  $d$  [10].

Функция  $\tilde{Y}_d(\omega)$  в окрестности  $\omega \rightarrow 0$  согласно [4] имеет вид:

$$\tilde{Y}_d(\omega) = 0,5 + e^{-j\pi/4} \frac{\omega}{\omega_{кр}}, \quad (A2)$$

где  $\omega_{кр} = k\theta_{кр} = k\sqrt{\lambda/d} = 2\pi/\sqrt{\lambda d}$  – критическая угловая пространственная частота.

Принимая во внимание (A2) и учитывая, что  $e^{\frac{j\omega^2 d}{2k}} \rightarrow 1$  при  $\omega \rightarrow 0$ , выражение (A1) можно преобразовать к следующему виду:

$$F(\omega) = \left[ \pi\delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right] + \frac{e^{-j\pi/4}}{j\omega_{кр}}.$$

В случае освещения 3D объекта наклонной плоской волной (сформированной точечным источником, сдвинутым от оси на угол  $\theta_{см}$ ) для его спектра можно получить следующее выражение [5]:

$$F(\omega, \omega_{см}) = \pi\delta(\omega - \omega_{см}) + \frac{1}{j(\omega - \omega_{см})} - \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}(\omega - 2\omega_{см})}{(\omega - \omega_{см})\omega_{кр}}. \quad (A3)$$

где  $\omega_{см} = k\theta_{см}$ .

В результате фильтрации апертурной диафрагмой с угловыми размерами  $2\omega_{ан}$  спектра 3D края, освещенного наклонной плоской волной, поле на выходе проекционной системы (плоскость  $P_4$  на рис. 1, а) имеет следующий вид:

$$A(x_2, \omega_{см}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{ан}}^{\omega_{ан}} F(\omega, \omega_{см}) \cdot \exp(i\omega x_2) d\omega. \quad (A4)$$

Результирующая интенсивность при частично-когерентном освещении 3D объекта определяется как интеграл квадрата амплитуды от каждого отдельного точечного источника в пределах углового размера протяженного источника  $2\theta_{исм}$ :

$$\tilde{I}(x_2) \sim \int_{-\omega_{исм}}^{\omega_{исм}} |A(x_2, \omega_{см})|^2 d\omega_{см} = \int_{-\omega_{исм}}^{\omega_{исм}} \left| \int_{-\omega_{ан}}^{\omega_{ан}} F(\omega, \omega_{см}) \cdot \exp(j\omega x_2) d\omega \right|^2 d\omega_{см}. \quad (A5)$$

Очевидно, что в окрестности границы 3D края ( $x_2 = 0$ ) результирующая интенсивность равна:

$$\tilde{I}(0) \sim \int_{-\omega_{исм}}^{\omega_{исм}} \left| \int_{-\omega_{ан}}^{\omega_{ан}} F(\omega, \omega_{см}) d\omega \right|^2 d\omega_{см}.$$

После несложных преобразований для нормированной интенсивности света в точке, соответствующей положению границы 3D края, можно получить искомое

выражение:

$$\tilde{I}(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}^2} - \frac{\theta_{ан}}{\sqrt{2\pi}\theta_{кр}}. \quad (A6)$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Для определения тангенса угла наклона профиля изображения 3D края воспользуемся выражением (A4). Найдём производную функции  $\tilde{I}(x_2)$  в точке, соответствующей положению границы 3D края  $A(x_2, \omega_{см})$  (см. приложение А):

$$tg\alpha = \tilde{I}'(x_2) = \left( \int_{-\omega_{уст}}^{\omega_{уст}} A(x_2, \omega_{см}) A^*(x_2, \omega_{см}) d\omega_{см} \right)',$$

где символ \* означает комплексное сопряжение.

В окрестности границы 3D-края ( $x_2 = 0$ ) для  $I'(0)$  имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{I}'(0) &= \int_{-\omega_{уст}}^{\omega_{уст}} A'(0, \omega_{см}) A^*(0, \omega_{см}) d\omega_{см} + \\ &+ \int_{-\omega_{уст}}^{\omega_{уст}} A(0, \omega_{см}) (A^*(0, \omega_{см}))' d\omega_{см}. \end{aligned} \quad (B1)$$

Согласно (A4) для производной функции  $A(x_2, \omega_{см})$  можно получить следующее выражение:

$$A'(x_2, \omega_{см}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{ан}}^{\omega_{ан}} F(\omega, \omega_{см}) \cdot j\omega \cdot \exp(j\omega x_2) d\omega. \quad (B2)$$

Используя (A3), для  $A'(0, \omega_{см})$  в окрестности границы 3D края ( $x_2 = 0$ ) из (B2) имеем:

$$\begin{aligned} A'(0, \omega_{см}) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{ан}}^{\omega_{ан}} (F(\omega, \omega_{см}) \cdot j\omega) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{ан}}^{\omega_{ан}} \left[ \pi\delta(\omega - \omega_{см}) j\omega + \frac{\omega}{(\omega - \omega_{см})} - \frac{j\omega \cdot e^{j\frac{\pi}{4}(\omega - 2\omega_{см})}}{(\omega - \omega_{см})\omega_{кр}} \right] d\omega. \end{aligned} \quad (B3)$$

Подставляя (B3) в формулу (B1), после некоторых преобразований для тангенса угла наклона профиля изображения 3D объекта в окрестности его границы можно получить искомое выражение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \tilde{I}'(0) = \frac{2\theta_{an}}{\lambda} + \frac{4}{\sqrt{2\pi\lambda\theta_{кр}}} \left( \frac{1}{3}\theta_{усм}^2 - \theta_{an}^2 \right). \quad (\text{Б4})$$

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Webster J.G. The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. CRC Press LLC, Boca Raton, 1999.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М., Мир, 1970.
3. Chugui Yu.V., Koronkevitch V.P., Krivenkov B.E. and Mikhlyayev S.V. / Quasi-geometrical method for Fraunhofer diffraction calculations for three-dimensional bodies // Journal of the Optical Society of America. – USA. – 1981. – Vol. 71, № 4. – P. 483-489.
4. Чугуй Ю.В. / Особенности формирования и оконтуривания изображений объемных тел в когерентном свете // Автометрия. – 1991. – № 4. – С. 103-112.
5. Chugui Yu.V. / Constructive theory of formation and filtering the optical imaging and Fraunhofer diffraction patterns of 3D opaque object of constant thickness in coherent light // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 2655. – P. 287-298.
6. Chugui Yu.V., Sokolov V.A. / High-frequency filtered images of an optically thick edge / J. Opt. Soc. Am. A – 1998. – 15 (3). – P. 611-621.
7. Chugui Yu.V. / Optical dimensional metrology for 3D objects of constant thickness // Measurement. – 2001. – Vol. 30, № 1. – P. 19-31.
8. Chugui Yu.V., Senchenko E.S. / High Precision Algorithms for Shadow Inspection of 3D Objects in Partially Coherent Light // The VIII international conference on measurement (Measurement 2011) (Smolenice Castle, Slovakia, 27-30 april 2011 y.) : proc. Institute of Measurement Science, SAS. – Bratislava, 2011. – P. 197-200.
9. Senchenko E.S., Chugui Yu.V. / Shadow Inspection of 3D Objects in Partially Coherent Light // Measurement Science Review. – 2011. – Vol. 11. – No. 4. – P.104-107.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Мир, 1970.

## **АННОТАЦИИ РАБОТ ЛАУРЕАТОВ КОНКУРСА В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ПРОЕКТ АСПИРАНТА»**

Н.А. Бабушкин (аспирант первого года обучения)  
ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет

Научный руководитель – С.В. Голдаев, д.ф.-м.н., профессор кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОВЫХ КОНТАКТНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ**

Основным стратегическим направлением энергетической политики развитых стран является максимальное ресурсо- и энергосбережение при производстве различных видов продукции, в том числе тепловой и электрической энергии на тепловых и атомных электростанциях, паровых и водогрейных котельных.

Большое значение в создании новых технологий приобретает интенсификация технологических процессов, связанных с тепло- и массообменом. Особое место занимают способы нагрева и выпаривания различных растворов. Обычно эти процессы протекают в аппаратах, где испаряемый или нагреваемый раствор соприкасается с нагревательными элементами (змеевиками, трубами и поверхностями сосуда) или в аппаратах с непосредственным контактом нагретых газов с жидкостью.

Наиболее эффективным способом нагревания растворов является барботаж дымовых газов с помощью погружных горелок, работающих на газообразном топливе. Косвенным подтверждением экономической эффективности применения контактных водонагревателей для технологических и теплофикационных нужд является их широкое распространение в Западной Европе, где количество таких аппаратов, находящихся в эксплуатации, исчисляется сотнями тысяч.

Работа направлена на выявление эффективных режимов тепло- и массообмена, происходящих в контактных теплообменниках. Результаты исследований могут быть использованы при реализации проекта проектирования и эксплуатации подобных аппаратов. Внедрение высокоэффективных нагревателей поможет снизить экологическую нагрузку на некоторых предприятиях страны, а так же получить положительный экономический эффект при их эксплуатации.

Целью работы является выявление эффективных режимов работы газовых контактных водонагревателей на основе математического моделирования.

В связи с этим, были исследованы и реализованы: математическое описание процесса нагревания и выпаривания растворов с помощью аппарата погружного горения; математическое моделирование процессов высокотемпературного тепло- и массообмена в эрлифтной контактной камере; предложения мер по повышению температуры нагрева воды в контактном водонагревателе и их технико-экономическая

оценка; исследование показателей качества воды, нагретой в газовых контактных водонагревателях

Для решения поставленных задач были выполнены теоретические исследования, которые опираются на использование основных принципов и положений гидрогазодинамики и термодинамики, тепло- и массообмена, комплексного подхода к изучаемым процессам, а так же на результаты экспериментов других исследователей.

В результате работы, реализованы на Turbo Pascal варианты усовершенствованных математических моделей воздействия на жидкости газовыми контактными водонагревателями.

Анализ полученных данных при варьировании начальными параметрами, а также источниками газоснабжения, позволил оценить динамику изменения тепловой мощности аппарата, работающего с погружной горелкой. Топливо из Бухарского месторождения имеет лучшие показатели тепловой мощности по сравнению с другими видами источников газоснабжения.

В эрлифтной контактной камере установлены зависимости изменения температуры нагрева и скорости раствора и газа в аппарате. Установлено, что процесс можно разделить на две зоны: активную и пассивную. В первой, процессы тепло- и массопереноса идут наиболее интенсивно нежели во второй. Результаты работы позволили выявить эффективные режимы работы различных видов контактных тепло- и массообменных аппаратов.

Проанализирован вариант усовершенствования контактного водонагревателя для повышения энергетической эффективности его работы. При компримировании воздуха в аппарате возможно повышение температуры нагрева воды до 110 °С при давлении около 0,26 МПа, что соответствует работе системы отопления со средними параметрами теплоносителя.

Решена задача по определению оптимального давления сжатия воздуха в аппарате. При различных давлениях воздуха, лежащих в интервале 0,05...0,4 МПа, установлено, что по технико-экономическим показателям оптимальное давление составило 0,132 МПа. Расчеты позволили оценить энергетические затраты на привод компрессора.

Предложены схемы применения контактных водонагревателей в системах комплексного теплоснабжения зданий. Анализ качества нагретой воды показал, что она пригодна для нужд жилищно-коммунального хозяйства.

А.А. Дроздов (аспирант)  
Кафедра компрессорной, вакуумной и холодильной техники (КВХТ) ФГБОУ ВПО  
СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия  
Научный руководитель – Ю.Б. Галеркин, д.т.н., проф., ФГБОУ ВПО СПбГПУ

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ И КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ, ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Центробежные компрессоры применяются для обеспечения многих производственных процессов, а на их привод затрачивается большое количество энергии. Таким образом, проблема оптимального проектирования центробежных компрессоров имеет очень большое значение. Для решения проблемы быстрого и достоверного определения характеристик компрессора был создан метод оптимального газодинамического проектирования. Он является результатом обобщения и анализа большого объема экспериментальных данных, накопленных на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» СПбГПУ (кафедра КВХТ). Комплекс соответствующих компьютерных программ получил название Метод универсального моделирования [1].

Развитие вычислительной техники позволяет производить большее количество расчетов за меньшее время, что создает предпосылки для дальнейшего развития Метода. В результате проведенной работы был создан пакет программ Метода универсального моделирования шестого поколения. От предыдущего поколения он отличается следующими нововведениями:

- введена возможность расчета характеристик центробежных компрессоров и компрессорных ступеней с осерадиальными рабочими колесами (ОРК);
- уточнена формула расчета потерь трения в зазоре между основным диском и стенкой диафрагмы;
- введен учет влияния особенностей дуговых и профилированных лопаток радиальных рабочих колеса на потери в лопаточной решетке рабочего колеса (РК);
- скорректированы формулы расчета потерь трения на лопатках и ограничивающих поверхностях.

Одним из главных введенных усовершенствований является возможность расчета ОРК. Важной частью данного уточнения является максимально точное определение площади ограничивающих поверхностей и площади лопаток. В предыдущих версиях программы расчет длины и площади лопатки ОРК, а так же площади ограничивающих поверхностей основного и покрывающего дисков производился со значительными допущениями [1]. Так площадь ограничивающих

поверхностей  $\bar{S}_{оп}$  принималась равной площади кольца, образованного диаметрами  $D_1$  и  $D_2$ , с учетом среднего коэффициента стеснения:

$$\bar{S}_{оп} = \pi(1 - \bar{D}_1^2)(\tau_1 + \tau_2)/8,$$

Площадь лопатки определялась как произведение длины лопатки  $\bar{l}_л$  на среднюю высоту лопатки РК:

$$\bar{S}_л = 0,5\bar{l}_л(\bar{b}_1 + \bar{b}_2).$$

При этом геометрия ОРК задавалась диаметрами РК на входе  $D_0$ , диаметром втулки  $D_{BT}$ , высотой лопатки на выходе  $b_2$ , а так же углами установки лопатки  $\beta_{л1}$  и  $\beta_{л2}$ .

Такой подход не позволяет достаточно точно оценить потери трения на ограничивающих поверхностях РК и на его лопатках, а так же не дает возможность в полной мере проводить оптимизацию геометрических размеров ОРК при решении обратной задачи газодинамики.

Для решения данной проблемы в пятом поколении пакета программ Метода универсального моделирования геометрия ОРК задается не только перечисленными выше параметрами, но также осевой протяженностью колеса  $L_m$ , радиусами скругления основного и покрывающего дисков  $R_h$  и  $R_s$ . Положение входной кромки лопатки задается отношением меридиональной протяженности лопатки к общей меридиональной протяженности средней линии ОРК  $l_{м.л}/l_{мОРК}$ . Кроме того, задается угол наклона покрывающего диска РК  $\phi_2$ . Схематизация изменение лопаточных углов по длине лопатки принимается постоянной, исходя из анализа геометрии различных ОРК, и предполагает три различных характера изменения угла.

Заданная таким образом форма РК позволяет более точно, по сравнению с предыдущими версиями программы, определить площадь поверхности ограничивающих поверхностей и лопаток ОРК. Для этого меридиональная длина лопатки разделяется на 40 участков, для каждого из которых определяется его длина  $\Delta l_{mi}$ , высота лопатки  $b_i$  и диаметр  $D_i$ . Таким образом, площадь лопатки может быть определена по формуле:

$$\bar{S}_л = \sum_0^i \frac{\Delta \bar{l}_{mi} \cdot \bar{b}_i}{\sin \beta_{ли} \cos \chi},$$

где  $\chi$  – угол навала, неизбежно имеющий место и принимаемый равным  $20^\circ$ .

Площадь ограничивающих поверхностей основного и покрывающего дисков принимаются одинаковыми и определяются на средней линии межлопаточного канала в предположении что данная поверхность на плоскости имеет форму трапеции:

$$\bar{S}_{оп} = \bar{l}_л \pi (\bar{D}_1 \tau_1 + \tau_2) / z_{рк},$$

где  $z_{pk}$  – число лопаток РК.

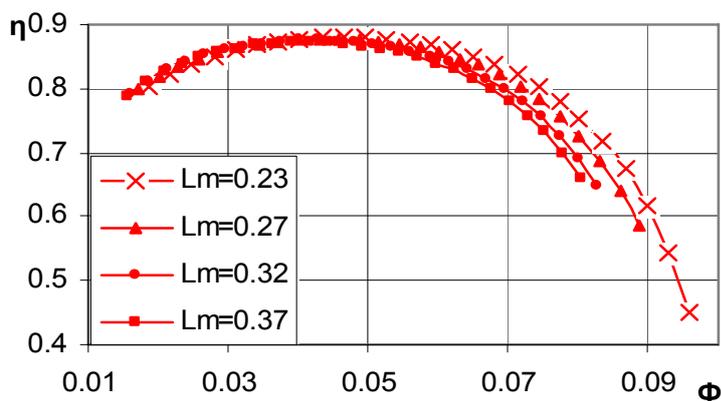


Рис. 1. Влияние осевой протяженностью колеса  $\bar{L}_m$  на КПД промежуточной ступени

изменения повысили точность и достоверность расчетных данных.

Описанные выше уточнения позволили более корректно рассчитывать потери трения на лопатках и ограничивающих поверхностях ОРК и учитывать влияние различных геометрических параметров ОРК на КПД ступени. Пример влияния осевой протяженности колеса на КПД ступени показан на рисунке 1. Рассмотренные

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ [Текст]/Под ред. Ю.Б.Галеркина. С-Пб.: 2010. – 670 с.

Н.С. Клѣхта (аспирант 1 года)

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Научный руководитель – Плешаков И.В., в.н.с. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ ФЕРРИТОВ И НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ И ЯДЕРНУЮ СПИНОВЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАЗЦОВ

Исследования ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в магнитоупорядоченных материалах интенсивно ведутся приблизительно с шестидесятих годов прошлого века [1], и, будучи инструментом, дающим о магнитном состоянии многообразную информацию, постоянно развивается и в настоящее время. Данный вид радиоспектроскопии представляет собой весьма развитую область науки. Прогресс стимулируется появлением новых веществ; в настоящее время к ним преимущественно относятся магнитоупорядоченные наноструктуры, которые часто исследуются с помощью ЯМР. Результаты этой деятельности позволяют утверждать, что ЯМР дает весьма ценную информацию о структуре и свойствах магнетиков, и является одним из важных методов их изучения. Существуют и другие направления радиоспектроскопии

магнитных материалов – известно, например, что посредством ЯМР регистрируются некоторые особенности строения кристаллической решетки. Для последних из упомянутых работ особо важны вопросы, связанные с наблюдением отклика ядерной спиновой системы в доменах и доменных границах, что и в целом представляет собой одну из центральных проблем ЯМР-спектроскопии магнетиков. В их ряду стоит актуальная задача по изучению и детальной интерпретации действия магнитного поля на сигнал ядерного спинового эха, формирующегося в многодоменном поликристаллическом (или дисперсном) материале.

Настоящая работа посвящена изучению нестационарного ЯМР, наблюдаемого в некотором модельном образце, намагничиваемом внешним полем, изучении механизма формирования сигналов ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в доменах и доменных границах магнитоупорядоченного вещества [1], а также разделения этих откликов с помощью импульсного воздействия на ядерную спиновую систему через отклонение электронной намагниченности. При этом предполагалось, что сопоставление статических магнитных характеристик материала с радиоспектроскопическими данными позволит получить адекватную картину возбуждения ядерных спинов в системе электронных магнитных моментов, относящихся как к доменам, так и к доменным границам, что важно для уточнения принципов применения ЯМР к исследованию магнитоупорядоченных веществ. Были построены простые качественные модели обнаруженных в ходе работы эффектов и на их основе предложен новый подход к задаче тестирования ферритов. Первая модель намагничивания поликристаллического образца [2], которая хорошо описывает эксперименты по изучению сигнала ЯМР при одновременном действии постоянного магнитного поля. Эксперименты с действием магнитных видеоимпульсов [3] подтвердили модель, описанную выше, а также стали дополнительным инструментом разделения полного сигнала на сигнал от доменов и доменных границ. Действие видеоимпульса было объяснено на основе оптической аналогии, в которой изохромата (группа спинов, прецессирующих с одинаковой частотой) в фазовом пространстве изображается линией, подобной оптическому лучу. Магнитный импульс малой амплитуды может оказывать влияние только на спины внутри границы через ее смещение. Во время его поступления происходит излом «луча» вследствие изменения частоты прецессии из-за небольшого сдвига доменной границы, т.е. происходит расфокусировка изохромат и уменьшение амплитуды отклика. Характер действия магнитного импульса противоположной полярности легко объясняется тем, что при таком рассмотрении он играет роль корректирующей линзы.

В работе продемонстрировано, что с помощью ядерного магнитного резонанса можно изучать магнитные свойства современных поликристаллических материалов (например, наноструктур). Таким образом, если магнитное строение дисперсного поликристаллического материала исследуется методом ядерного магнитного резонанса, должны быть приняты во внимание результаты данной работы.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. М.П. Петров. Электронно-ядерные взаимодействия. В кн.: Физика магнитных диэлектриков. Изд-во: М. Мир, 1974 г. – 177 – 284 с.
2. И.В. Плешаков, С.И. Голошапов, Ю.И. Кузьмин, А.П. Паугурт, Я.А. Фофанов, В.И. Дудкин, Н.С. Клѣхта, А.И. Явтушенко. Анализ поведения сигнала ядерного спинового эха в намагничиваемом феррите. Научное приборостроение, 2012, том 22, № 3, с. 17–24.
3. И.В. Плешаков, Н.С. Клѣхта, Ю.И. Кузьмин. Исследование действия импульсного магнитного поля на сигнал ядерного спинового эха в феррите. Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып. 18, С. 60–67.

Д.Д. Колосова, аспирант (2 год)

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего  
Профессионального Образования «Санкт-Петербургский Государственный  
Политехнический Университет»

Научный руководитель – Л.М. Молодкина, д.ф.-м.н., профессор

## ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН В ДООЧИСТКЕ СЛОЖНЫХ СТОКОВ

Работа выполнена в лаборатории физико-химических методов анализа каф. гражданского строительства и прикладной экологии (ГС и ПЭ).

Цель настоящей работы заключалась в определении возможности использования трековых мембран для доочистки сложных стоков, в частности, в технологии очистки токсичных нефтесодержащих жидких отходов.

В работе использовали трековые мембраны торговой марки Фолипор (производство ЗАО «НПФ ТреМ», Санкт-Петербург) на основе пленки из полиэтилентерефталата производства компании «MitsubishiPolyesterFilmGroup» (ПЭТ), отдельные исследования выполняли на трековых мембранах, произведенных на основе отечественной биаксиальноориентированной пленки из полиэтилентерефталата производства ООО «Мануфактура Полимерных Пленок» (БОПЭТ).

Исследования проводили на модельных объектах разной степени сложности, а также на реальных сточных водах, прошедших предварительную очистку. В качестве модельных объектов использовали а) дистиллированную воду, б) дисперсии полистирольного латекса с размером частиц, равным 100 нм (стандартный 0,1% коллоидный раствор), и превосходящим 100 нм (коагулированная дисперсия из первоначальных частиц размером 80 нм), в) водопроводную воду. Реальные сложные стоки были представлены: а) биологически очищенными бытовыми сточными водами (БОБСВ) от отдельно стоящих зданий (жилых домов и коттеджей), предоставленными ООО «Гидрокомплект», б) жидкими отходами из карты полигона токсичных отходов,

прошедшими модульную очистку. В качестве коагулянтов в работе использовали водный раствор хлорида железа (III) ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и водный раствор оксихлорида алюминия торговой марки АКВА-АУРАТ (Аква-Ауратм10 с массовой долей  $\text{Al}_2\text{O}_3(10 \pm 0,6)\%$ ).

Исходные воды и фильтраты анализировали методами спектрофотометрии и спектротурбидиметрии (спектрофотометр СФ – 56, ООО «ЛОМО-Спектр», Санкт-Петербург), поточной ультрамикроскопии (установка с лазерным источником света и с цифровой насадкой на микроскоп, НПФ «ЭВС» Санкт-Петербург), спектрофлуориметрии («Флуорат-02-Панорама» производства ООО «Люмэкс», Санкт-Петербург), для определения распределения частиц по размерам использовали лазерный анализатор Zetatrac, «MicrotracInc.», США (зарегистрированный в Госреестре средств измерений под № 44541-10 и допущенный к применению в РФ).

В работе экспериментально продемонстрировано, что трековые мембраны на основе ПЭТ и БОПЭТ обладают близкими свойствами, обеспечивающими одинаковые значения производительности процессе фильтрации и степени очистки модельных и реальных систем, следовательно, в производстве трековых мембран импортные пленки могут быть заменены на отечественные. На рис. 1 представлены зависимости производительности процесса фильтрации от давления для дистиллированной воды (рис. 1а) и биологически очищенных бытовых сточных вод (БОБСВ) (рис. 1б). Проанализированные зависимости производительности процесса фильтрации и степени очистки реальных сточных вод от размера пор мембран в тупиковом и тангенциальном режимах свидетельствуют о принципиальной возможности использования трековых мембран с диаметром пор 0,2 – 0,4 мкм для доочистки биологически очищенных бытовых сточных вод от отдельно стоящих сооружений (домов или группы зданий).

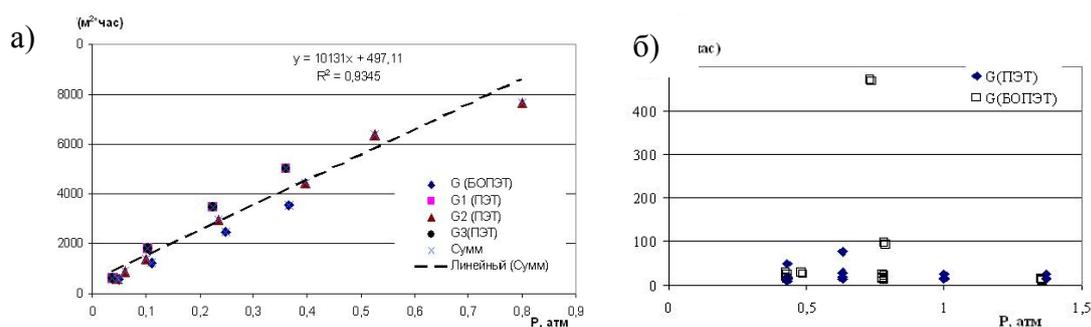


Рис. 1. Зависимости удельной производительности процесса фильтрации дистиллированной воды (а) и биологически очищенной сточной воды (б) от давления в тупиковом режиме на трековых мембранах, полученных из полимерных пленок ПЭТ и БОПЭТ

В работе обоснована предпочтительность использования трековой мембраны с диаметром пор 0,2 мкм для очистки сточных вод из пруда-отстойника полигона хранения токсичных жидких отходов.

На рис. 2 представлены примеры полученных на анализаторе Zetatrac распределений по размерам примесных частиц воды из пруда-отстойника полигона хранения токсичных отходов и фильтрата после трековой мембраны с диаметром пор 0,2 мкм; концентрационные индексы соответственно равнялись 0,1054 и 0,00005.

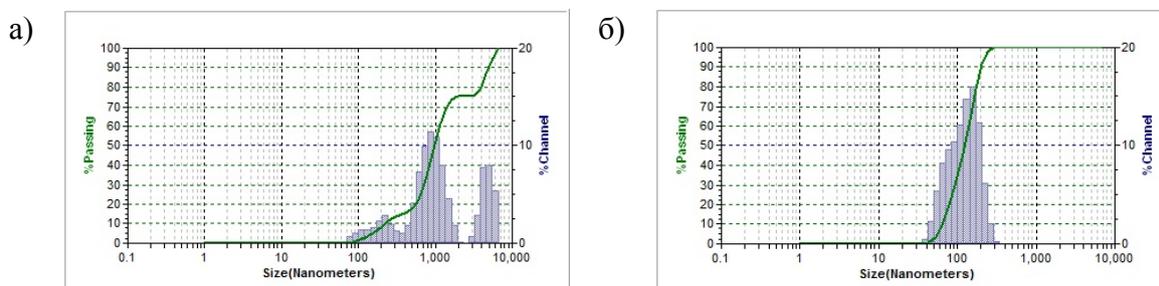


Рис. 2. Распределения взвешенных примесей по размерам в воде из пруда-отстойника полигона токсичных жидких отходов (а), в той же воде после фильтрации через мембрану с диаметром пор 0,2 мкм (б)

Проведено сравнение действия на токсичные нефтесодержащие сточные воды из пруда-отстойника полигона их хранения разных концентраций двух коагулянтов – хлорида железа (III) и оксихлорида алюминия. Пробы исходной воды (из пруда-отстойника полигона хранения токсичных жидких отходов) характеризовались отрицательными значениями  $E_h$  (от  $-300$  до  $-100$  мВ). В работе произведено сравнение эффективности воздействия двух коагулянтов на исходную воду с  $E_h < -100$  мВ и на ту же воду,  $E_h$  которой доведен до положительных значений. В целом в воде с положительным  $E_h$  при использовании оксихлорида алюминия процесс коагуляции протекал значительно быстрее, чем в воде с отрицательным  $E_h$ , а также при применении хлорида железа.

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрирована возможность использования трековых мембран в очистке и доочистке сложных стоков. Обоснован выбор типа и концентрации коагулянта. Показана целесообразность коррекции  $E_h$  воды для эффективного течения процесса коагуляции, продемонстрировано преимущество оксихлорида алюминия.

О.С. Комарова (аспирант 3-го года обучения)  
ФБГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
Научный руководитель – В.Э. Гасумянц, д.ф.-м.н., профессор кафедры ФППиНЭ  
СПбГПУ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В РСМ- МАТЕРИАЛЕ СОСТАВА $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$

Материалы, меняющие свое агрегатное состояние (phase change material, РСМ) – на данный момент наиболее перспективные материалы для увеличения объема энергонезависимой памяти [1]. РСМ-материалы – это вещества, которые могут существовать как минимум в двух состояниях – аморфной и кристаллических фазах. Первые предложения по использованию этих материалов в практических целях были сделаны еще более 40 лет назад [2], однако интерес к материалам сильно возрос именно в последние годы, после открытия 1987 г. быстро переключающихся РСМ-материалов на основе твердых растворов в ряду  $\text{GeTe} - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  [3].

РСМ-материалы уже были успешно использованы для создания перезаписываемых DVD-дисков и Blu-ray дисков [4], а также прототипа многослойной ячейки памяти, основанного на эффекте переключения в материале  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  [5]. Однако в настоящее время не существует надежной и воспроизводимой технологии для создания структур на основе РСМ-материалов. Кроме того, остается нерешенным вопрос о способах воздействия на синтезируемые материалы, позволяющих достичь их оптимальных, с точки зрения практического применения, параметров. Главная причина сложившейся ситуации – отсутствие надежных и общепризнанных данных о фундаментальных свойствах и параметрах системы носителей заряда в этих материалах. Поэтому проведение систематических фундаментальных исследований различных свойств РСМ-соединений, в частности электронных явлений переноса, является чрезвычайно актуальным для достижения прогресса в области практических применений этих материалов.

Для работы были выбраны образцы  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  в аморфном и кристаллическом состояниях, выращенные на подложке  $\text{Si/SiO}_2$ . Толщина исследованных образцов  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  составляла 30, 60, 600 нм; образцы разной толщины были использованы для определения зависимости температуры кристаллизации от толщины исследуемого материала. Ранее было показано, что данная зависимость весьма слабая при толщинах  $> 10$  нм [1].

Были проведены локальные исследования поверхности образцов  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  различной толщины и находящихся в различном фазовом состоянии с помощью атомарно-силового микроскопа. Для образцов минимальной толщины (30 нм) профиль поверхности становится менее гладким, что говорит о том, что в этом случае на качестве изготовленных образцов начинает сказываться влияние подложка.

Полученные данные показывают, что поверхность всех исследованных образцов имеет зернистую структуру, при этом размеры зерен колеблются в целом в диапазоне от 10 до 40 нм. Для образцов кристаллической фазы характерно наличие несколько более однородного распределения размера зерен, чем для образцов аморфной фазы. В то же время, поверхность всех полученных образцов является достаточно гладкой – разброс по высоте не превышает 6-7 нм. При этом в кристаллической фазе этот разброс меньше, чем в аморфной, для образцов всех исследованных толщин (см. рис. 1).

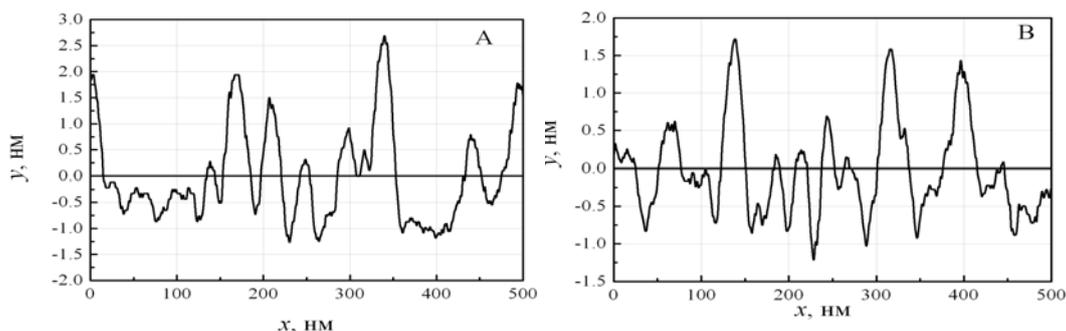


Рис. 1 Профили поверхности образцов  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  толщиной 600 нм, находящихся в аморфном (А) и кристаллическом (В) состояниях

На образцах  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  различных фаз толщиной 60 нм были измерены температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента термоэдс в диапазоне температур  $T=77-300$  К. Измерения температурных зависимостей удельного сопротивления на образцах  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  происходило по методу ван дер Пау [6], это позволяет решать проблему произвольной формы образца. Определение значений коэффициента термоэдс,  $S$ , проводились на постоянном токе по дифференциальной методике относительно медных электродов.

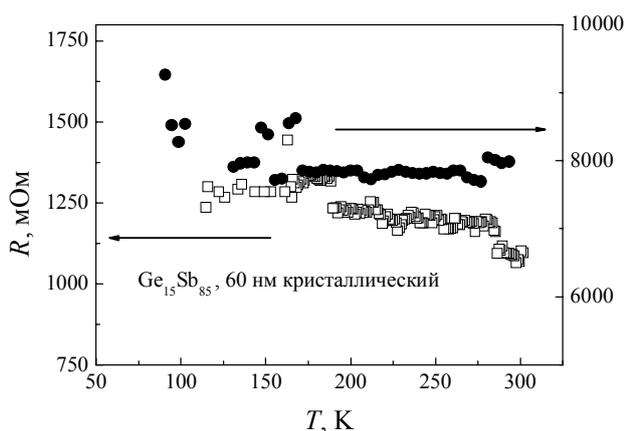


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления, измеренного по методу Ван дер Пау, для образца кристаллической фазы  $\text{Ge}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}$  толщиной 60 нм

Обнаружено, что для образцов кристаллической фазы характерны практически неизменные при уменьшении температуры значения удельного сопротивления (см. рис. 2), в то время как в аморфном состоянии наблюдается их резкий рост при уменьшении температуры по близкому к экспоненциальному закону. При этом абсолютные значения удельного сопротивления для образцов аморфной фазы на 4-5 порядков выше, чем для кристаллических. Полученные значения удельного сопротивления по измеренного методу Ван дер Пау при комнатной

температуре для образца толщиной 60 нм, находящегося в кристаллическом состоянии, составляют:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= 29,8 \text{ мкОм} \cdot \text{см}, \\ \rho_2 &= 217,4 \text{ мкОм} \cdot \text{см},\end{aligned}$$

Рассчитанное из этих величин реальное значение удельного сопротивления:  $\rho_{\text{real}} = 92,7 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ .

Коэффициент термоэдс в кристаллической фазе имеет крайне низкие значения и демонстрирует линейное падение при уменьшении температуры. В аморфном состоянии наблюдается сложная температурная зависимость коэффициента термоэдс, при этом его характерные значения при комнатной температуре составляют  $\approx 15 \text{ мВ/К}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. S. Raoux, W. Wefnic, D. Ielmini. Chem. Rev., 2010, vol. 110, №1, pp. 240-267.
2. S.R. Ovshinsky. Phys. Rev. Lett., 1968, vol. 22, pp.1450-1453.
3. N. Yamada, E. Ohno, N. Akahira, et al. Jap. J. of Appl. Phys., 1987, vol. 26-4, pp. 61-66.
4. M. Wuttig, N. Yamada. Nature materials, 2007, vol. 6, pp. 824-832
5. Y. C. Chen. In Phase Change Materials: Science and Applications, ed. S Raoux, M Wuttig. 2008, pp. 331-354
6. L. J. van der Pauw. Philips Res. Rep., 1958, vol. 13, № 1, pp. 1-9.

В.В. Курц (аспирантка, 1 курс)

ФБГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
 Научный руководитель – И.Е. Ануфриев, к.ф.-м.н., доцент, СПбГПУ,  
 физико-механический факультет, кафедра «Прикладная математика»

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАФИКА В ГОРОДСКИХ И ЗАГОРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

В работе проведен анализ существующих моделей для моделирования автомобильного трафика, как на микро, так и на макроуровне. В качестве оптимальной микромодели выбрана модифицированная модель «разумного водителя», предложенная в работе [1]. Ускорение  $n$ -го автомобиля является непрерывной функцией его скорости  $v_n$ , дистанции до лидера  $s_n$  и скорости относительно лидера  $\Delta v_n = v_{n+1} - v_n$  и описывается обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\dot{v}_n = \alpha a \left( 1 - \left( \frac{v_n}{v_n^0} \right)^\delta \right) + (1 - \alpha) a \left( 1 - \left( \frac{d^*}{h_n} \right)^2 \right). \quad \text{Дистанция } d^* \text{ является дистанцией в}$$

установившемся потоке, дается выражением  $d^*(v) = d + Tv + cv^2$  и зависит от времени реакции водителя и качества дорожного покрытия.

В качестве макромоделей выбрана модель, описанная в статье [2]. В данной работе предложена модификация этой модели, которая позволяет моделировать транспортный поток сразу на нескольких соседних полосах. Уравнение, описывающее плотность потока, имеет вид:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(q_4(\rho)) = 0$ , где  $q_4(\rho)$  является полиномом

четвертой степени и представляется собой зависимость пропускной способности от плотности потока. Макромодель для многополосного движения позволит моделировать трафик в больших по площади районах при сохранении прежнего расчетного времени. Численная схема представляет собой следующую рекуррентную

формулу:  $\rho_i^{n+1} = \frac{1}{2}(\rho_{i-1}^n + \rho_{i+1}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} [q_4(\rho_{i+1}^n) - q_4(\rho_{i-1}^n)]$ ,  $i = 1, \dots, M$ ;  $j = 0, \dots, N-1$ . В данной

работе получены условия устойчивости для используемой численной схемы –

$$\max \left| \frac{\partial q_4}{\partial \rho} \right| \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1.$$

Предпринята попытка совместного использования моделей макро и микроуровня. Это позволит повысить размерность решаемых задач при сохранении расчетного времени. Отдельной задачей совместного использования обоих типов моделей является корректная их стыковка. При переходе от микро к макро моделированию необходимо корректно ставить граничные условия для начально краевой задачи в области стыковки моделей. При переходе от макро к микро моделированию необходимо корректно создавать транспортные средства исходя из значений плотности потока в области стыковки областей, где используются микро и макро модели.

В данной работе предложена методика создания моделей микроуровня со специальным поведением. Этот результат является продвижением в области агентного моделирования объектов (динамических систем), наделенных искусственным интеллектом. Кроме того, данный результат также имеет самостоятельное техническое значение, поскольку данные модели могут быть использованы в компьютерных тренажерах для обучения вождению или в тренажерах спецслужб.

В работе предложена методика для настройки параметрических моделей с целью обеспечения реалистичной динамики автомобиля, которая основана на приближении данных по динамике конкретного автомобиля решением дифференциального уравнения микроскопической модели трафика [3]. Для настройки модели формулируется задача оптимизации целевой квадратичной функции ошибки с ограничениями, порождаемыми схемой численного интегрирования и полученными условиями устойчивости. При настройке учитываются технические характеристики автомобиля, погодные условия и качество дорожного покрытия, а также ограничения на параметры модели, которые гарантируют ее локальную устойчивость.

Предложена модель перестроения и безопасного проезда перекрестков. Описана структура данных, разработанная в работе [1], которая позволяет моделировать автомобильный трафик в произвольных районах, как городских, так и загородных.

В среде визуального программирования *Simulink/MATLAB* с использованием *StateFlow* реализованы алгоритмы управления транспортными потоками – управление локально на перекрестке, магистральное управление, алгоритм предоставления приоритета общественному транспорту.

Создано приложение (и продолжает развиваться в настоящее время), которое моделирует трафик в городских и загородных условиях, с реалистичной 3D визуализацией и содержит в себе алгоритмы управления транспортными потоками.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Курц, В.В. Математическое моделирование автомобильного трафика в транспортных тренажерах. Магистерская диссертация. – 2012. – 79 с.
2. Gani, M.O. A finite difference scheme for a fluid dynamic traffic flow model appended with two-point boundary condition [Text] / M.O. Gani, M.M. Hossain, L.S. Andallah // Journal of Bangladesh Mathematical Society. – 2011. – Vol. 31. – P. 43–52.
3. Li, Z.F. Parameter estimation of ordinary differential equations [Text] / Z. F. Li, M. R. Osborne, T. Prvan // IMA Journal of Numerical Analysis. – 2005. – Vol. 25. – P. 264–285.

Ю.А. Мирошникова (аспирант)

ФБГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель – И.Г. Кудряшева, к.т.н., доц.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КАПИТАЛИЗАЦИИ СИСТЕМНЫХ УСЛУГ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТ ДЛЯ ГАЭС

Анализ энергетических стратегий Украины и России года показал, что тенденция увеличения мощностей энергосистем за счет сектора атомной генерации будет продолжаться. Данный сценарий развития невозможен без строительства новых высокоманевренных электростанций, которые будут обеспечивать регулирование и бесперебойную работу энергосистемы с низкими затратами на эксплуатацию и минимальным влиянием на окружающую среду. К таким объектам относятся ГЭС и ГАЭС. Гидроагрегаты способны в очень короткие сроки (от 30 секунд до 3 минут) включаться в работу, участвовать в первичном и вторичном регулировании и резервировании мощности, компенсировать ночные провалы и дневные пики графика нагрузки, снижая степень его неравномерности, тем самым улучшая параметры работы всех элементов энергосистемы [1].

Строительство гидроэнергетических объектов – капиталоемкий процесс. Поэтому особую актуальность в рыночных условиях приобретает вопрос эффективности капиталовложений в строительство данного типа станций. И, если дифференциация тарифа на электроэнергию и мощность на различные ценовые зоны графика нагрузки, частично решают данную проблему для ГЭС, то для гидроаккумулирующих станций требуется более тщательный подход к оценке затрат, которые несет станция в процессе работы, и системного эффекта, полученного в результате функционирования ГАЭС.

Современные нормы и методики тарифообразования для ГАЭС, как в России, так и в Украине, не учитывают системного эффекта от оказания станциями услуг энергосистеме по регулированию и резервированию, поскольку отсутствует единая нормативная база для определения их стоимости и размеров оплаты за них. Тариф рассчитывается без учета затрат, которые понесла станция в ходе оказания той или иной системной услуги. В рамках исследований по оптимизации режимов работы ГАЭС автором была предложена методика, позволяющая:

- определить величину затрат станции за оказание услуг СК, вращающегося и не вращающегося резервов;
- оценить величину системного эффекта от сглаживания графика нагрузки системы;
- рассчитать величину тарифа для ГАЭС, учитывающего все аспекты работы станции;
- определить оптимальный режим работы станции в энергосистеме.

В ходе апробации данной методики в рамках ОЭС Украины были получены следующие результаты:

- работа одного агрегата (420-324 МВт – НР-ТР) влияет на работу тепловых станций, как показано на рис. 1;
- в результате работы ГАЭС уменьшение затрат на ремонты и обслуживание тепловых станций составят 13,1 млн. USD/год, снижение потребления топлива на тепловых электростанциях – 806 тыс. т.у.т., что приводит к существенной экономии средств, в размере 650 млн. USD/год. Кроме этого снижение выбросов CO<sub>2</sub> составит ориентировочно 2,2 млн.т/год, что оценивается в 15,5 млн. USD/год;
- величина тарифа, рассчитанного в соответствии с разработанной методикой, возрастает на 50-60%, превышает результаты оценок, проводившихся ранее для ГАЭС [2]. Несмотря на увеличение тарифа, гидроаккумулирующие станции остаются конкурентоспособным поставщиком электроэнергии, мощности и системных услуг в энергосистеме;
- увеличение тарифа за счет надбавок за оказание системных услуг позволяет уменьшить срок окупаемости не менее чем в полтора раза, значительно улучшить остальные показатели эффективности гидроаккумулирующей станции;

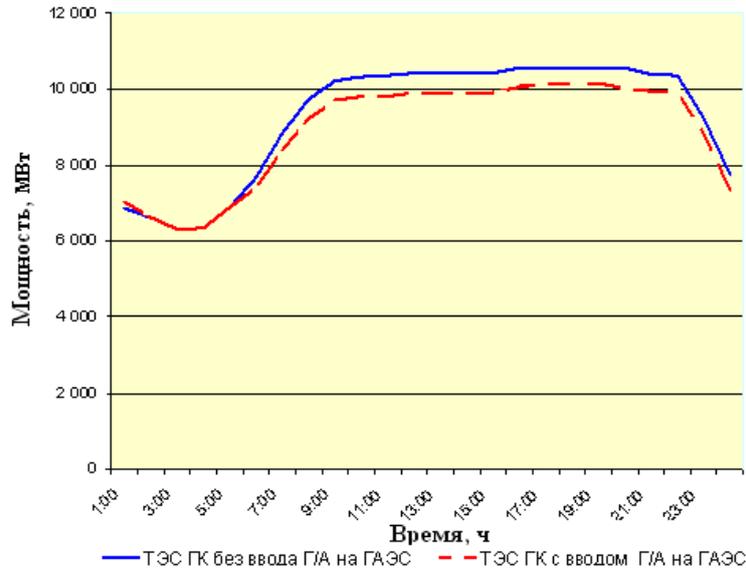


Рис. 1. Влияние работы ГАЭС на суточную нагрузку ТЭС

- расчеты показали, что в системах с низкими тарифами на услугу невращающегося резерва, наиболее оптимальным режимом работы станции в новых тарифных условиях является стандартный режим работы ГАЭС – использование 100% мощностей для сглаживания графика нагрузки энергосистемы. Для энергосистем с высокими тарифами на услугу невращающегося резерва, позволяющими покрыть упущенную прибыль от замещения мощностями гидроаккумулирующей станции агрегатов ТЭС, ГАЭС выгоднее всего заключать контракты на участие в работе невращающегося резерва.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Энергетическая стратегия Украины до 2030 года.
2. Фельдман Б.Н. Гидроаккумулирующие электростанции – актуальность и перспективы // Междунар. конф. «Использование нетрадиционных и возобновляемых видов энергии и способы ее хранения». 16.11.2004 г. М. «ЦТС» при МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005. С.82-83.

Ю.Н. Нагурянская, аспирант (1-й год обучения)  
ФБГОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт  
(Технический Университет), кафедра общей химической технологии и катализа.  
Научный руководитель – Постнов А.Ю., к.т.н., доцент кафедры ОХТ и катализа,  
ФБГОУ ВПО СПбГИ (ТУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА КАТАЛИЗАТОРОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЯХ

В настоящее время наблюдается тенденция перехода химической промышленности от крупнотоннажного производства некоторых продуктов к их малотоннажному производству. Микрокаталитические системы открывают широкие перспективы в области химических технологий. Одной из таких систем является микрореактор, который состоит из трех базовых составляющих: корпус, микрокаталитические пластины и закрепленный на них катализатор. Катализаторы на металлических носителях обладают высокой механической прочностью и теплопроводностью, принимают любую конструкционную форму, а также перспективны для процессов с большим тепловым эффектом. Блочные и пластинчатые катализаторы, входящие в состав микрореакторов представляют собой металлический носитель, на поверхности которого адгезионно закреплен пористый слой оксидного композита, выполняющего каталитически активные функции. Технология таких катализаторов включает активирование поверхности сплава (травление, оксидирование) и нанесение суспензии на металлические носители сплава X15Ю5. В ходе исследований пластины сплава гофрировали под разными углами, обезжировали и подвергали химическому травлению в растворах концентрированных азотной и соляной кислот, взятых в соотношениях 1:3 и при температуре 20°C. Параметры травления соответствовали требованиям, характерным для коррозионных сталей. После травления, образцы промывали в дистиллированной воде. Для получения на поверхности пластин оксидной пленки образцы далее подвергали оксидированию в муфельной печи при 600°C в течение 5,5 ч. Суспензию готовили из реактивного диоксида циркония, тонкодиспергированного  $\gamma$  -  $Al_2O_3$  и псевдобемита из соотношения 50 ( $ZrO_2$ ) : 50 ( $Al_2O_3$ ) путем механохимического активирования в течение 3-6 ч. Методом окунания пластин в суспензию были нанесены 1-2 слоя с промежуточной сушкой (110 °C, 3ч.) и прокаливанием (600 °C, 2ч.). Прочность сцепления композита с оксидированной пленкой оценивали по потере массы пластин при механическом воздействии. При травлении смесью растворов кислот наблюдали уменьшение массы образцов (10-11 масс.%, табл. 1), вызванное удалением из структуры сплавов катионов железа и алюминия и увеличением шероховатости поверхности металлических носителей.

Очевидно, что при проведении операции кислотного травления необходимо решать задачу максимального развития рельефа поверхности при сохранении прочностных свойств стали. Установлено, что с увеличением времени травления от 0,15 до 0,5 ч. возрастает шероховатость, но уменьшается прочность. Поэтому для нанесения тонкослойного каталитического покрытия в дальнейшем использовали пластины с временем травления 0,25ч.

Таблица 1. Динамика изменения массы пластин в процессе травления и оксидирования.

№ образца	Исходные, (г)	После травления		После оксидирования	
		г	%	г	%
2	0,98	0,87	10,5	0,88	0,3
3	1,15	1,03	10,2	1,04	0,4
12	1,02	0,91	11,1	0,90	0,3
14	1,02	0,91	10,4	0,92	0,1
15	1,11	0,98	11,1	0,99	0,6

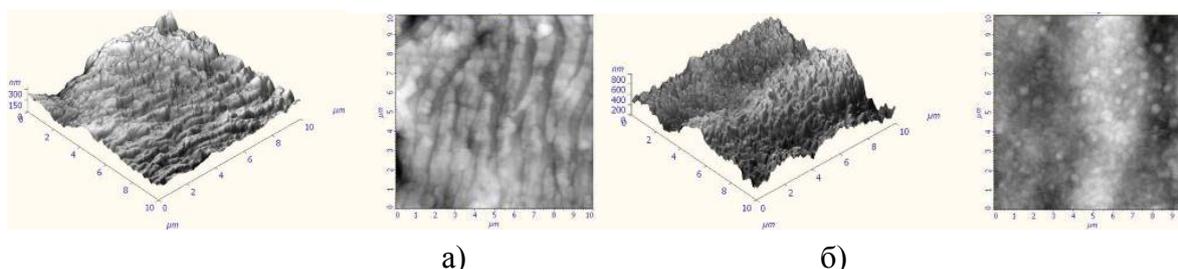


Рис. 1. Фотографии СЗМ пластин из сплава X15Ю5 до (а) и после (б) оксидирования при 900 °С в течение 15 ч (x 10000)

При оксидировании существенно изменяется рельеф и текстура поверхности металла: узкие хребты спекается в протяженные агломераты шириной 4  $\mu\text{m}$  с множеством квазисферических глобул диаметром 0,2–0,3  $\mu\text{m}$ , создающих регулярную структуру (см. рис. 1).

По результатам нанесения суспензии после механохимической активации в течение 3 и 6 часов (табл. 2), можно сделать вывод, что наибольшая масса композита, закрепленного на гофрированных пластинах, наблюдается у образцов № 2;14;16;19. При этом потери массы у этих образцов практически равны. Формирование толщины композита определяется свойствами суспензии и количеством нанесенных слоев, что подтверждается микроскопическими исследованиями. Так как максимальный привес наблюдается у образцов, полученных из суспензии – 3 ч (обр. № 2,14) и 6 ч (обр. № 16,19), то они и являются перспективными для дальнейшего применения при изготовлении блочных и пластинчатых катализаторов.

Таблица 2. Изменение массы пластин после нанесения суспензии после механохимической активации.

№ образца	Один слой		Два слоя		Потери	
	г	%	г	%	г	%
Механохимическая активация – 3ч, $S_{уд}=105 \text{ м}^2/\text{Г}$						
2	0,94	7,0	1,01	15,6	1,01	0,7
9	0,93	6,8	1,01	15,0	1,01	0,9
14	0,96	6,0	1,04	14,0	1,03	0,8
Механохимическая активация – 6ч, $S_{уд}=115 \text{ м}^2/\text{Г}$						
16	0,91	4,8	0,97	12,6	0,97	0,7
19	1,07	5,1	1,14	12,5	1,13	0,8
23	0,95	5,0	1,01	12,0	1,01	0,5

А.Г. Никифоров (аспирант, 2 курс)

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
 Научный руководитель – А.Н. Чусов, к.т.н., заведующий кафедрой «Гражданское строительство и прикладная экология», ИСФ, СПбПУ

## РАЗРАБОТКА ПРИБОРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОЧИЩЕННЫХ ВОД

Переработка жидких токсичных органических и минеральных отходов в России сопряжена с рядом экологических проблем. К примеру, нефтяной комплекс России включает 148 тыс. нефтяных скважин, 48,3 тыс. км магистральных нефтепроводов, 34 нефтеперерабатывающих завода общей мощностью более 300 млн т/год нефти. При этом ежегодно в стране образуются сотни миллионов тонн токсичных органических и минеральных отходов.

Необходимым условием очистки нефтесодержащих высокотоксичных жидких отходов является контроль очищенных вод перед их сбросом в канализационную сеть.

Цель данной работы – это разработка приборного комплекса для мониторинга состояния очищенных вод, полученных в результате обработки нефтесодержащих отходов. Мониторинг технологического процесса водоочистки предполагается проводить путем определения физико-химических характеристик очищаемой воды, их анализа и выдачи заключения об эффективности процесса.

Очистка нефтесодержащих высокотоксичных жидких отходов происходит в несколько этапов:

- выделение нефтяной фракции;

- доочистка нефтесодержащих высокотоксичных вод от остаточных нефтепродуктов и остаточных оседающих примесей;
- доочистка воды от взвешенных примесей;
- доочистка воды от растворённых загрязнений.

При проведении исследования состава нефтесодержащих высокотоксичных жидких отходов в лаборатории кафедры «Гражданское строительство и прикладная экология» выявлены следующие группы показателей для технологического контроля:

- показатели, характеризующие органические примеси;
- показатели, характеризующие растворимые ионы;
- показатели, характеризующие взвешенные примеси.

В данной работе углубленно рассмотрены вопросы, связанные с контролем содержания органических примесей воды.

Для контроля эффективности очистки высокотоксичных вод предлагается использовать метод флуориметрии, который является достаточно экспрессным и информативным, чтобы оперативно контролировать и управлять эффективностью очистки.

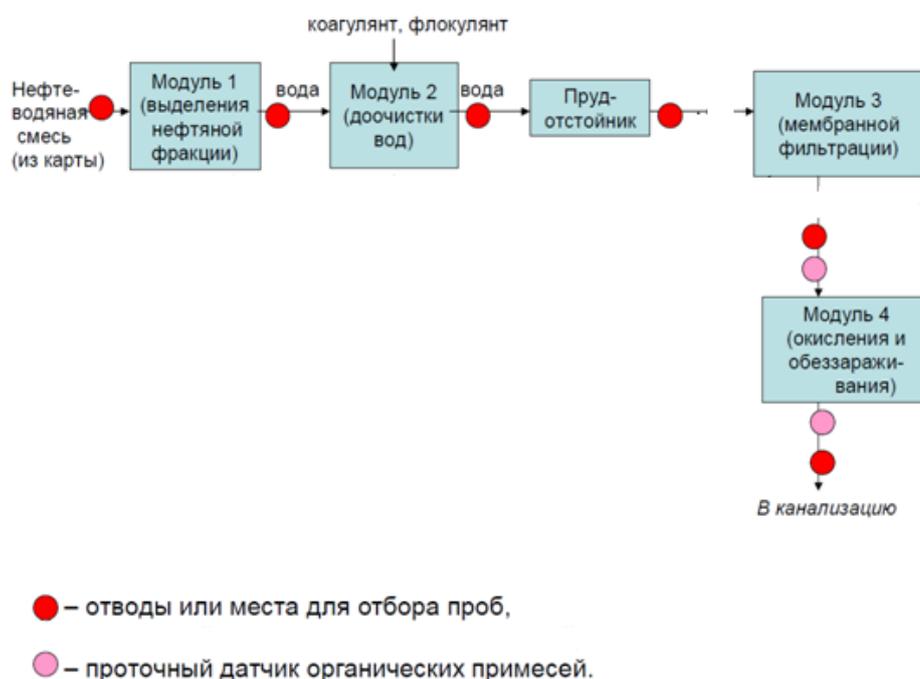


Рис. 1. Расположение точек контроля качества очищаемой воды

Для обоснования выбора параметров (длин волн) для проточных флуориметрических датчиков для контроля очистки водной фракции отходов, полученной после обработки в модулях 1 и 2, получены и проанализированы спектры оптической плотности и спектры флуоресценции для проб воды, прошедшей очистку на макетной установке.

В результате проведения исследований, при выборе длин волн для флуориметрического контроля сточной воды рекомендуется выбирать длину волны регистрации гуминовой полосы, то есть около 440 нм. Выбор длины волны возбуждения определяется техническими возможностями прибора.

В результате работы предложен метод экспресс-контроля качества воды (флуоресценция), а также точки отбора проб для лабораторного исследования. Минимальное количество точек контроля приведено на рис. 1.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. A.N. Chusov, L.M. Molodkina, M.Ju. Andrianova, D.D., Kolosova, M.P. Fedorov / Development of technology for liquid hazardous waste treatment – in Proceedings of 3rd International Conference on Industrial and Hazardous Wastes Management – Greece, Crete, Xania, September 11-15.
2. Гришаева Т.И. Методы люминесцентного анализа. НПО «Профессионал», СПб, 2003, 226с.

В.А. Павлов (аспирант, каф. КИТвП)

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Научный руководитель – А.В. Щукин, к.т.н., доц. каф. КИТвП

### ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОКАЗУЕМОСТИ В АКСИОМАТИЧЕСКИХ ТЕОРИЯХ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

Целью данной работы является исследование методов автоматического доказательства теорем (АДТ) в логике предикатов первого порядка для выявления потенциальных возможностей и перспективных направлений по улучшению эффективности современных средств АДТ, а также применение выбранных методов на практике для создания системы логического вывода.

Автоматическое доказательство теорем связано с проблемами доказательства математических теорем машинными методами. Начиная со второй половины XX века, когда автоматическое доказательство теорем сформировалось как научное направление, в этой области были достигнуты значительные результаты. Было разработано несколько мощных методов АДТ, с их помощью удалось доказать ряд математических гипотез, которые до этого долгие годы не удавалось ни подтвердить, ни опровергнуть. Примером может служить доказательство гипотезы Роббинса при помощи программы EQR в 1996 году [1]. Гипотеза была сформулирована ещё в 1933 году, но доказать или опровергнуть её не удавалось, несмотря на напряжённую работу нескольких выдающихся математиков (Герберта Роббинса, Эдварда Хантингтона, Альфреда Тарского). В настоящее время системы АДТ успешно применяются для

решения не только научных, но и практических задач во многих областях: фундаментальная математика, создание и проверка программного обеспечения, проверка аппаратного обеспечения, разработка экспертных систем и т.д. Вопросы построения доказательств компьютерными методами широко изучаются учёными в крупнейших исследовательских институтах мира.

На первом этапе работы был проведён анализ современного состояния области автоматического доказательства теорем. Результаты анализа показали, что используемый в существующих системах АДТ математический аппарат не отличается большим разнообразием: для построения логических выводов большинство программ АДТ в логике первого порядка используют различные модификации метода резолюций. Такая популярность метода резолюций объясняется его относительной эффективностью и простотой реализации. Однако метод имеет и свои недостатки, связанные с резким снижением скорости работы на сложных формулах (так называемый эффект «экспоненциального взрыва»). Ещё одним важным ограничением метода резолюций является область его применения, ограниченная логикой высказываний и логикой предикатов первого порядка. Для других логических исчислений метод резолюций в чистом виде не подходит. Поэтому для решения наиболее интересных и сложных задач возможностей метода резолюций и использующих его систем автоматического доказательства теорем оказывается недостаточно.

На втором этапе исследований был проведён обзор существующих алгоритмов АДТ с целью выделения наиболее перспективных методов, способных составить альтернативу методу резолюций. В результате для более глубокого исследования был выбран обратный метод С. Ю. Маслова. Этот метод в силу ряда причин не получил такого широкого признания, как метод резолюций, поэтому на данный момент остаётся недостаточно изученным. Тем не менее, обратный метод заключает в себе большой потенциал, а также имеет ряд важных преимуществ по сравнению с методом резолюций [2].

- Применим к более широкому классу логических исчислений.
- Может использоваться в качестве теоретического аппарата для исследования вопросов выводимости целых классов формул.
- Использует информацию из доказываемой формулы для более эффективной организации её вывода.
- Использует гибкие тактики поиска вывода.

Теоретические оценки [3] подтверждают, что обратный метод Маслова для логики первого порядка является не менее эффективным, чем метод резолюций. Проверка этого утверждения на практике затрудняется тем, что на данный момент не имеется ни одной законченной программной реализации обратного метода для логики первого порядка.

Для логики высказываний был проведён эксперимент по сравнению скорости работы двух указанных методов, подтвердивший наличие большого потенциала у обратного метода.

На третьем этапе работы была разработана программа автоматического логического вывода для логики предикатов первого порядка. В программе реализован модуль доказательства теорем логики предикатов методом резолюций. Удалось вплотную подойти к созданию аналогичного модуля для обратного метода Маслова. Разработана библиотека классов для работы с формулами логики предикатов первого порядка, которая:

- Содержит классы для удобной обработки и преобразования формул, позволяющие разработчику системы АЛВ абстрагироваться от текстового представления формул.
- Позволяет подключать в виде модулей различные методы логического вывода.
- Позволяет расширять логический язык добавлением новых логических операторов.
- Является переносимой, может использоваться при разработке других систем АЛВ.

Применяемые в существующих системах АЛВ аппараты обработки формул имеют ряд ограничений: изначально интегрированы в программу АЛВ и не могут использоваться как самостоятельные библиотеки, ориентированы на специфику метода резолюций. Созданная в рамках данной работы библиотека выгодно отличается тем, что имеет большую степень универсальности и является полностью независимой от какой-либо системы АЛВ.

Результаты работы могут быть использованы для дальнейших исследований в области АДТ. Разработанная библиотека может в дальнейшем расширяться и применяться при разработке программ АДТ, а также в других сферах, связанных с использованием аппарата математической логики. Планируется развитие достигнутых результатов и использование разработанной программы на практике для решения одной из прикладных задач АДТ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. W. McCune. "Solution of the Robbins Problem", JAR 19(3), 263-276 (1997).
2. С. Ю. Маслов. «Обратный метод установления выводимости для логических исчислений», Логические и логико-математические исчисления. I, Тр. МИАН СССР, 98, 1968, с. 26–87.
3. С. Ю. Маслов, «Связь между тактиками обратного метода и метода резолюций», Исследования по конструктивной математике и математической логике. III, Зап. научн. сем. ЛОМИ, 16, Изд-во «Наука», Ленинград. отд., 1969, с. 137–146.

4. В.А. Павлов, В.Г. Пак. «Сравнение эффективности методов автоматического доказательства теорем». XXXIX международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2011, с. 62-65.

О.В. Смирнова (аспирант)

ФБГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
Научный руководитель – Т.Т. Каверзнева, к.т.н., доцент, преподаватель кафедры БЖД

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ НА УСЛОВИЯ ТРУДА НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ

Уровень производственного травматизма в России на сегодняшний день в первую очередь определяется уровнем технологического процесса производства. Согласно ежегодному отчету Государственной инспекции труда строительство занимает второе место среди показателей распределения количества несчастных случаев на производстве [1].

Как правило, при оценке условий труда на строительной площадке анализируют такие параметры, как факторы трудового процесса (тяжесть и напряженность труда), факторы производственной среды (микроклимат, световая среда, виброакустические факторы, неионизирующие электромагнитные поля и излучения и другие) и травмоопасность. Наряду с этим интересно предложить иной подход, в котором применяемое производственное оборудование является важным параметром, а его износ основополагающим фактором при оценке его на условия труда.

На строительной площадке оборудование можно разделить на то, которое проходит ежедневное техническое освидетельствование (подъемные краны, экскаваторы) и работающее до износа (электрорубанок, перфоратор, лобзикопила и др.). Главный вопрос исследования – оценить влияние износа оборудования на условия труда с целью снижения риска возникновения несчастного случая.

Незначительные технические несовершенства, приобретенные оборудованием во время его срока службы, как правило, не имеют приоритетности. Тем самым возникающие опасные и вредные производственные факторы влекут за собой отклонение от гигиенических норм факторов трудового процесса, за счет чего падает производительность труда, снижается личностная мотивация рабочих на качественное выполнение работы.

Существует три основных вида износа: физический, функциональный, экономический износ, главным из которых можно выделить физический [2].

Физический износ представляет собой нормальный эксплуатационный износ строительного оборудования и является результатом прошлых периодов функционирования, воздействия окружающей среды и длительных простоев.

Следствием физического износа являются: ухудшение технических характеристик оборудования (увеличение брака в производстве, риск возникновения серьезных аварий, неспособность машин и оборудования удовлетворять требованиям правильного функционирования), увеличение вероятности возникновения поломок и аварий (снижение производительности труда, рост производственного травматизма), уменьшение остаточного срока службы объекта (оборудования) в целом или некоторых его узлов и деталей.

Все вышеперечисленные причины и следствия являются взаимосвязанными между собой, поэтому физический износ оборудования в большой степени влияет на рост производственного травматизма и условия труда.

В ходе работы была разработана таблица, основанная на методе анкетирования, в которой учитывается влияние износа используемого оборудования типовыми профессиями строительной отрасли в связи со всеми характеристиками, влияющими на условия труда: факторы трудового процесса, факторы производственной среды и травмоопасность. Методом анкетирования произведена наглядная оценка существенного воздействия износа оборудования на условия труда (табл. 1).

Таблица 1 является лишь примерным наглядным изображением таблицы, разработанной в работе.

В соответствии с составленной таблицей были сделаны следующие выводы. Износ оборудования оказывает существенное влияние на условия труда. Основными поражающими факторами для типичных профессий строительной отрасли являются: электрический ток, аэрозоли преимущественно фиброгенного действия, виброакустические параметры (шум, вибрация), микроклимат (в связи со спецификой деятельности строительной отрасли). Следствием комплексного влияния перечисленных факторов и длительности выполняемой работы является повышенная травмоопасность рабочего персонала, влекущая за собой неизбежность возникновения производственного травматизма и профессиональных заболеваний.

В ходе исследования было установлено, что наряду с общепринятыми факторами, влияющими на условия труда, износ оборудования занимает важное место. Особенно тщательно необходимо подойти к вопросу применения ручного инструмента и предоставить возможность оценки работоспособности инструмента непосредственно самим рабочим. Целесообразно на практике применять метод анкетирования, представленный в моей работе, который за рубежом является неотъемлемым и играет важную роль в формировании условий труда на производстве.

Оценка износа оборудования — неотъемлемая часть оценки условий труда на производстве. Необходимо качественно подходить к выбору рабочего инструмента, поскольку безопасный труд — залог личностной мотивации рабочего на конечный результат, что и является для работодателя основной целью.

Таблица 1 — Влияние изношенного оборудования на условия труда на строительной площадке.

№	Профессия	Оборудование	Факторы трудового процесса	Факторы производственной среды						Травмоопасность											
				Напряженность труда	Тяжесть	Микроклимат	Ионизирующие излучения	Неионизирующие электромагнитные поля и излучения	Физические		Химические	Биологические									
1	Монтажник	устройство для снятия изоляции с провода; тестер напряжения								+			+								
2	...	...																			

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Федеральная служба по труду и занятости. О состоянии производственного травматизма в организациях и на предприятиях, расположенных на территории Санкт-Петербурга, по итогам надзорно-контрольной деятельности Государственной инспекции труда в городе Санкт-Петербурге в 2010 г.
2. Асаул А.Н. Оценка стоимости машин и оборудования: учебное пособие / Под ред. А.Н. Асаула, В. Н. Старинский. – СПб.: Гуманистика, 2005. – 208 с.

А.В. Чернова (аспирант, каф. ВИЭГ)

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Научный руководитель – Елистратов В.В., д.т.н., проф., зав. каф. ВИЭГ, СПбГПУ

## МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ВЭС-ГЭС С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Одним из приоритетных стратегических ориентиров Государственной энергетической политики, заложенных Энергетической стратегией России на период до 2030 года, является создание условий для расширения производства электрической и тепловой энергии на основе возобновляемых источников энергии и формирование долгосрочной политики развития возобновляемых источников энергии, учитывающей структуру и тенденции изменения прогнозного топливно-энергетического баланса.

Работа связана с поисками закономерностей прихода случайно-детерминированных источников возобновляемой энергии – ветровой и гидравлической – и обоснованием объединения ГЭС и ВЭС в единый энергокомплекс для обеспечения устойчивого и качественного энергоснабжения потребителей. Актуальность работы определяется широким внедрением ветроэлектрических станций (ВЭС) в мире, мощность которых к настоящему времени достигла 215 ГВт (август 2011) [3].

Использование ветровой энергии сопряжено с трудностями, обусловленными недостатками этого вида возобновляющихся источников энергии, такими как низкие удельные значения потенциала, зависимость скорости ветра от метеорологических, климатических и топографических условий, изменчивость скорости ветра во времени, порывистость, что сказывается на качестве получаемой энергии. Таким образом, режим работы агрегатов и выработка энергии на ВЭС носит вероятностный характер и для того, чтобы использовать энергию ветра в режиме, удобном человеку, необходимо создание резервной и аккумулирующей систем. Наиболее эффективным способом аккумулирования энергии ветра является использование водохранилищ ГЭС, которые в отличие от других существующих систем обладают достаточной ёмкостью для запасания и длительного хранения всей электроэнергии, вырабатываемой ВЭС. Наличие у ГЭС водохранилища годичного или многолетнего регулирования позволяет обеспечить работу ветроагрегатов с максимальной выработкой [2].

Целью работы является разработка методики обоснования параметров энергокомплекса ВЭС-ГЭС с учётом влияния климатических факторов.

Вопросы обоснования параметров энергокомплекса ВЭС – ГЭС в основном сводятся к определению следующих величин:

- возможной выработки ВЭС по известным климатическим и метеорологическим характеристикам;
- объёма воды в водохранилище, который может быть саккумулирован за счет работы ВЭС в этот период;

- расчётного промежутка времени, в течение которого по условиям эксплуатации может быть сработан накопленный объём;
- требуемого компенсационного объема воды в водохранилище и мощности ГЭС в случае недообеспечения потребителя электроэнергией за счёт ВЭС.



Рис. 1. Алгоритм реализации методики обоснования параметров энергокомплекса ВЭС-ГЭС с учётом влияния климатических факторов

Методика обоснования параметров энергокомплекса ВЭС-ГЭС с учётом влияния климатических факторов включает следующие этапы (см. рис. 1):

1. Анализ существующего состояния энергосистемы рассматриваемого региона и оценка целесообразности проектирования энергетического объекта.
2. Анализ ресурсов ветровой и гидравлической энергии с построением карты-схемы распределения природного ветро- и гидро-потенциала с использованием современных геоинформационных систем (ГИС-систем) и выявление наиболее перспективных для проектирования энергокомплекса территорий.
3. Поиск закономерностей поступления ветровой и гидравлической энергии, оценка коррелятивных связей выше указанных источников энергии в рассматриваемом регионе.
4. Определение параметров энергокомплекса путём выполнения водно- и ветро-энергетических расчётов. При обосновании параметров энергокомплекса последовательность их выбора следующая: в первую очередь определяются технико-экономические и водно-энергетические параметры ГЭС, затем в зависимости от аккумулирующей способности водохранилища назначаются параметры ВЭС.
5. Оценка экономической эффективности проекта.

В будущем результаты работы могут быть использованы при проектировании вновь вводимых объектов электроэнергетики, а также для проектирования ВЭС в составе энергокомплексов с существующими ГЭС в различных регионах России.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования / М.И. Бальзанников, В.В. Елистратов. – Самара: ООО «Офорт»; Самарский госуд. арх. – строит. университет, 2008. – 331 с.
2. База данных по гидрологическому режиму р. Мезень (предоставлена ФГБУ «Государственный гидрологический институт»).
3. Half-year Report 2011 (World Wind Energy Association).
4. Стратегия социально-экономического развития Архангельской области до 2030 года.

В.Г. Шрам (аспирант, 3-й курс)

ФГАО ВПО Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа  
Научный руководитель – Б.И. Ковальский, д.т.н., профессор «Топливообеспечение и  
горюче-смазочные материалы»

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ЗА СЧЕТ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Введение.** Смазочный материал, как элемент трибосистемы, существенно влияет на надежность всей системы, поэтому для него должно быть научно обоснованно предельное состояние. Однако установленный ресурс масел по пробегу и наработке не всегда объективно характеризует их состояние т.к. в этом случае не учитываются индивидуальные условия и режимы эксплуатации техники, ее техническое состояние, система доливов и т.д. [1].

Температурная стойкость смазочных материалов является одной из основных характеристик сопряжений деталей машин, работающих в условиях граничной смазки, и характеризует способность смазочных слоев разделять и защищать поверхности при интенсивном тепловом воздействии [2]. Однако существующие методики оценки температурной стойкости при граничном трении не учитывают влияние продуктов деструкции на процессы, протекающие на фрикционном контакте. Кроме того, практически отсутствуют методы и критерии оценки текущих значений изменения противоизносных свойств и их прогнозирование в период эксплуатации техники из-за многообразия эксплуатационных факторов, влияющих на механизм старения и процессов, протекающих в самом смазочном масле. В итоге информация, предоставляемая производителями нефтепродуктов, разработчикам новой техники и эксплуатационникам недостаточна для принятия обоснованного решения по их выбору для машин и механизмов различной степени нагруженности.

Для исследования выбраны товарные моторные масла на минеральной основе М-8Г<sub>2К</sub>, частично синтетической ТНК Супер 5W-40 SL/CF и синтетической ESSO Ultron 5W-40 SL/CF.

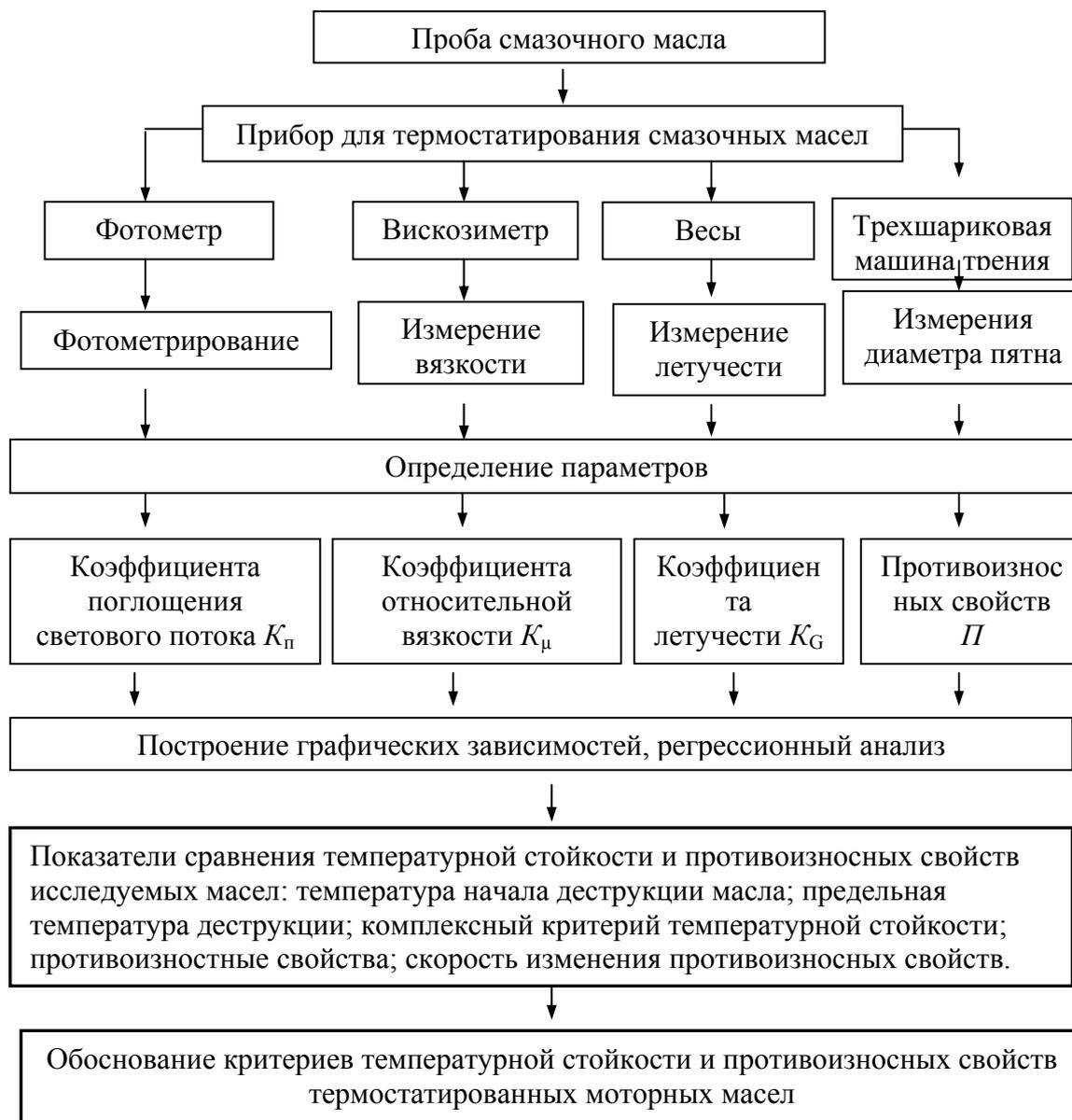


Рис. 1 – Схема комплексного метода исследования температурной стойкости и совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства смазочных масел

Методика исследования смазочных масел, включает испытания на температурную стойкость и противоизносные свойства [3] представлена в виде схемы на рис. 1. Методика определения температурной стойкости заключается в следующем. Пробу масла массой  $80 \pm 0,1$  г в течение 8 часов термостатируют в диапазоне температур от 140 до 300 °С с интервалом в 10 °С. При каждой температуре испытывают новую

пробу масла. После каждого испытания, производят взвешивание термостатированной пробы и определяют летучесть масел, измеряют оптическую плотность, при толщинах фотометрируемого слоя 8 и 2 мм, и вязкость.

Пробу термостарованного масла испытывают в течение двух часов на трехшариковой машине трения со схемой трения «шар-цилиндр» с параметрами: нагрузка 13, 23 и 33 Н, скорость скольжения 0,68 м/с, температура масла в объеме 80 °С. Противоизносные свойства масел определялись по среднеарифметическому значению диаметра пятна износа на трех шарах. Комплексная оценка температурной стойкости смазочных масел проводилась по коэффициенту поглощения светового потока, относительной вязкости и летучести, а совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки по противоизносным свойствам. Комплексная оценка температурной стойкости смазочных масел проводилась по коэффициенту поглощения светового потока, относительной вязкости и летучести, а совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки по противоизносным свойствам.

Вывод: разработаны технологии определения температурной стойкости смазочных масел, совместного влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства, предложения по совершенствованию системы классификации и контролю смазочных масел, позволят повысить эффективность использования смазочных масел, а в конечном итоге надежность работы машин и механизмов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Моторные масла. Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В. Шергалис. Москва-СПб.: Альфа-Лаб, 2000. – 272 с.
2. Р.М. Матвеевский «Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов». – М.: Наука. 1971. 227 с.
3. Шрам В.Г. Исследование влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства минерального моторного масла М-8Г<sub>2К</sub> / В.Г. Шрам, Б. И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов и др. – Вестник КузГТУ. – Кузбасс. №5 (86). 2012. С 57-64.

## **РАБОТЫ ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ПРОЕКТ МОЛОДОГО УЧЕНОГО»**

М.В. Коробчук (ст. преп.), Н.А. Дедов (студент 6 курса)  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
Научный руководитель – А.Н. Веригин, д.т.н., профессор, заведующий каф.  
МиАХП СПбГТИ(ТУ)

### **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **Реферат**

Работа посвящена исследованию возможности реализации и использования эффекта нелинейных колебаний в вибрационных установках. Актуальность работы обусловлена тем, что предложенный способ организации процесса позволяет добиться более высокого качества обрабатываемых смесей тонкодисперсных материалов. Математическая модель, предлагаемая для описания движения подвижной части вибрационной машины, позволяет осуществлять моделирование режима работы по основным параметрам, характеризующим систему.

Преимуществами предложенного способа является сочетание высокой эффективности, низкой стоимости изготовления установки и возможность модернизации уже существующего оборудования.

Особо широкое применение предлагаемый метод организации процесса может найти в производствах, в которых требуется получение однородных смесей на основе тонкодисперсных материалов.

Разработанная конструкция вибрационного смесителя, способна обеспечить высокую степень однородности смешиваемых материалов. Предлагаемая конструкция состоит из рамы, на которой через посредство основных упругих элементов закрепляется вибрационный стол, на который монтируется смесительная емкость.

В состав конструкции рамы входят корпуса ограничителей, в которые монтируются дополнительные упругие элементы, препятствующие движению вибрационного стола вверх. При этом конструктивно предусмотрена возможность регулировки зазора между вибрационным столом и дополнительным упругим элементом.

Описано устройство и рассмотрена математическая модель, описывающая движение его подвижных частей.

Результаты экспериментальных исследований доказывают эффективность разработанного вибрационного смесителя.

На фазовых плоскостях показано, что с помощью предлагаемой математической модели возможно адекватное описание поведения системы.

## ВВЕДЕНИЕ

В наше время на исследование различных типов колебаний затрачиваются значительные средства. Чаще всего задача заключается в выяснении причин возникновения колебаний и в предотвращении их, если это возможно. Но в некоторых случаях, когда колебания желательны, исследования проводятся с целью поиска возможности управления ими.

Вибрационное оборудование используется для проведения самых разнообразных процессов (перемещения, смешивания, рассеивания, прессования и т.д.) на различных стадиях обработки материалов. На сегодняшний день накоплен достаточно обширный опыт проектирования и использования гармонического вибрационного оборудования. Конструктивная простота и высокая технологическая эффективность этого типа аппаратов и машин позволила снискать им заслуженную славу.

Использование вибрационных колебаний, применительно к смешиванию дисперсных материалов известно давно. Смешивание органически присущее дисперсному материалу, подвергаемому вибрации. Вибрационные импульсы вызывают хаотические столкновения частичек материала, разделение их по форме, плотности и размерам, разрушение сложившихся конгломератов, уменьшение трения между частицами. Перемешивание происходит практически в любом процессе, где используется вибрация, однако качественное смешивание получается только в специальных устройствах с целенаправленной вибрацией.

Несмотря на то, что дисперсные материалы перерабатываются в промышленности уже долгие годы, их смешивание и в настоящее время остается одним из самых малоизученных физических процессов. Свой отпечаток накладывает так же и существующая на сегодняшний день в химической промышленности тенденция к использованию тонкодисперсных материалов.

Поскольку качество готового продукта определяется, прежде всего, однородностью свойств и состава по всему объему композиции, то вопрос качества смешивания остается важным и актуальным.

В связи с этим хочется обратить внимание на нелинейные колебания. Исследования в данной области нелинейных колебаний ведутся уже давно. Изначально эти исследования были связаны с нежелательным проявлением эффекта нелинейности колеблющейся системы. В частности, присутствие в механических системах хаотических колебаний затрудняло предсказание времени работоспособности и анализ старения материала (не известна точная зависимость напряжений в материале от времени). Нелинейность вносила неопределенность в работу машины и как следствие непредсказуемость. По мере изучения хаотических колебаний все более ясно становятся видны преимущества их использования на практике.

Итак, данная работа посвящена исследованию возможности использования нелинейных колебаний для смешивания дисперсных материалов и ставит конечной

целью разработку конструкции смесителя и изучение влияния параметров характеризующих динамическую индивидуальность предлагаемой системы на качество композиции при ее обработке.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является исследование возможности реализации эффекта нелинейных колебаний в вибрационных смесителях гармонического типа.

**Научная новизна работы.** Предложен вибрационный способ смешивания тонкодисперсных материалов, реализующий использование эффекта «управляемых» нелинейных колебаний.

Предложено математическое описание поведения динамической системы, позволяющее:

- сделать заключение о характере реализуемых ею колебаний, и как следствие возможность осуществлять моделирование ее работы по ряду параметров;
- проводить оценку поведения динамической системы с возможностью «управления» нелинейностью системы;
- осуществлять прогнозирование поведения динамической системы.

Оценено влияние различных параметров, характеризующих индивидуальность исследуемой системы на качество смеси и даны рекомендации по оптимизации параметров процесса смешивания.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

На сегодняшний день накоплен достаточно обширный опыт проектирования и использования вибрационного оборудования. Однако машины, производящие колебания по гармоническому закону, являются лишь машинами первого приближения. А все более возрастающие требования к качеству продукции требуют поиска новых решений. Именно по этой причине внимание исследователей все в большей мере обращается к улучшению технических характеристик вибрационных машин технологического назначения на основе использования особенностей нелинейных колебаний.

Отход от симметрии упругой характеристики системы приводит к бифуркациям, в результате которых происходит скачкообразное изменение состояния равновесия системы. Отмеченная особенность нелинейных колебаний весьма полезна для практического использования в вибрационной технике.

Если рассматривать поведение системы на примере смешивания, то при наложении гармонических колебаний обрабатываемая смесь приходит в движение, при этом внутри смесительной камеры устанавливается гидродинамический режим, интенсивность которого определяется режимными параметрами. Смешивание осуществляется за счет движения слоев материала относительно друг друга, т.е. в системе возникают течения, в значительной мере зависящие от свойств материала. При

этом преобладает диффузионное смешивание. Картина несколько меняется при режимах работы вблизи резонанса. Помимо диффузионного смешивания возникает еще и интенсивное конвективное смешивание. Эффект от конвективного смешивания становится не столь очевиден если смесь состоит из мелкодисперсных материалов. Это объясняется склонностью ряда веществ к адгезии и когезии. Частично решить проблему при обработке микрогетерогенных высоконаполненных смесей позволяет применение значительно более интенсивных режимов колебаний. Такое решение не всегда может быть оптимальным. Задача получения высококачественных смесей тонкодисперсных материалов требует применения соответствующего оборудования. При эксплуатации такой аппарат должен отвечать предъявляемым требованиям по качеству продукта и проводить смешивание с высокой степенью эффективности и надежности.

Одним из достаточно универсальных в этом смысле аппаратов может стать вибрационный смеситель, реализующий собой возможность использования эффекта нелинейных колебаний. Сложное пространственное движение осциллятора приводит к интенсивному перераспределению компонентов тонкодисперсной композиции по всему объему аппарата. Это проявляется в том, что помимо интенсивной миграции компонентов смеси в пространстве ограниченном смесительной емкостью, сопоставимой по интенсивности становится и миграция компонентов в макро объемах.

Опыта эксплуатации смесительного вибрационного оборудования, в котором реализуется специфический асимметричный режим, на данный момент пока нет. Это связано с рядом сложностей, возникающих на этапе его проектирования. При довольно простой конструктивной реализации идеи использования эффекта нелинейных колебаний возникают сложности при выборе конкретных режимов работы.

По этой причине вопросы, касающиеся проектирования и моделирования поведения системы, имеют актуальность, а их практическое применение позволит расширить как типы эксплуатируемого оборудования, так и области его применения.

Вторая глава посвящена математическому описанию поведения динамической системы, а так же методам и способам оценки реализуемой хаотичности ее поведения. На рисунке 1 представлена расчетная схема исследуемой системы.

Для математического описания были сделаны следующие допущения:

- система имеет одну степень свободы, при этом в качестве обобщенной координаты принимается вертикальное перемещение. Перемещение в горизонтальном направлении считается пренебрежимо малым;

- величина массы, ее распределение, демпфирование и жесткость в системе считается неизменной. Также, на основании свойств упругости считаем, что восстанавливающая сила, действующая между двумя любыми точками системы, всегда пропорциональна величине относительного перемещения этих точек. Во внимание не принимается зависимость жесткости пружины от времени или от амплитуды;

- основные и дополнительные упругие элементы являются безмассовыми;

- трение в системе носит вязкий характер, т.е. сила демпфирования, препятствующая взаимному перемещению двух точек системы, пропорциональна относительной скорости движения этих точек;

- виду отсутствия разработанной реологической модели смеси ее влияние на колебания рабочего органа учитывается как присоединенная масса и дополнительное затухание.

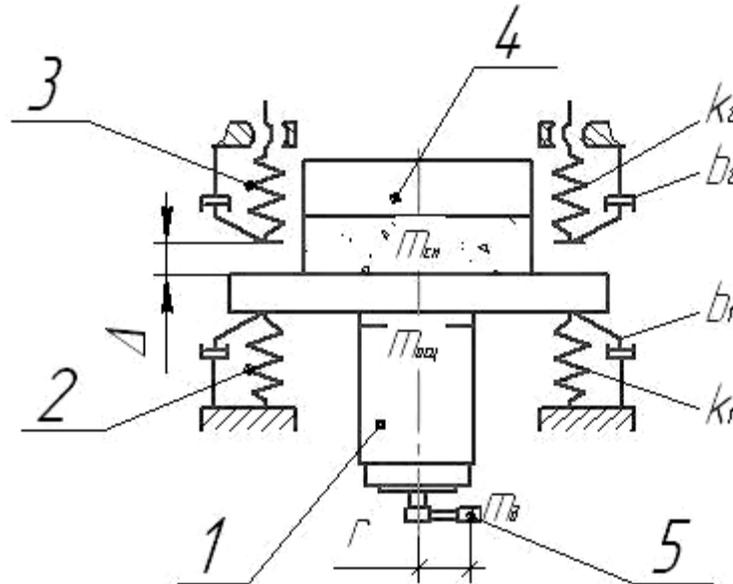


Рис. 1. Расчетная схема:

- 1 – осциллятор; 2 – основной линейный упругий элемент; 3 – упругий ограничитель;  
4 – смесительная емкость со смесью; 5 – инерционный элемент

Поведение системы при вынужденных гармонических колебаниях описывается следующим классическим линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + k_1 x = P \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

В случае введения в состав конструкции упругих ограничителей математический закон описывающий поведение системы запишется в виде системы уравнений:

$$\text{при } x \leq \Delta \quad m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + k_1 x = P \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

$$\text{при } x > \Delta \quad m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + (k_1 + k_2)x + k_2 \Delta = P \sin(\omega t + \varphi)$$

Умножим обе части уравнений (1) и (2) на  $\dot{x}$  и после преобразований перепишем их следующим образом. В случае гармонических колебаний исследуемой динамической системы:

$$\frac{d}{dt} \left( m_0 \frac{\dot{x}}{2} + \frac{k_1}{2} x^2 \right) = -h\dot{x}^2 + P\dot{x} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

Для нелинейных колебаний система уравнений запишется в виде:

$$\text{при } x \leq \Delta \quad \frac{d}{dt} \left( m_0 \frac{\dot{x}}{2} + \frac{k_1}{2} x^2 \right) = -h\dot{x}^2 + P\dot{x} \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

$$\text{при } x > \Delta \quad \frac{d}{dt} \left( m_0 \frac{\dot{x}}{2} + \frac{k_1 + k_2}{2} x^2 + \frac{k_2}{2} \Delta x^2 \right) = -h\dot{x}^2 + P\dot{x} \sin(\omega t + \varphi)$$

Анализируя уравнения для гармонической (3) и нелинейной (4) диссипативной системы можно отметить, что в левой части уравнения находятся члены, представляющие собой потребляемую системой энергию.

Первый член правой части характеризует рассеиваемую при колебаниях, а второй член подводимую для поддержания колебаний в системе энергию. При этом величина диссипации энергии в системе зависит от индивидуальных особенностей колебательной системы, в то время как количество подводимой энергии характеризуется только конструктивными и режимными параметрами работы. Вид второго члена правой части определяется методом подвода энергии, что позволяет говорить об определенной универсальности предлагаемого математического описания. Система уравнений (4) позволяет определить мощность, потребляемую во время работы смесителя.

Моделирование осуществлялось для исследуемого вибрационного лабораторного смесителя, имеющего до модернизации и остающиеся неизменными следующие параметры, характеризующие индивидуальность динамического поведения системы:

масса осциллятора с закрепленной на нем смесительной емкостью, заполненной композицией,  $m = 10,6$  кг;

статический момент массы инерционного элемента  $m d_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  кг·м;

суммарный коэффициент жесткости основных упругих связей  $k_1 = 340\,700$  Н/м;

частота внешнего воздействия 34 Гц.

При математическом описании режима хаотических колебаний дополнительно учитывались и подлежали варьированию следующие параметры:

суммарный коэффициент жесткости упругих ограничителей изменяется в пределах  $k_2 = (1 \div 5) k_1$ ;

зазор между вибрационным столом и упругими ограничителями  $\Delta$  изменяется в пределах  $(0,1 \div 0,9) \Delta$  мм.

Решение дифференциальных уравнений (1) и (2), осуществлялось средствами приближенного анализа, используя численные методы интегрирования. Наиболее подходящим с учетом специфики задачи в данном случае является метод Рунге – Кутты

четвертого порядка точности реализуемый в математическом программном комплексе MathCAD 14.

Для удобства представления результатов и анализа исследуемой системы были введены в рассмотрение следующие безразмерные параметры подлежащие варьированию:  $\nu = \omega_o / \omega$ ,  $K = k_1 / k_2$ ,  $\beta = k_1 \Delta / (m_o r \omega^2)$ ,  $E = E_2 / E_n$ .

В качестве рабочего режима смесителя было признано использовать режим гармонических колебаний, обеспечивающий оптимальное соотношение производительность-качество, после чего в пространстве варьируемых параметров системы была найдена область наиболее оптимальных режимов работы:  $\nu = 0,8 \div 0,95$ ,  $K = 2 \div 3,5$ ,  $\beta = 2,5 \div 3,5$ ,  $E = 0,7 \div 0,8$ .

Оценку поведения системы предлагается осуществлять с помощью построения фазовых портретов (эволюции на фазовой плоскости скорость–перемещение). В случае периодического (гармонического) движения в фазовой плоскости орбиты будут описывать замкнутую кривую, например, эллиптической формы. Тогда как при хаотическом движении орбиты никогда не будут замкнутыми и не повторятся, они будут стремиться заполнить некоторую область фазового пространства.

Имеющимися на практике средствами не представляется возможным с достаточной степенью точности одновременно определить координату точки и ее скорость, поэтому результат удобнее представлять на псевдофазовой плоскости. При этом характер представления ее поведения изменяться не будет и утверждения, позволяющие делать заключение о степени нелинейности системы, сохраняют свою силу.

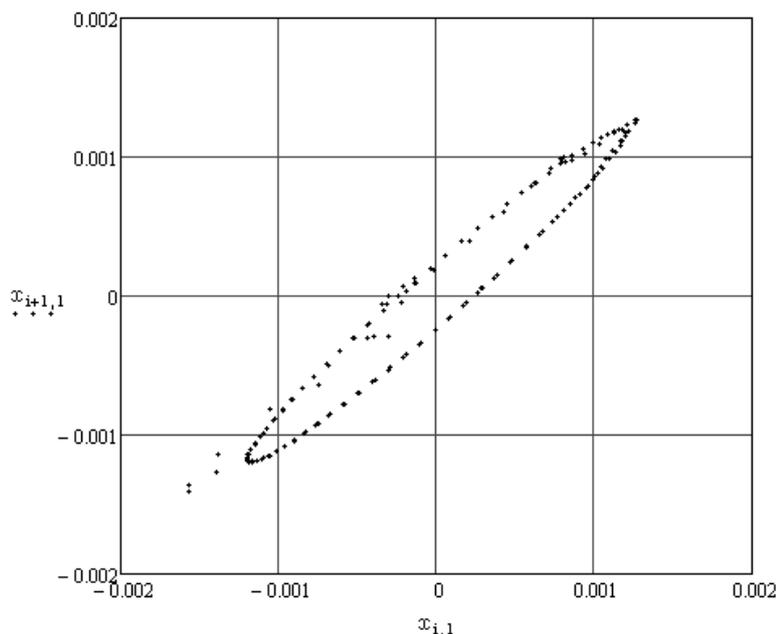


Рис. 2. Отображение Пуанкаре на псевдофазовой плоскости для исследуемого осциллятора, возбуждаемого по гармоническому закону

При дальнейшем анализе в случае реализации нелинейного режима функционирования системы, мы можем столкнуться с тем, что представление результатов на псевдофазовой плоскости все же окажется мало информативным. Для получения более полного представления о динамической эволюции системы будем использовать представления результатов исследования в виде отображение Пуанкаре. О нелинейном движении можно будет говорить, только если отображения Пуанкаре на псевдофазовой плоскости не будет представляться ни конечным набором точек, ни замкнутой траекторией. Ниже приведены примеры отображений Пуанкаре для гармонического режима колебаний (рисунок 2), а также для нелинейного режима (рисунок 3), в случае зазора между ограничителями и осциллятором 0,5 мм.

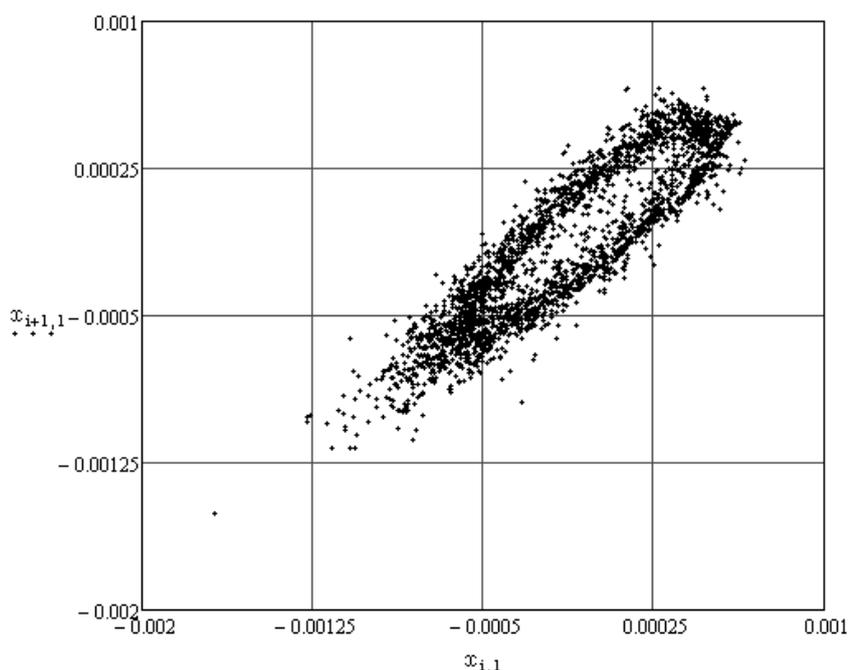


Рис. 3. Отображение Пуанкаре на псевдофазовой плоскости для исследуемого осциллятора:  
 $k_2/k_1=2,4$ ,  $\Delta=0,6 \cdot 10^{-3}$  м

Цель экспериментальной части – оценить принципиальную возможность и целесообразность использования эффекта нелинейных колебаний при приготовлении композиций тонкодисперсных материалов в вибрационных смесителях. В случае положительного результата дать рекомендации по модернизации оборудования для смешения дисперсных компонентов в производствах химической промышленности.

Эксперименты проводились на лабораторном смесителе, в основу работы которого положен принцип использования гармонических круговых колебаний, накладываемых ортогонально вертикальной оси смесительной емкости. Данный аппарат с достаточной для исследования степенью достоверности отражает основные характеристики используемого на предприятиях химической промышленности вибрационных смесителей, являясь, по сути, уменьшенной или близкой к натуре

моделью ряда промышленных образцов. Поэтому результаты экспериментов можно рассматривать в дальнейшем с точки зрения применимости их в промышленности.

Реализация эффекта нелинейных колебаний достигалась путем введения в конструкцию дополнительных ограничивающих упругих связей, имеющих по сравнению с основными связями более жесткую упругую характеристику.

Предлагаемая к использованию конструкция вибрационного смесителя периодического действия, позволяет реализовать работу установки как с использованием гармонических, так и с использованием нелинейных колебаний.

Смеситель состоит (рисунок 4) из рамы 1, которая соединяется с вибрационным столом 2 через посредство упругих элементов 3. К вибрационному столу 2 крепятся стойки 4 с узлом инерционного элемента 5, на котором закреплен электродвигатель 8. Вал электродвигателя соединяется с втулкой инерционного элемента 6.

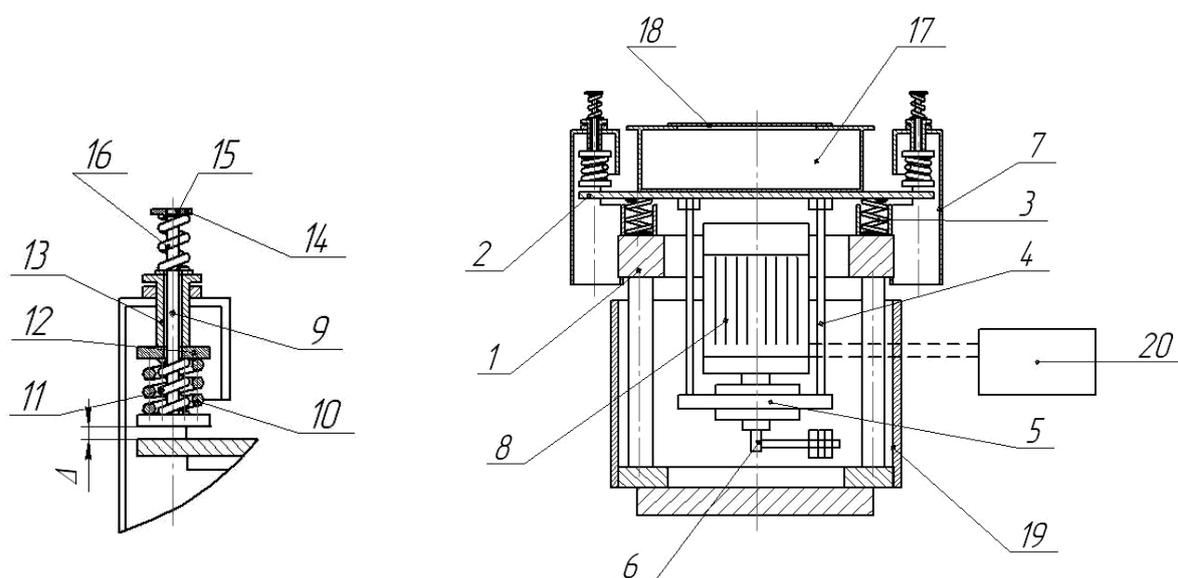


Рис. 4. Вибрационный смеситель

На раме 1 также установлены стойки дополнительных ограничителей 7. Ограничитель представляет собой подвижную конструкцию из штока 9, пружины основной 10, пружины компенсационной 11, фланца пружины 12, направляющей втулки с резьбой 13, чашки 14, сухарей 15 и пружины поджимающей 16. После сборки, конструкция ограничителя позволяет устанавливать его с необходимым зазором  $\Delta$  по отношению к вибрационному столу.

Обработка смеси осуществляется в смесительной емкости 17, закрепляемой на вибрационном столе. Сверху емкость закрывается крышкой 18, конструкция которой позволяет выполнять отбор проб в процессе работы.

Для исключения случайного доступа в зону вращения инерционного элемента в конструкции предусмотрен защитный кожух 19.

Регулировка частоты вращения инерционного элемента осуществляется с помощью преобразователя частоты вращения 20.

Полностью основные технические показатели гармонического и нелинейного вибрационного смесителя сопоставлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические данные смесителя.

Показатель	Режим гармонических колебаний	Режим нелинейных колебаний
1 Характер вибрационного воздействия на смесь	Одночастотный гармонический	Нелинейные (полнечастотные) колебания
2 Диапазон частот вибрационного воздействия на смесь (рабочий режим), Гц	0 – 47 (30 – 36)	0 – 47 (30 – 36)
3 Тип и характеристики электродвигателя (мощность/число оборотов), кВт (об/мин)	АЭ-999 (0,12/3000)	
4 Статический момент массы комплекта дебаланса, кг·м	$m_{дг} = 0,02 \cdot 0,06 = 1,2 \cdot 10^{-3}$	
5 Диапазон частот вращения дебаланса в рабочем режиме, об/мин	1200 – 3000	1800 – 2500
6 Геометрия емкости (диаметр*высота), м Полный объем, м <sup>3</sup>	цилиндрическая (280x150) 0,004	
7 Суммарный коэффициент жесткости упругих элементов, Н/м (количество, шт): -основных -дополнительных	340 700 (6) -	340 700 (6) 841 800 (3)
8 Максимальный коэффициент заполнения емкости	0,5	
9 Масса осциллятора, кг	7,2	
10 Масса смесительной емкости, кг	2	
11 Габаритные размеры, м: длина ширина высота	0,30 0,30 0,45	0,30 0,35 0,50
12 Питание	от сети переменного тока 220–380 В	

В первой части экспериментов работа была направлена на выявление эффективных режимом функционирования установки на гармонических режимах колебаний осциллятора. Целью является выяснение рабочего диапазона значений частоты и амплитуды колебаний для модельной смеси, определение оптимальных значений коэффициента заполнения рабочей камеры. В экспериментах в качестве модельных смешиваемых компонентов использовался речной песок с размером частиц от 100 мкм до 160 мкм и гидрокарбонат натрия (NaHCO<sub>3</sub>) с размером частиц менее 56 мкм. Оба компонента предварительно рассеивались для обеспечения

гарантированного фракционного состава. За ключевой компонент был принят гидрокарбонат натрия.

При выполнении экспериментальной части нас, прежде всего, интересовала зависимость качества смешивания от состава смеси и основных технологических параметров ее приготовления. Поскольку речь идет об обработке результатов экспериментов, в каждый конкретный момент времени нас будет интересовать величина, характеризующая отклонение концентрации в пробах от заданной концентрации. В качестве критерия оценки предлагается использовать среднеквадратичное отклонение или коэффициент вариации:

$$K_{cj} = \frac{1}{c_0} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_{j,i} - c_0)^2}$$

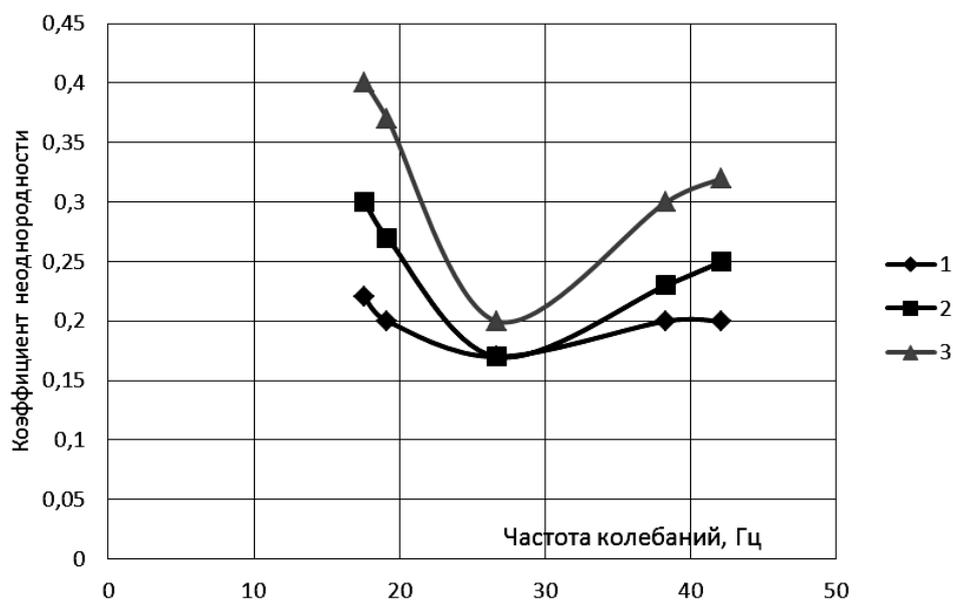


Рис. 5. Изменение коэффициента неоднородности:

1 – коэффициент заполнения 0,3; 2 – коэффициент заполнения 0,5;  
3 – коэффициент заполнения 0,7

Выяснение влияния степени заполнения рабочей камеры смесью на качество композиции осуществлялось при 30% содержании в смеси ключевого компонента. Коэффициент заполнения емкости был принят 0,35. Для выявления оптимальных режимных параметров смешивание осуществлялось на разных частотах возбуждения. По результатам анализа данных были получены графические зависимости, позволяющие обосновать выбор рекомендуемых для дальнейших исследований режимы работы.

Оптимальным для дальнейшего исследования был признан следующий режим обработки модельной смеси: частота 30-36 Гц, амплитуда колебаний (полуразмах) 0,8 мм.

Компромисс «производительность-качество» для готовой композиции (рисунок 5) достигался при коэффициенте заполнения, лежащем в диапазоне от 0,3 до 0,5 (для используемой конструкции смесительной емкости). При значениях коэффициента заполнения выше 0,5 наблюдалось снижение качества готовой смеси.

В случае работы установки при значениях коэффициента заполнения меньше 0,3 существенного улучшения качества смеси не наблюдалось, однако уменьшение объемов загружаемых компонентов приводило к снижению производительности оборудования.

Изучение влияния соотношения смешиваемых компонентов осуществлялось на смесях, в которой содержание ключевого компонента составляло величину 30%, 25% и 20%. Коэффициент заполнения емкости при этом оставался неизменным 0,35. По мере уменьшения содержания ключевого компонента в составе композиции наблюдается снижение ее качества (рисунок 6). Вероятнее всего, это являлось следствием агрегатирования частиц смешиваемых материалов.

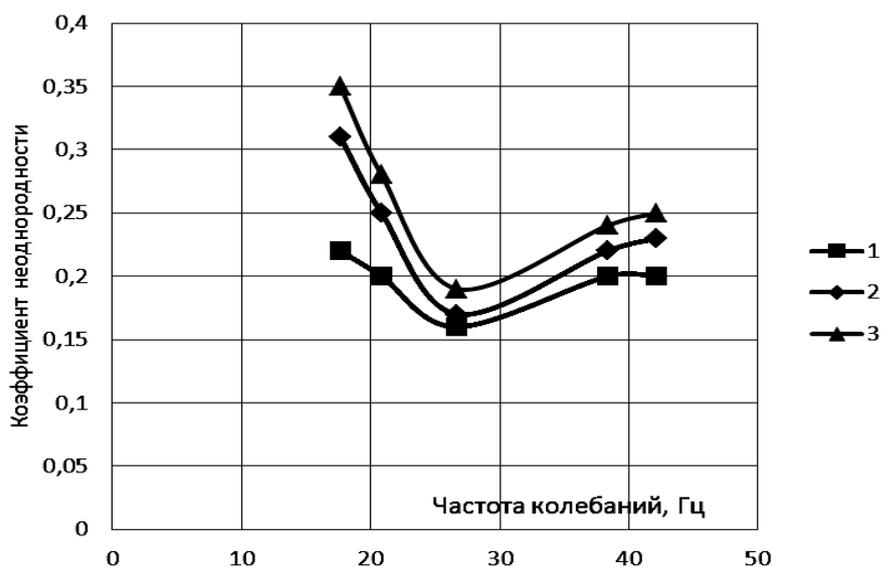


Рис. 6. Изменение коэффициента неоднородности:

- 1 – содержание ключевого компонента 30%; 2 – содержание ключевого компонента 25%;  
3 – содержание ключевого компонента 20%

Во второй части экспериментов оценивался эффект использования нелинейных колебаний по сравнению с гармоническим режимом работы. Однако прежде требовалось оценить насколько верно утверждение, что в смесителе реализуется использование эффекта нелинейных колебаний.

На основании исследования динамики поведения системы при математическом моделировании с учетом результатов полученных в первой части исследования были назначены режимы работы и подобраны необходимые упругие элементы с требуемыми характеристиками. После чего осуществлялась проверка соответствия реализованного на физическом уровне режима работы устройства рассчитанного по модели.

На рисунке 7 представлены зависимости, полученные в результате математического моделирования и после выполнения экспериментов. Параметры, обусловленные индивидуальностью системы, принимали значение:  $K = 2,4$ ,  $\nu = 0,85$ . Эксперименты подтвердили, что оптимальное значение параметра  $\beta$  соответствует рассчитанному по модели и лежит в пределах  $\beta = 2,7 \div 3,5$ .

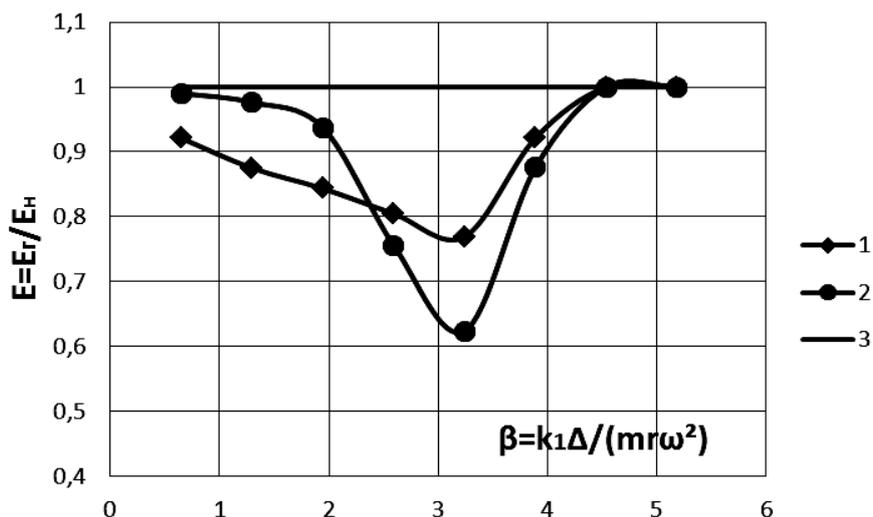


Рис. 7. – Изменение подводимой энергии при работе на нелинейных режимах:

$$K = 2,5, \nu = 0,85:$$

1 – эксперимент; 2 – расчет; 3 – гармонические колебания

Сложность анализа эволюции реальной модели заключалась в том, что имевшимися средствами не представлялось возможным определить скорость подвижных частей устройства для каждого момента времени.

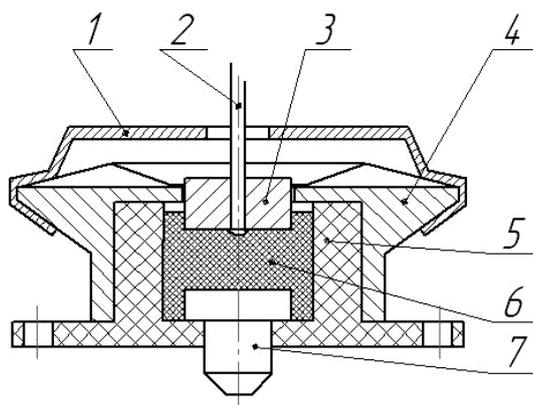


Рис. 8. Устройство преобразования механических колебаний в электрический сигнал:  
1 – крышка; 2 – шток; 3 – диафрагма; 4 – корпус; 5 – изоляционная втулка; 6 – угольный порошок; 7 – контакт

Решение данного вопроса предлагается с помощью представленного ниже устройства (рисунок 8), входящего в состав лабораторного стенда, можно оценить характер колебаний, а оценку динамики проводить методом построения псевдо-фазового портрета. Результат должен будет иметь те же свойства, что и при использовании истинной фазовой плоскости.

Действие устройства для преобразования механических колебаний в электрический сигнал основано на свойстве слоя угольного порошка изменять сопротивление под воздействием внешнего давления. Шток, соединенный с подвижным электродом с одной стороны и с вибрирующей пластиной с другой, приходит в колебательное движение и изменяет плотность угольного порошка. При уплотнении порошка сопротивление между подвижным и неподвижным электродами уменьшается, а при разрыхлении увеличивается. Устройство включается в цепь последовательно с питающим элементом. Изменение сопротивления угольного порошка приводит к появлению пульсирующего тока. Постоянная составляющая этого тока является током питания в состоянии покоя, а его переменная составляющая представляет собой «вибрационный» ток. Снимаемая переменная составляющая (в нашем случае амплитуда модулированного сигнала) позволяет проанализировать и оценить колебания, возникающие в системе.

После обработки и удаления шумов записанных сигналов для гармонических и нелинейных колебаний их можно представить в следующем виде (рисунок 9).

По представленным зависимостям можно сделать вывод о том, что после введения в состав конструкции ограничителей в поведении системы наблюдается неустойчивость поведения, позволяющая утверждать о присутствии хаотического движения.

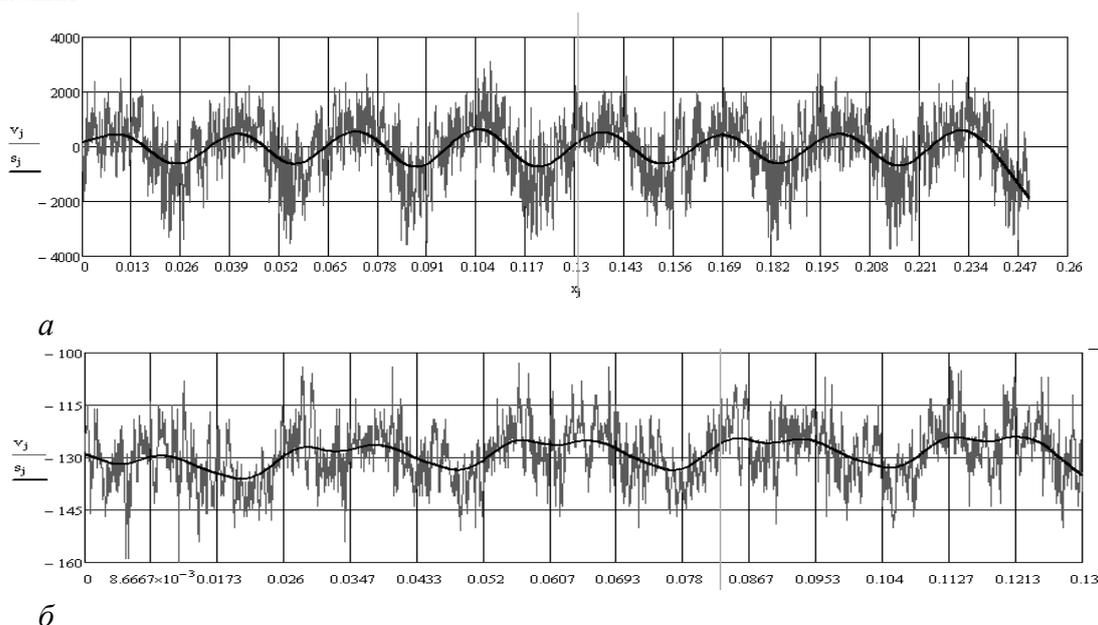


Рис. 9. – Пример записанного и обработанного сигнала:

а – гармонические колебания; б – нелинейные колебания:  $\Delta=0,6 \cdot 10^{-3}$ м,  $k_2/k_1=2,4$

На рисунке 10 представлены результаты по смешиванию компонентов модельной смеси. Смешивание осуществлялось при следующих условиях: частота воздействия 34 Гц, амплитуда колебаний 1 мм, коэффициент заполнения рабочей емкости 0,35, отношение жесткостей ограничителей и основных упругих связей  $k_2/k_1=2,4$ , зазор  $\Delta=0,6 \cdot 10^{-3}$  м.

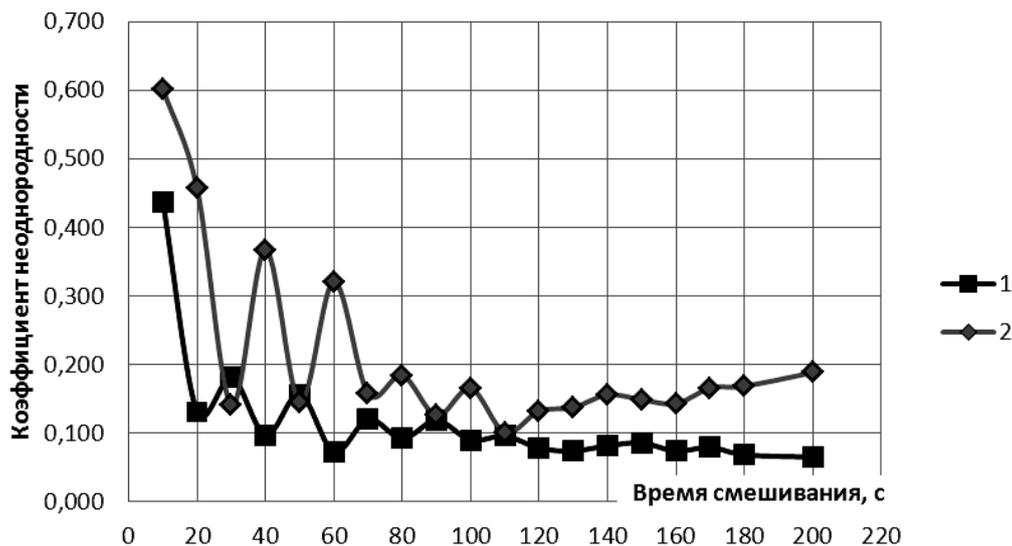


Рис. 10. – Изменение коэффициента неоднородности смеси:  
1 – нелинейные колебания; 2 – гармонические колебания

Реализация нелинейного режима работы смесителя благотворно сказывается на качестве смеси. При общей интенсивности смешивание протекает эффективней при использовании нелинейных колебаний. При этом следует обратить внимание на общую стабильность процесса (устойчивость достигнутого композицией равновесного состояния). Так в случае реализации эффекта нелинейных колебаний она выше, нежели при гармонических режимах работы.

На рисунке 11 представлены графические зависимости изменения коэффициента неоднородности, полученные во время исследования влияния величины зазора на качество получаемой композиции.

Оптимальные значения качества смеси достигались при зазоре 0,6 мм ( $\beta = 3,4$ ). Уменьшение зазора до 0,3 мм снижало стабильность процесса. При увеличении времени протекания смешивания наблюдалась сегрегация компонентов. Уменьшение зазора до 0,1 мм приводило к значительному увеличению времени смешивания до 320 – 350 секунд.

При этом коэффициент неоднородности хоть и вел себя стабильней, нежели при зазоре в 0,3 мм, но так и не достигал возможного при зазоре 0,6 мм значения.

Эксперименты показали, что при соответствующем порядке проектирования, после проведения предварительной настройки оборудования можно добиться

улучшения качества обрабатываемой композиции и повысить эффективность как имеющегося, так и вновь проектируемого оборудования.

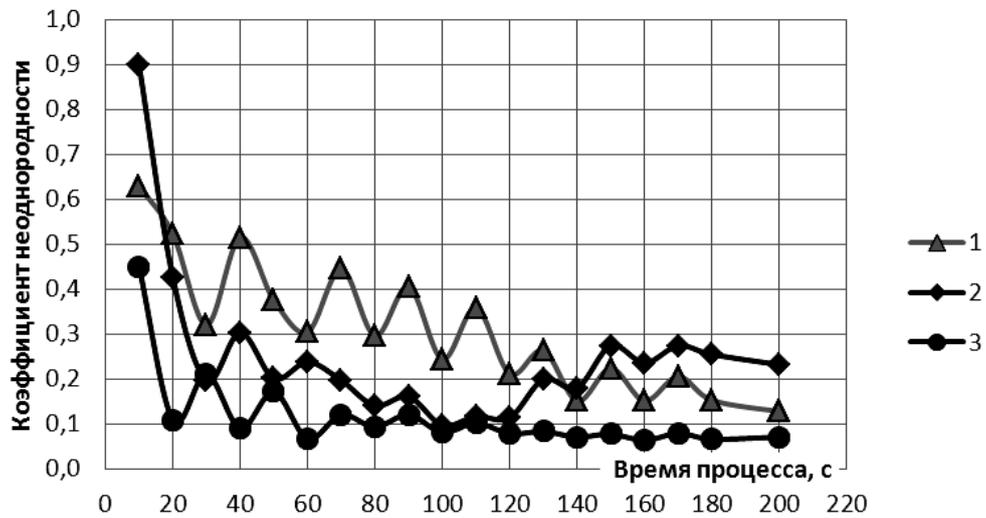


Рис. 11. Изменение коэффициента неоднородности смеси во время смешивания  
1 –  $\beta=0,64$ ; 2 –  $\beta=1,94$ ; 3 –  $\beta=3,4$

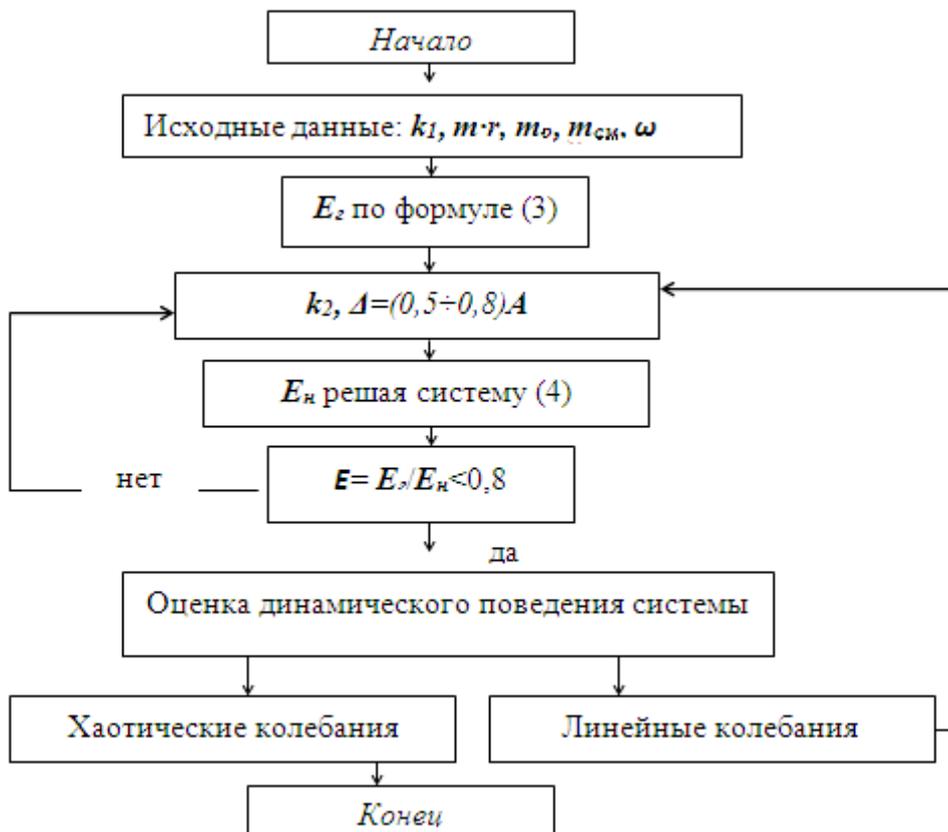


Рис. 12. Методика расчета смесителя

Таким образом, на основании изложенного можно сделать вывод о целесообразности использования эффекта нелинейных колебаний для вибрационного смешивания тонкодисперсных материалов.

На рисунке 12 представлена методика расчета, позволяющая осуществлять предварительный анализ режима работы смесителя на стадии проектирования, а так же в случае модернизации уже эксплуатируемого оборудования.

## ВЫВОДЫ

В результате анализа литературы, научного поиска и проведенных теоретических и экспериментальных исследований по работе можно сделать следующие основные выводы.

1. Предложено математическое описание поведения системы с целью исследования возможности моделирования процесса. При составлении дифференциального уравнения, описывающего движение вибростола устройства (и соответственно материала внутри вибрирующей емкости) учтены основные параметры и динамические характеристики, оказывающие влияние на поведение системы и в совокупности характеризующие ее динамическую индивидуальность.

2. Разработан алгоритм осуществления численного расчета по предложенной модели описания динамики поведения системы, который может быть использован при моделировании поведения вибрационного оборудования разнообразного назначения при его модернизации или проектировании.

3. Показано, что отображения на фазовой плоскости, полученные из математической модели и на основе анализа экспериментальных данных с устройства преобразования механических колебаний, позволяют говорить о возможности проектирования процесса и предсказания поведения системы.

4. Проанализированы режимы работы смесительной установки при различных параметрах и условиях и назначен оптимальный для изучаемой композиции.

5. Изучено влияние эффекта нелинейных колебаний на состояние двухкомпонентной мелкодисперсной композиции. Показано, что по сравнению с гармоническими колебаниями, возбуждаемыми в системе при прочих равных условиях, качество смеси, достигаемое при использовании хаотических колебаний выше, а результат устойчивее. Выявлено влияние ряда параметров характеризующих режим работы на качество смеси.

6. Предложена оригинальная конструкция вибрационного смесителя с нелинейными колебаниями, реализующая возможность гибкого управления режимами работы и подстройки под самый разнообразный состав готовящихся композиций.

Отличительной особенностью предлагаемой конструкции является конструктивная простота, возможность легкой смены смесительной камеры на камеру другой вместимости или формы. Также в предлагаемом смесителе предусмотрена возможность одновременно со смешиванием реализовать проведение других

технологических операций: сушки, нагрева, охлаждения и т.д. При этом не требуется изменять конструкцию всего устройства.

**Практическая значимость.** Разработан и впервые предложен к использованию оригинальный метод смешивания тонкодисперсных материалов, особенность которого заключается в использовании эффекта нелинейных колебаний.

Экспериментально исследована эффективность лабораторного оборудования при гармоническом и нелинейном режиме работы для смешивания тонкодисперсных материалов.

Предложен к применению смеситель с инерционным возбуждением колебаний, реализующий в своей конструкции возможность эксплуатации, как на гармоническом режиме, так и на режиме с использованием эффекта нелинейных колебаний, позволяющий добиться более равномерного распределения компонентов тонкодисперсных композиций по объему смеси.

**Реализация результатов.** Созданный лабораторный стенд вибрационного смешивания используется в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) в курсах «Машины и аппараты химических производств» и «Автоматизированные расчет и конструирование элементов оборудования отрасли» при выполнении лабораторных практикумов.

Образец опытно-промышленной установки используется в ОАО ФНПЦ «НИИ прикладной химии» в производстве пиротехнических составов гражданского назначения.

Д.С. Медведев (старший преподаватель)  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
(ТУСУР, Томск)  
Научный консультант – П.Н. Дробот, к.ф.-м.н., доцент ФИТ ТУСУР

## ПРОЕКТ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ «ЭЛЕКТРОННЫЙ ВОДОПРОВОДНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ»

### Реферат

*Ключевые слова:* регулятор, датчик температуры, датчик расхода, система автоматического управления, микропроцессорная система, серводвигатель, система гарантированного электропитания, система автоматизированного проектирования.

### Введение

В быту при использовании смесителей в ванной комнате или на кухне возникают следующие проблемы:

- при открытии крана мы обжигаемся, настраивая нужную температуру воды;
- случаются изменения температуры или напора воды, когда мы принимаем душ, доставляющие определенный дискомфорт;
- не удается набрать ванну с комфортной температурой воды (для купания маленьких детей это особенно актуально);
- мы забываем про набирающуюся в ванну воду и затапливаем соседей;
- мы тратим впустую слишком много воды.

Автор проекта предлагает создать простое в использовании, надежное и безопасное электронное устройство, которое позволит задавать и поддерживать на нужном уровне температуру и напор воды. Также прибор сможет автоматически включать воду при поднесении рук к смесителю, и отключать ее через некоторое время, когда кран не используется, что позволит экономить воду. Схема применения такого устройства приведена ниже.

Регулятор устанавливается в скрытом месте под ванной или раковиной кухонной мойки, с помощью стандартных шлангов подключается к системе подачи воды и к уже установленному смесителю, а также к бытовой сети электропитания. Панель управления, соединенная с регулятором, располагается над смесителем, крепится к стене и служит для включения, регулирования и отключения воды. В варианте панели, представленном на рисунке, имеется всего три органа управления: кнопка включения/выключения устройства, а также два поворотных регулятора,

позволяющих задавать нужную температуру и напор воды. Также на панели для удобства расположены два индикатора, показывающие текущие настройки.

Таким образом, конечным продуктом является прибор, состоящий из двух частей: панели управления и регулятора, соединенные между собой через проводной или беспроводной канал связи (будет предусмотрено оба варианта).

На данный момент нами создан макет устройства, проводится его тестирование и доработка, отлаживается программная часть, продумывается функционал и дизайн опытного образца.

## 1. Научно-техническая часть проекта

Разрабатываемое устройство по своей сути представляет собой комбинированную замкнутую двухконтурную систему автоматического регулирования. Объектом управления в системе являются исполнительные механизмы – серводвигатели, соединенные с вентилями, изменяющими площадь живого сечения в трубах с горячей и холодной водой. В качестве управляющего устройства выступает микропроцессор с высокой производительностью, получающий информацию с двух датчиков температуры, установленных на входе системы в месте подведения горячей и холодной воды, с измерителя потока смешанной воды (расходомера) и с задающих элементов, расположенных на панели управления (кнопочные и поворотные переключатели). Структурная схема интеграции электронного смесителя приведена на рис. 1.

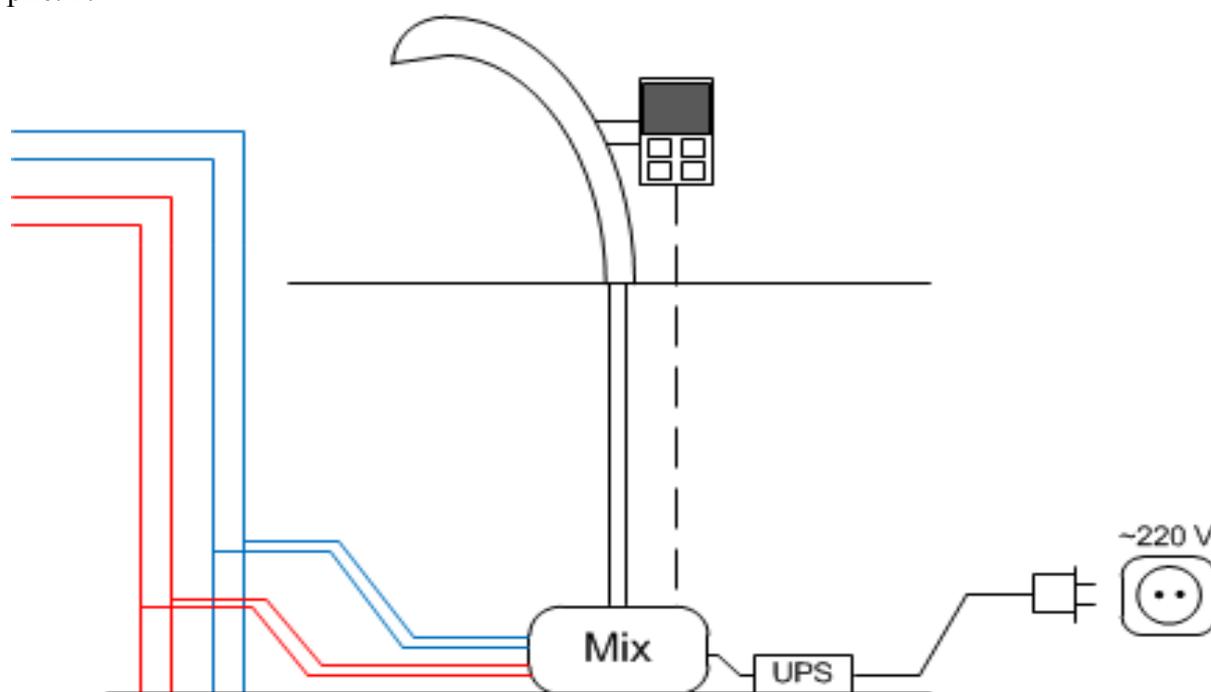


Рис. 1. Структурная схема подключения электронного смесителя

Основной задачей в рамках проекта является синтез оптимального с точки зрения сложности технической реализации, инерционности и чувствительности к внешним воздействиям цифрового регулятора. Для достижения оптимума требуется создать адекватную математическую модель с заданными свойствами, которая позволит построить и реализовать программно на базе микропроцессора необходимый алгоритм управления.

На данный момент создан макет регулятора (рис. 2), состоящий из двух водопроводных шаровых вентилей, тройника, расходомера и двух серводвигателей. Все это закреплено на жестком деревянном основании. Серводвигатели соединяются с отладочной платой, на которой расположен контроллер, подающий сигналы управления двигателями, жидкокристаллический дисплей, поворотный регулятор (энкодер), кнопки и разъемы для подключения внешней периферии. При помощи энкодера и кнопок двигателя приводят в действие вентили, тем самым регулируя поток воды. Кроме ручной регулировки макет может работать в режиме стабилизации напора воды и температуры.



Рис. 2. Фотографии панели управления

Разработана система гарантированного электропитания, которая позволяет не только обеспечить необходимый уровень мощности для питания всех узлов системы, но и ее безопасную и бесперебойную работу (рис. 3). Безопасность достигается применением гальванической развязки, заземлением, а бесперебойность – использованием аккумуляторных батарей и зарядного устройства. В случае пропадания напряжения в сети происходит переключение на питания от батарей. При работе в штатном режиме, т.е. при наличии сетевого напряжения, заряд восстанавливается с помощью зарядного устройства. Система гарантированного электропитания по принципу работы является импульсной, что позволяет снизить ее массу и габариты, поэтому блок питания не займет много места при эксплуатации. Электромагнитные

помехи, неизбежно возникающие в импульсных схемах, компенсируются за счет применения корректора коэффициента мощности.

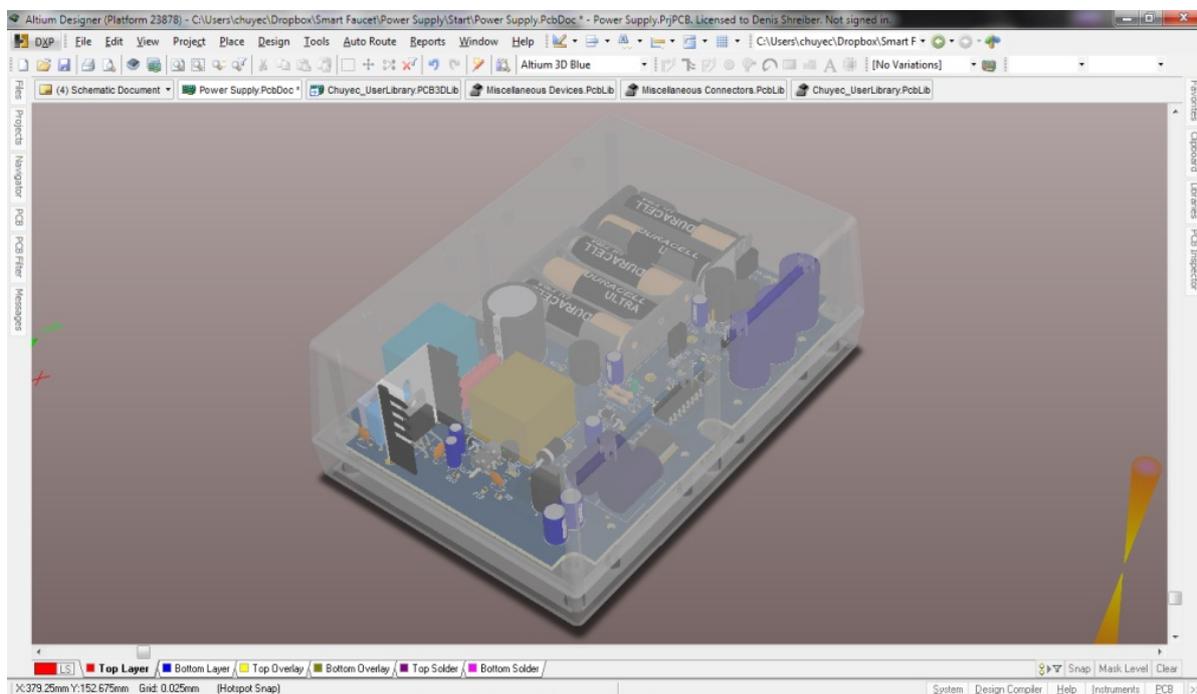


Рис. 3. Модель источника бесперебойного питания

На текущий момент создана работающая математическая модель источника питания, отвечающая всем вышеописанным требованиям. Модель построена на базе SPICE-описаний электронных компонентов, что позволяет с высокой долей вероятности получить работоспособное устройство.

Не менее важной задачей является конструкторская часть проекта. Здесь речь идет не только о грамотном сочленении электрических (системы управления и питания), механических (корпуса, двигателя) и сантехнических узлов (шланги, фитинги, вентили), и обеспечении защиты от внешних факторов (температуры и влажности). Ключевая с потребительской точки зрения задача – построение эргономичного дизайна корпуса панели управления и регулятора, и дружественного интерфейса пользователя. При создании макета будут использованы стандартные корпуса и пленочная клавиатура. Но в перспективе планируется продумать вариант собственного дизайна, который позволит с уверенностью выйти на рынок электронной продукции.

Благодаря тому, что разработка решает вполне конкретные жилищные проблемы и устраняет неудобства в быту, она потенциально может быть востребована широким кругом потребителей. Однако, имея в виду довольно высокую сложность устройства в смысле его реализации, цена на рынке предположительно будет составлять не менее 10 т.р., что сужает круг потребителей: позволить себе заплатить такие деньги смогут люди со средним или высоким уровнем дохода, ценящие комфорт в быту. Таким образом,

разработка займет нишу ресурсо- и энергосберегающих устройств (рынок интеллектуальных зданий «Умный дом», «Цифровой дом», «Экодом»).

Есть высокая степень заинтересованности разработкой со стороны двух потенциальных потребителей, один из которых уже сейчас готов приобрести несколько устройств, а другой, связанный с темой экологии запросил коммерческое предложение с целью внедрения у себя нашей разработки.

На сегодняшний день наша команда является резидентом межвузовского студенческого бизнес-инкубатора «Дружба» и в нашем распоряжении есть лаборатория, на базе которой мы планируем создать испытательный стенд для тестирования макетного и опытного образца, которые будут собираться здесь же.

Макет уже демонстрировался в действии на томском телевидении в программе «Час-пик» от 11.11.2011.

## **2. Экономическая часть**

В декабре 2011 года в студенческом бизнес-инкубаторе ТУСУРа проводилось мероприятие, на котором участники инновационных проектов должны были разработать бизнес-план для своей разработки по стандарту международной организации UNIDO, созданной ООН. Бизнес-план согласно этому стандарту должен содержать такие пункты, как резюме, идея проекта, оценка рынка сбыта, план маркетинга, план производства, организационный план, финансовый план. Ниже приведено описание бизнес-плана гипотетической фирмы «МИП».

### **Резюме проекта**

#### **Наименование продукции**

Электронный смеситель для кухни и ванной комнаты

#### **Назначение и область применения**

Устройство предназначено для автоматической настройки и стабилизации температуры и напора воды в смесителях, установленных на кухне и в ванной комнате.

#### **Основные характеристики проекта**

Цель проекта: Создание новой фирмы, с целью удовлетворения потребности клиентов.

Суть проекта: Продажа устройства, предназначенного для автоматической настройки и стабилизации температуры и напора воды в смесителях, установленных на кухне и в ванной комнате (электронный смеситель).

На первоначальном этапе источником финансирования выступит ссуда банка в размере 1 500 000 рублей на срок до 3 лет.

#### **Описание продукта**

Продукт представляет собой дополнение к существующему смесителю, установленному на кухне или в ванной. Его основная функция – упрощение процедуры настройки температуры и напора воды, а также стабилизация этих показателей.

Если пользоваться краном с двумя регуляторами, один для холодной воды, другой – для горячей, то на настройку и поддержание необходимой температуры тратится дополнительное время. К тому же, если по какой-то причине давление, и, соответственно, напор холодной воды уменьшается, из крана будет течь вода горячее, чем хотелось бы. Придется уменьшать напор горячей воды и т.д. Данное устройство позволяет избежать всех этих неудобств за счет применения электромеханической системы с датчиками, которая будет отслеживать заданные пользователем параметры и стабилизировать их. Естественно, если горячей воды нет в принципе, то система не сможет выдавать теплую воду, поскольку в ней нет нагревательных элементов.

Конструктивно устройство состоит из трех основных частей: панель управления, регулятор и источник питания. Модель панели управления находится на рис. 4. Макет регулятора рис. 5. Источник питания – примерно как у ноутбуков.



Рис. 4. Модель панели управления

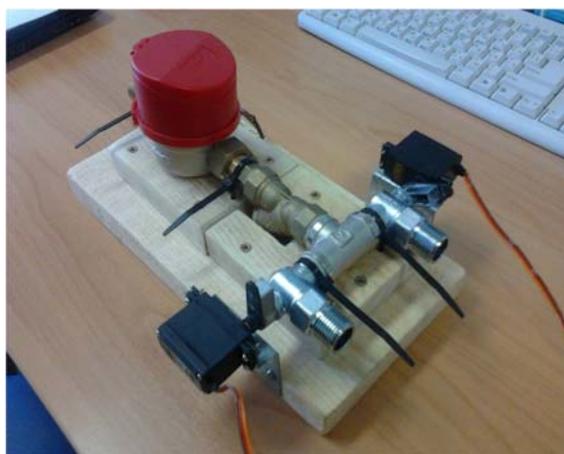


Рис. 5. Макет регулятора

Панель управления располагается над смесителем или крепится непосредственно к изливу, регулятор – под раковиной или ванной, а источник питания подключается к розетке вне ванной.

Характерные черты продукта:

- Устройство является дополнением к уже установленным смесителям.
- Конструктивно оно состоит из трех частей: регулятора, панели управления и блока питания.
- Питание устройства осуществляется от бытовой сети 220 В, 50 Гц.
- Предусмотрена автономная работа в случае отключения электроэнергии.
- Максимальное время выхода температуры и напора воды на заданный уровень – 3 секунды.

### **Конкурентоспособность**

Конкурентными преимуществами проекта будут являться:

- Удобство и экономия времени при настройке температуры и напора воды в смесителе.
- Безопасность: исключены варианты резкой смены температуры воды, т.к. предусмотрена стабилизация и автоматическое отключение, если температура слишком высокая или слишком низкая.
- Цифровое управление: благодаря электронной «начинке» имеется возможность персонализировать устройство, вводя дополнительные функции, такие как бесконтактное включение/отключение, контрастный душ и другое.

### **Степень готовности к выпуску и реализации продукции**

На текущий момент опытный образец устройства. Ориентировочная дата окончания доработки макета, состоящего из панели, регулятора и источника питания – конец декабря 2012 года.

## **Оценка рынка сбыта**

### **Описание потребителей (табл. 1).**

Основной потребитель фирмы – компании, занимающиеся автоматизацией инженерных систем в жилых помещениях, в том числе проектированием, установкой и обслуживанием систем «Умный дом».

Второстепенный сегмент рынка – санатории и оздоровительные комплексы, где требуются специальные режимы работы душевых смесителей, а так же розничная торговля, которая не может быть исключена из бизнес-модели, но, предположительно, оборот в этой сфере будет меньше, чем в первых двух сегментах.

Таблица 1 – Сегментирование рынка по группам потребителей.

Признаки сегментирования	Основная группа	Второстепенная группа
1 Демографические признаки		
1.1 Пол	-	Женщины, мужчины
1.2 Возраст	-	от 25 лет и старше
1.3 Уровень дохода	-	Средний, высокий
1.4 Сфера деятельности	Торгово, проектно, ремонтно-монтажные компании	Частные лица

2 Географический признак	Томск, Новосибирск	Близ лежащие города
3 Психографические признаки		
1.1 Принадлежность к общественному классу	Средний, высокий	Средний, высокий
1.2 Тип личности	Новаторы	Новаторы
1.3 Образ жизни	Эстеты, авантюристы	Эстеты, авантюристы
2 Поведенческие признаки		
4.1 Искомые выгоды	Качество, инновации	Интерес, качество, инновации, престиж,
4.2 Степень приверженности	Средняя, высокая	комфорт
4.3 Интенсивность потребления	Средняя, высокая	Низкая
4.4 Повод	Обыденная покупка	Низкая Особый случай

Данный анализ показал, что к целевой группе относятся торгово-, проектно-, ремонтно-монтажные компании г. Томска и г. Новосибирска, деятельность которых включает проектирование и установку систем автоматизации зданий ("Умный дом"), желающие приобретать качественную продукцию и расширять перечень своих услуг на договорной основе.

### Оценка конкурентов

Оценку конкурентов можно представить с помощью таблицы 2.

Таблица 2 – Основные конкуренты и их характеристика.

Показатели конкурентоспособности	Конкурентные фирмы			«МИП»
	«Grohe»	«Hansgrohe»	«Oras»	
1. Уровень качества услуг	9	8	9	9
2. Уровень цен	7	8	7	9
3. Ассортимент	10	8	8	3
4. Гибкие цены, скидки	7	6	7	9
5. Имидж	10	8	9	-
6. Реклама	7	7	8	8
Итого	50	45	48	38

Анализ таблицы показал, что основными недостатками конкурентов являются:

1. Высокий уровень цен на продукцию
2. Отсутствие скидок

Конкурентными преимуществами нашей компании будут:

1. При одинаковой с конкурентами стоимости товара представляемый продукт обладает большей функциональностью, выраженной в электронном управлении, стабилизации температуры и напора воды в смесителях.

2. Наличие эффективной рекламы.

На фоне конкурентов наша фирма может быть вполне конкурентоспособной, если грамотно выстроить маркетинговую стратегию.

### **Оценка сильных и слабых сторон бизнеса**

Сильные стороны:

- Сплоченная команда.
- Расширяемый функционал.
- Высокое качество продукции
- Наличие эффективной рекламы

Слабые стороны:

- Отсутствие опыта создания и ведения high-tech бизнеса
- Отсутствие имиджа
- Финансовые ограничения

### **Емкость рынка**

В современной России количество людей, улучшающих свою жизнь за счет внедрения в свой быт достижения современных технологий, с каждым годом растет. Фирма "МИП" ориентирована на продажу готовых устройств различным торгово-, проектно-, ремонтно-монтажным компаниям, многие из которых кроме всего прочего занимаются проектированием и установкой систем автоматизации зданий ("Умный дом").

По данным проведенного анализа в городе Томске насчитывается около десятка компаний, которые могут стать потенциальными потребителями. В городе Новосибирске таких компаний 94. Исходя из этого, предположим, что из 104 компаний нашим предложением заинтересуются 10%, т.е. 10 компаний. Цена единицы изделия составит 17 000 рублей. По данным проведенного опроса, в среднем каждая компания приобретет в год около 15 штук изделий. Таким образом, емкость рынка составит:

$$E = \text{Цена} * \text{Количество(в год)} = 17\,000 * 150 = 2\,550\,000 \text{ рублей.}$$

### **План маркетинга**

#### **Общая стратегия**

Для представления общей картины на конкурентном рынке в данной отрасли необходимо провести SWOT-анализ (рис. 6).

Анализируя расположенные на рисунке данные можно разработать действия (план маркетинга) для нейтрализации слабых сторон компании, в том числе за счет сильных.

В целях решения этой задачи создаваемая фирма выбирает стратегию концентрированного маркетинга, что дает фирме возможность концентрировать свои ресурсы там, где она может использовать свои преимущества, обеспечивая экономию на специализации производства и прочную рыночную позицию за счет высокой степени уникальности и индивидуальности в удовлетворении потребностей.

Сильные стороны	Слабые стороны
1. Сплоченная команда. 2. Высокое качество продукции. 3. Расширяемый функционал. 4. Система скидок. 5. Удобное месторасположение. 6. Наличие эффективной рекламы. 7. Цена ниже, чем у конкурентов.	1. Финансовые ограничения 2. Отсутствие имиджа. 3. Отсутствие опыта создания и ведения high tech бизнеса
1. Завоевание рыночного сегмента 2. Формирование стабильного портфеля заказов 3. Расширение ассортимента продукции 4. Формирование стабильного имиджа	1. Сильные конкуренты. 2. Наличие товаров-заменителей 3. Снижение спроса
Возможности	Угрозы

Рис. 6. SWOT-анализ

Основной задачей фирмы на первоначальном этапе создать положительного впечатления о ней, а впоследствии – имиджа. Благоприятный имидж должен быть адекватным и иметь точный адрес (предназначен для целевой аудитории). Средствами формирования имиджа выступают: собственный сайт, контекстная реклама в интернете, реклама на светодиодных экранах.

### Цели маркетинга

Базовая цель (миссия) – стать самым востребованным поставщиком электронных смесителей на рынке г. Томска, Новосибирска.

Цели маркетинга будут классифицированы следующим образом:

#### 1. Рыночные:

– Обеспечить безубыточную деятельность в первый год (рентабельность не ниже 10%)

– Завоевание доли рынка не менее 3%

#### 2. Маркетинговые:

– создание имиджа фирмы,

– объем продаж не менее 252 изделий в первый год,

– обеспечение объема прибыли не менее 500 000 рублей в первый год,

#### 3. Обеспечивающие:

- цена на продукцию будет формироваться методом калькуляции себестоимости продукции: Себестоимость + прибыль,

- стимулирование сбыта, будет осуществляться с помощью активной рекламы и системы скидок.

### Финансовое обеспечение плана маркетинга

Успех бизнеса определяется не только размером начального капитала, но и качеством деловых коммуникаций. Виды деловых коммуникаций весьма различны. Сюда входят: конференции, выставки, семинары, презентации, пресс-конференции, интервью, круглые столы, деловые обеды, переговоры. Но самым основным видом коммуникаций является реклама (табл. 3).

Рекламная кампания с использованием интернета и телевидения наиболее эффективна при выходе на рынок новой фирмы. Такая реклама ориентирована на широкого пользователя со средним и высоким уровнем достатка.

Таблица 3 – Расчет затрат на рекламу на 2012 г., руб.

Средства рекламы	Количество ед-ц. (квартал)	Затраты (на единицу, квартал)	Затраты на рекламу (на 1 год)
1. Интернет - собственный сайт (создание + тех поддержка)	1	5 000 4 500	5000 4 500*4=18 000
- контекстная реклама	1	9 000	9 000*4=36 000
2. Реклама на светодиодных экранах	1	151 200	151 200 *4 = 604 800
<b>Итого</b>		169 700	663 800

В начале деятельности планируются льготные предложения со скидкой до 15%.

В период развития планируется продолжать активную рекламу (табл. 4). В качестве средств рекламы выступят: собственный сайт, средства наружной рекламы, реклама в интернете.

Таблица 4 – Расчет затрат на рекламу в 2013 и 2014 гг., руб.

Средства рекламы	2013г.				2014г.
	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	
1. Интернет: - собственный сайт (тех поддержка)	5 400	5 400	5 400	5 400	25 000
- контекстная реклама	12 000	12 000	12 000	12 000	56 000
2. Реклама на светодиодных экранах	181 440	181 440	181 440	181 440	689 472
<b>Итого</b>	795 360				770 472

## План производства

### Производитель нового товара

Отличие предлагаемого устройство от стандартного крана заключается в наличии в первом электронных регуляторов потока воды, которые перемещают задвижки, регулирующие подачу холодной и горячей воды. Управление двигателем осуществляется посредством микропроцессорной системы. Входными параметрами системы являются температура и давление воды. Электрические сигналы, пропорциональные температуре горячей и холодной воды, а также давлению воды, могут быть получены с помощью соответствующих датчиков. После включения системы температура и напор воды будут соответствовать некоторому номинальному режиму. Этот режим может быть задан пользователем. На лицевой панели описываемого устройства должны быть кнопки/поворотные ручки для регулирования температуры в диапазоне 10-60°C (открыт только вентиль холодной воды - открыт только вентиль горячей воды), а также кнопки/поворотные ручки регулирования напора в диапазоне от 0 до 100 %. Значение «0%» соответствует полностью закрытым вентилям, а значение «100 %» - полностью открытым. Цифры отображаются на семисегментных индикаторах, жидкокристаллическом дисплее или сенсорной панели. В последнем случае необходимость в использовании кнопок большей частью отпадает.

В процессе работы устройства температура и напор могут изменяться. В этом случае система будет автоматически стабилизировать эти параметры путем изменения положения задвижек за счет применения двухконтурной обратной связи.

### Расчет потребности в основных фондах

Фирма «МИП» планирует получить ссуду в банке в городе Томске под 15 % годовых с обязательной выплатой раз в квартал и использовать его для закупки необходимых для работы материалов и оплаты аренды.

Аренда помещения планируется в Кировском районе г. Томска в здании Бизнес-инкубатора. Площадь арендуемого помещения будет составлять 30 кв.м. для производства продукции, и 20 кв.м. для офиса. Стоимость аренды в год составит 52 000 рублей, с учетом коммунальных платежей и услуг связи.

Стоимость аренды на 2013, 2014 гг. приведена с учетом увеличения арендной ставки на 2% в год:

Годовая стоимость аренды в 2013г. = 52 000 \* 0,02 = 53 040 рублей

Годовая стоимость аренды в 2014г. = 53 040 \* 0,02 = 54 100 рублей

Расчеты потребностей в оборудовании, приспособлениях и комплектующих, а также вспомогательных материалах приведены в табл. 5 – 7.

Расчет потребности в приспособлениях и комплектующих на 2012г. представлен в приложении А.

Таблица 5 – Расчет потребности в оборудовании на 2012 г., руб.

Вид приспособления	Кол-во единиц	Цена за единицу	Стоимость в год	Способ вовлечения
Сверлильно-фрезерный станок	1	80 000	80 000	Покупка
<b>Итого</b>			80 000	

Таблица 6 – Расчет потребности в приспособлениях и комплектующих на 2013 и 2014 гг., руб.

	2013г.				2014г.
	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	
Стоимость оборудования и приспособлений	71 000	75 000	75901,1	81 080	521 491
<b>Итого</b>	302 981,1				521 491

Таблица 7 – Расчет затрат на вспомогательные материалы на 2012, 2013 и 2014 гг. (руб.).

Наименование ресурсов	Цена за в месяц	Общие затраты		
		2012г.	2013г.	2014г.
ГСМ	972	11 664	12 247	12 859
<b>Итого</b>		11 664	12 247	12 859

Необходимые суммы на покупку материалов в последующие года приведены с учетом инфляции (ставка = 10%) и с учетом увеличения покупательского спроса 10-15% в год (в зависимости от квартала).

Расчеты иных затрат в табл. 8, 9, 10.

Таблица 8 – Расчет затрат на упаковку на 2012, 2013 и 2014 гг., руб.

Наименование	Количество	Цена за 1 ед.	Стоимость всего		
			2012г.	2013г.	2014г.
Коробка упаковочная	250	20	5 000	5 500	6 100
Воздушно-пузырьковая пленка 1.2м	105	18	1 890	2 500	2 900
Скотч прозрачный(UNI BOB 55мм*66м)	100	32	3 200	3 800	4 100
<b>Итого</b>			10 090	11 800	13 100

Таблица 9 – Расчет затрат на нематериальные активы на 2012, 2013 и 2014 гг., руб.

Наименование ресурсов	Цена за в месяц, руб.	Общие затраты, руб.		
		2012г.	2013г.	2014г.
Патент	600	600	600	600
<b>Итого</b>		600	600	600

Таблица 10 – Расчет затрат на услуги сторонних организаций  
на 2012, 2013 и 2014 гг. (руб.).

Наименование ресурсов	Цена за в месяц	Общие затраты		
		2012г.	2013г.	2014г.
Регистрация	2 000	2 000	-	-
Печать	250	250	-	-
Бухгалтерские услуги	2 000	2 000	26 400	31 200
<b>Итого</b>	4 250	4 250	26 400	31 200

### Расчет потребностей в персонале и средствах на оплату труда

Таблица 11 – Расчет потребности в персонале и заработной плате на 2012г., руб.

Категория работников	Численность	Размер заработной платы		
		Месячная	С учетом Р.К.	Годовая
Управляющий персонал				
1. Директор	1	11 000	$11\,000 * 1,3 = 19\,500$	171 600
Производственный персонал				
1. Электромонтер	3	10 000	$10\,000 * 3 * 1,3 = 39\,000$	468 000
<b>Итого</b>	4	21 000	53 300	639 600

Таблица 12 – Расчет потребности в персонале и заработной плате  
на 2013 и 2014 гг., руб.

Категория работников	Численность	2013г.		Численность	2014г.	
		Размер ЗП, тыс.руб. в месяц	ФОТ (с учетом РК) тыс.руб. в год		Размер ЗП, тыс.руб. в месяц	ФОТ тыс.руб. в год
Управляющий персонал						
1. Директор	1	14 000	218 400	1	15 000	234 000
Производственный персонал						
1. Электромонтер	3	12 000	$12000 * 3 * 1,3 * 12 = 561\,600$	4	12 000	748 000
<b>Итого</b>			780 000			982 800

**Расчет сметы затрат на производство и калькуляция себестоимости единицы  
продукции**

Таблица 13 – Расчет сметы затрат на реализацию проекта на 2012 г., руб.

Наименование затрат	Сумма затрат (в год)
1. Основные приспособления и комплектующие	498 182
2. Вспомогательные материалы	11 664
3. Нематериальные активы	600
4. Заработная плата работникам	639 600
5. Отчисления от зарплаты в страховые фонды (26%)	166 296
6. Покупка оборудования	80 000
7. Амортизация (срок использования – 10 лет, 20% от стоимости оборудования)	8 000
8. Затраты на рекламу	663 800
9. Затраты на упаковку	10 090
10. Затраты слуги сторонних организаций	25 050
11. Страховые выплаты (6%)	-
12. Процентные выплаты	207 000
13. Транспортные расходы	-
14. Аренда помещений	52 000
15. Коммунальные услуги	-
16. Прочие расходы	10 000
17. Накладные расходы	117 530
<b>Итого</b>	<b>2 490 148</b>

1. Амортизация оборудования (линейный способ, срок использования (10 лет),  
 $A=80\,000 / 10 = 80\,000$  руб.

2. Основная сумма по займу будет выплачиваться ежеквартально, первоначально по 80 000 руб., затем в 2013 году по 150 000 и в 2014 г. по 210 000 руб. Проценты будут начисляться (15% годовых) и уплачиваться исходя из остатка долга.

3. Накладные расходы составляют 5% от прямых затрат = 117 530 руб.

4. Порядок начисления процентов см. приложение Г.

Таблица 14 – Калькуляция себестоимости товара на 2012г., руб.

Наименование затрат	Сумма затрат (в год)
1. Основные приспособления и комплектующие	498 182
2. Вспомогательные материалы	11 664
3. Нематериальные активы	600
4. Затраты на заработную плату персонала	639 600

5. Отчисления от заработной платы в страховые фонды	166 296
6. Затраты на воду на технологические цели	-
7. Затраты на электроэнергию на технологические цели	-
8. Затраты на упаковку	10 090
9. Затраты слуги сторонних организаций	25 050
10. Затраты на амортизацию	8 000
11. Затраты на арендную плату	52 000
12. Затраты на рекламу	663 800
13. Проценты по займу	207 000
14. Страховые взносы	-
15. Накладные расходы	117 530
<b>Итого</b>	<b>2 388 148</b>

Себестоимость единицы товара составит:

$$388\,148 / 150 = 15\,921 \text{ руб.}$$

### Описание производственного процесса

Производственный процесс будет включать в себя следующие стадии (рис. 7):

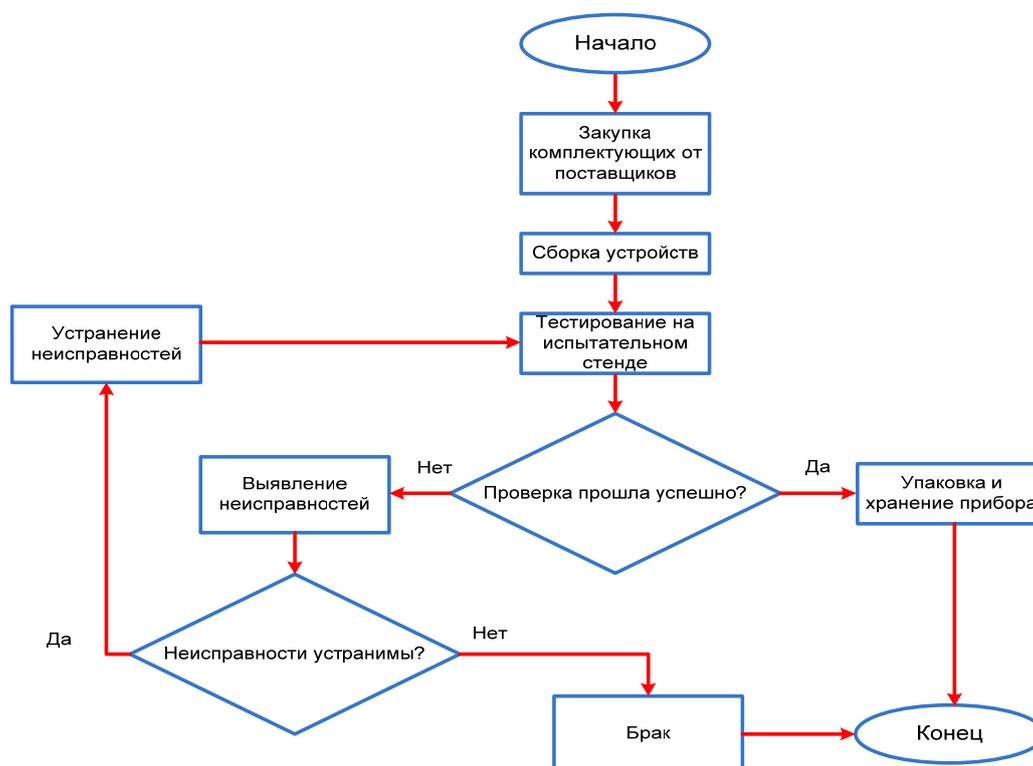


Рис. 7. Схема процесса сборки

1. Заготовительный процесс
2. Процесс обработки

3. Сборочно-монтажный процесс
4. Регулировка и настройка
5. Контроль и испытания
6. Упаковка и хранение

### **Организационный план**

#### **Организационно-правовая форма**

Организационно-правовая форма предприятия – индивидуальный предприниматель, деятельность которого регламентируется Федеральным Законом РФ «О государственной регистрации юридических лиц и индивидуальных предпринимателей» N 129-ФЗ, Гражданским кодексом РФ, другими федеральными законами РФ, а также отдельными постановлениями Правительства РФ.

Рабочие часы предприятия с 9 до 18 часов (понедельник-пятница).

Предприятие является физическим лицом, будет иметь самостоятельный баланс, расчетный счет, круглую печать, штампы, бланки со своим наименованием, собственный товарный знак предприятия.

#### **Штатное расписание**

Важным организационным документом является коллективный договор. С целью регулирования трудовых отношений и согласования социально-экономических интересов работников предприятия с работодателем заключен коллективный договор. Перед приемом на работу каждый претендент должен пройти инструктаж по технике безопасности. Во избежание конфликтных ситуаций сотрудники, помимо контракта, подписывают договор о неразглашении коммерческой тайны.

Таблица 15 – Штатное расписание на 2012 г.

Должность	Ставка	Численность, чел.	Оклад, руб.	РК	Размер з/п, руб.	Сумма з/п., руб.
Директор	1	1	11 000	1,3	14 300	171 000
Электромонтер	1	3	10 000		39 000	468 000
<b>Итого</b>		4	21 000		53 300	639 600

Фирмой «МИП» планируется применять контрактную систему оплаты труда (табл. 15). Договор заключается на определенный срок, в котором оговариваются условия труда, обязанности сторон, режим работы, срок действия контракта и уровень оплаты труда.

#### **Организационная структура управления**

Организационная структура управления «МИП» – функциональная (рис. 8). Распределение обязанностей приведено в табл. 16.

ДИРЕКТОР

Электромонтер  
(3 чел)

Рис. 8. Структура управления «МИП»

Таблица 16 – Распределение обязанностей и потребностей в персонале.

Должность	Обязанность	Персональная ответственность	Требования к квалификации	Форма поощрений
Директор	1. организация работы предприятия, 2. заключение договора, в том числе по найму работников, 3. управление персоналом, 4. формирование и продвижение имиджа компании, 5. контроль за экономным использованием материальных, трудовых и финансовых ресурсов. 6. организация бухгалтерского и налогового учета предприятия, 7. обеспечение законности, своевременности и правильности оформления документов	1. за конечные результаты деятельности предприятия, 2. за ритмичную работу персонала. 3. за формирование учетной политики, 4. своевременное представление полной и достоверной бухгалтерской отчетности.	грамотность, в/о, знание бух. учета, стрессоустойчивость, владение современными информационными технологиями	10 % от прибыли
Мастер-универсал	1. обеспечение сборки высоковольтных электрических машин и электроаппаратов различных типов; 2. освоение и внедрение прогрессивных методов технического обслуживания, ремонта, монтажа и других работ по закреплённому типу устройств; 3. участие в разработке мероприятий по повышению надежности, качества работы 4. участие в составлении заявок на материалы, запасные части, инструмент и обеспечивает их экономное и рациональное расходование; 5. выполнение работы по ремонту, сборке и регулированию особо сложных, ответственных и экспериментальных электроприборов	1. за ненадлежащее исполнение или неисполнение своих должностных обязанностей, предусмотренных настоящей должностной инструкцией 2. за правонарушения, совершенные в процессе осуществления своей деятельности 3. за причинение материального ущерба	физическая выносливость, среднеспециальное образование	7% от прибыли

## **Выводы (заключение)**

Несмотря на то, что представленный проект находится еще в разработке (завершающая стадия), можно сделать вывод о том, что основная цель проекта – разработка функционирующего устройства – выполнена.

За период выполнения проекта до настоящего момента были выполнены следующие действия:

- выработана концепция прибора;
- проведена полная разработка устройства, включая: создание программного обеспечения для управления серводвигателями и взаимодействия с датчиками температуры и расхода. Также спроектирован и собран источник бесперебойного питания;
- проведены предварительные натурные испытания, показавшие работоспособность спроектированного устройства.

Кроме технической реализации устройства в рамках проекта с привлечением экономистов был разработан бизнес-план предприятия, которое могло бы осуществлять сборку и продажу электронных смесителей.

В 2012 году проект размещался в Межвузовском студенческом бизнес-инкубаторе «Дружба» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Именно благодаря резиденству в бизнес-инкубаторе появилась возможность разработать бизнес-план, а также найти потенциальных партнеров и покупателей устройств. С новосибирской компанией «Экодом» заключено соглашение о намерениях, согласно которому фирма намеревается приобрести 1 000 экземпляров по мере готовности команды производить сборку и поставку устройств.

К.В. Солдатова (молодой ученый, доктор технических наук, доцент)  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Ю.Б. Галеркин (доктор технических наук, профессор, зав.каф. «Компрессорная,  
вакуумная и холодильная техника», СПбГПУ)

## ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЕМЕЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

### Реферат

*Ключевые слова:* метод универсального моделирования, центробежный компрессор, модельная ступень, газодинамические характеристики, математическое моделирование, модель потерь.

В процессе выполнения работы была собрана и обработана информация о результатах приемо-сдаточных испытаний высокоэффективных компрессоров, которые созданы по проектам кафедры КВХТ с использованием программ 4-го поколения Метода универсального моделирования. Произведено уточненное моделирование характеристик варьированием эмпирических коэффициентов в моделях и подведенного к газу и потерянному напорам. Разработаны научные основы: предложены новые уравнения математических моделей и приемы расчета, на базе которых созданы компьютерные программы для расчета характеристик ступеней и многоступенчатых компрессоров 5-го поколения. По результатам испытания модельных ступеней кафедры КВХТ семейства 20СЕ произведена идентификация математических моделей напора и потерь напора 5-го поколения. По программе 5-го поколения произведено повторное моделирование характеристик компрессоров. Коэффициенты, определяющие КПД на оптимальном режиме, одинаковы у всех компрессоров, что повышает достоверность расчетов характеристик ступеней, входящих в состав проточной части компрессоров.

По результатам расчетов создано семейство модельных ступеней и банк данных этих ступеней, размеры и форма проточной части которых известна из проектов компрессоров нового поколения, а характеристики рассчитываются по программе 5-го поколения. Программы 5-го поколения и семейство модельных ступеней используются в практике проектирования и в учебном процессе уже сейчас.

По данной теме автором опубликовано 18 работ. Основные результаты представлены в научно-техническом журнале «Компрессорная техника и пневматика», в Научно-технических ведомостях СПбГПУ, Известиях Высших Учебных Заведений «Проблемы Энергетики» Трудах научной школы компрессоростроения СПбГПУ, в Трудах 15-й Международной конференции по компрессоростроению, а монографии «Моделирование рабочего процесса промышленных центробежных компрессоров.

Научные основы, этапы развития, современное состояние» и в докторской диссертации.

Результаты работы были представлены на Международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (г. Красноярск, 2010), 4-м Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2010), 2-й Международной научно-практической Интернет-конференции «Молодежь. Наука. Инновации» (г. Пенза, 2010), 3-й Международной научно-практической Интернет-конференции «Молодежь. Наука. Инновации» (г. Пенза, 2011), 15-й Международной конференции по компрессоростроению (г. Казань, 2011 г.), СIEPLNE MASZYNY PRZEPLYWOWE. TURBOMACHINERY (Польша, г. Лодзь, 2011) и проч.

Результаты работы внедрены в проектную, научную и педагогическую практику кафедры КВХТ, что подтверждается актами внедрения.

## **Введение**

Потребность промышленности в расширении номенклатуры центробежных компрессоров приводит к необходимости сокращения сроков проектирования. За последние годы в связи с прогрессом экспериментальных и расчетных методов изменились методы проектирования, доводки и расчета характеристик компрессоров [2]. Компрессорная техника имеет большое значение в новых перспективных направлениях развития техники и технологии: в космонавтике, робототехнике, производстве искусственного топлива. Сердцем большинства технологических установок является компрессор. От эффективности и надежности его работы зависят КПД и долговечность установки в целом.

Мировой рынок компрессоров постоянно увеличивается. Более быстрый рост наблюдается в Европе, Азии и Северной Америке. Как свидетельствует статистика, объем местного рынка компрессоров прямо пропорционален индустриализации страны или региона, а его рост темпам обновления машинного парка, т. е. модернизации и расширению производства. Эти факторы определяют спрос на компрессорное оборудование. В нашей стране спрос на компрессоры более-менее постоянный и растет из года в год из-за того, что парк компрессоров морально и физически устарел, и потому нуждается в обновлении.

По оценкам специалистов в России и странах СНГ эксплуатируются свыше 500 тыс. промышленных компрессоров, которые вместе с вентиляторами и насосами потребляют около 20% вырабатываемой электроэнергии. Только газотранспортная система ОАО «Газпром» на 2011 год включает 150 тыс. км газопроводов, около 700 компрессорных цехов, более 4270 установленных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) суммарной мощностью более 48 млн. кВт. [16]. Основной тип применяемых ГПА – центробежные компрессоры, однако значительная часть парка компрессоров физически и морально устарела. Поскольку с течением времени параметры газопроводов изменяются и уже не соответствуют газодинамическим характеристикам

установленных компрессоров, необходима замена проточной части – при этом эффективно применение сменных проточных частей (СПЧ).

Область применения промышленных центробежных компрессоров раньше ограничивалась умеренными давлениями, ступени компрессоров работали в диапазоне оптимальной быстроходности и коэффициентов напора, значения критерия сжимаемости были умеренными, сейчас это не так. Энергопотребление этих машин велико, поэтому экономичности новых компрессоров, определяемой качеством газодинамических проектов, придается большое значение.

Сложный характер рабочего процесса ЦК делает неизбежным использование экспериментальных данных в процессе их проектирования. Несмотря на успехи методов компьютерного проектирования и оптимизации, наиболее быстрым и надежным остается проектирование с использованием характеристик заранее разработанных и испытанных модельных ступеней. Экспериментальная отработка модельных ступеней – это сложный и дорогостоящий процесс. В распоряжении отечественных производителей имеются ряды модельных ступеней, которые во многом устарели. Создание новых рядов высокоэффективных модельных ступеней сейчас представляется затруднительным по экономическим соображениям.

На кафедре КВХТ СПбГПУ создан Метод универсального моделирования, который позволяет осуществлять оптимальное газодинамическое проектирование и расчет характеристик центробежных компрессоров без проведения экспериментов.

Комплекс программ Метода универсального моделирования широко применяется на практике. С его помощью создано новое поколение центробежных нагнетателей и СПЧ для газовой промышленности. Новое поколение машин обеспечивает ряд важных преимуществ. По газодинамическим проектам кафедры КВХТ выпущено более 20 типов компрессоров и СПЧ нового поколения. В промышленности РФ и других стран в 2010 г. работает около 430 центробежных компрессоров и СПЧ более пятидесяти типов общей установленной мощностью 4,3 млн. кВт [3, 15] (см. приложение 1).

### **Содержание работы**

До применения Метода универсального моделирования в проектной практике промышленные центробежные компрессоры не создавались без экспериментальной проверки их проточных частей на моделях. В результате проектной деятельности кафедры КВХТ СПбГПУ испытаны и поставлены потребителям десятки типов компрессоров, ступени которых не имеют испытанных аналогов. Это позволило впервые путем уточненного расчета характеристик создать банк данных модельных ступеней, что само по себе можно считать научной новизной.

На основе опыта использования Метода универсального моделирования в проектной практике установлено направление его усовершенствования и предложены новые научные подходы в том числе:

- предложена новая зависимость для учета влияния условного числа Россби на положение точки отрыва и потери смещения;

- разработана методика учета влияния протечек в лабиринтном уплотнении покрывающего диска на параметры потока в рабочем колесе;

- предложена усовершенствованная методика схематизации диаграммы скоростей на лопатках рабочего колеса, что позволило рассчитывать КПД ступеней в широком диапазоне расчетных значений коэффициентов напора и расхода единым набором эмпирических коэффициентов;

- уточнено влияние сжимаемости в расчете ударных потерь и в расчете параметров потока в контрольных сечениях ступени;

- при расчете потерь поверхностного трения, вместо произвольных эмпирических коэффициентов моделирования обтекания гидравлически гладкой поверхности, использованы эмпирические формулы для расчета коэффициента силы сопротивления трения гладкой и шероховатой поверхностей, что дало возможность корректного моделирования характеристик при особо высоких значениях критерия Рейнольдса, когда течение приобретает автомодельный характер;

- сделан уточненный расчет параметров потока во входном патрубке. Это позволило учесть потери напора во входных патрубках модельных ступеней, что повысило точность определения эмпирических коэффициентов модели потерь [8, 14].

Набор алгебраических уравнений математической модели потерь, математической модели напора и термодинамических уравнений, описывающих состояние газа в контрольных сечениях, не сложен [11]. Однако затрата времени на решение простейшей прямой задачи – расчет параметров потока в ступени – определяется необходимостью проведения десятков итерационных процессов. Эта необходимость определяется двумя обстоятельствами:

1. Для расчета параметров потока при последовательном переходе газа из одного сечения в другое, необходимо знать потери напора. Эти потери зависят от состояния газа в контрольных сечениях, которое зависит от потерь.

2. Хотя размеры контрольных сечений известны, размер проходных сечений для потока зависит от его направления в контрольном сечении, которое для большинства сечений неизвестно. Поэтому для определения скорости потока в сечении также требуются итерации.

Расчет характеристик ступени производится не аналитически, а есть сумма расчетов в отдельных точках общим числом превышающих сотню у ступеней с широкой зоной устойчивой работы, поэтому с учетом возможности тогдашних ЭВМ в расчетные алгоритмы вносились упрощения и приближения, которые по экспертной оценке должны мало влиять на результаты расчета. Сейчас экономия времени расчета не актуальна. Отсюда вытекает первое направление развития Метода – исключение всех очевидных упрощающих допущений в процессе термогазодинамических расчетов. Например, в прежних версиях не учитывалось изменение плотности газа в косом срезе лопаточных решеток на нерасчетных режимах. Как оказалось, точный расчет

параметров в косом срезе с учетом потерь напора существенно отличается от приближенного расчета даже при умеренных числах Маха.

Второе направление связано с накоплением опыта работы с компьютерными программами, лучшим пониманием процесса, что позволило уточнить физические модели и их математическое описание. Было предпринято специальное расчетное исследование, результаты которого использованы в новых алгоритмах. Другой пример – в ранних версиях при расчете потерь трения исходные уравнения основывались на модели гидравлически гладкой поверхности. В представляемой версии введен учет шероховатости.

Третье направление – это развитие предпроцессоров и постпроцессоров с целью повышения информативности и более удобного представления результатов. Разумеется, наиболее принципиальное влияние на повышение точности предсказания характеристик оказали два первых направления развития программ. Особенности термогазодинамического алгоритма рассмотрены на примере программы для расчета характеристик ступени.

Использование Метода универсального моделирования позволило исключить вовсе, проверку проектных решений модельными испытаниями. Создаваемые с помощью Метода компрессоры нового поколения соответствуют высшим стандартам газодинамической эффективности. Метод пользуется широкой популярностью благодаря многочисленным публикациям, докладам на международных конференциях [4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 17]. Ряд промышленных предприятий России и зарубежных стран приобрели некоторые из программ Метода универсального моделирования для проведения своих расчетов.

Компрессоры нового поколения созданы при минимальных затратах на отработку модельных ступеней. Специально для компрессоров и СПЧ газовой промышленности на кафедре КВХТ отработаны и испытаны только три модельные ступени, хотя в машинах нового поколения десятки ступеней. Хорошая точность математического моделирования рабочего процесса позволила обеспечить соответствие заданных параметров в расчетной точке.

На рис. 1 в качестве примера сопоставлены газодинамические характеристики по проекту и измеренные при приемосдаточных испытаниях. В расчетной точке обеспечено заданное отношение давлений. Измеренный КПД несколько выше ожидаемого по проекту. Измеренная зона работы шире и вправо и влево от расчетной точки. Проектные данные более оптимистичны по максимально достижимой величине отношения давлений, т.е. реальная напорная характеристика более пологая.

Представленный результат типичен в том смысле, что метод обеспечивает получение заданного отношения давлений в расчетной точке при КПД, равном, или несколько большем, чем предсказанный математической моделью. На нерасчетных режимах отличие от рассчитанных характеристик в некоторых случаях довольно значительное, но фактическая зона работы обычно даже шире.

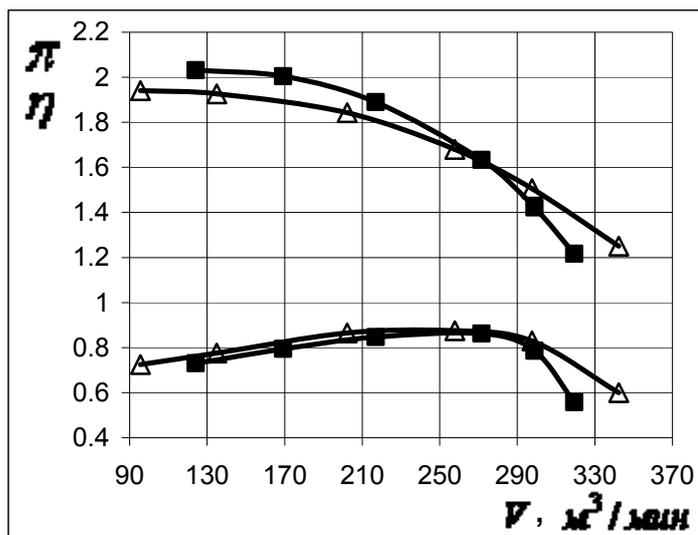


Рис. 1. Сравнение характеристик четырехступенчатого центробежного компрессора с расчетным отношением давлений 1,6: ■ – проект, △ – данные испытаний

Требования технического задания по отношению давлений были удовлетворены во всех случаях. Принятый запас в 2% оказался достаточным. Европейский стандарт ISO 5389:1991(E) требует от нового компрессора безусловного достижения заданного отношения давлений при заданном расходе, но допускает при этом перерасход мощности 4%. Это равнозначно условию, что действительный КПД может быть на 4% ниже КПД по проекту.

Газодинамическое проектирование ЦК и СПЧ на основе набора модельных ступеней остается наиболее быстрым и надежным способом. Проблема заключается в том, что для проектирования компрессоров разного назначения нужны большие серии модельных ступеней, перекрывающие широкий диапазон конструктивных и газодинамических параметров. Согласно методике проектирования, изложенной в работах [3, 11] такими параметрами являются: условный коэффициент расхода

$$\Phi_{расч} = \frac{\bar{m}}{\rho_0 \pi^2 u_2}; \text{ коэффициент теоретического напора } \psi_{Трасч} = \frac{c_{u2}}{u_2}; \text{ втулочное}$$

отношение  $\bar{D}_{вн} = D_{вн} / D_2$ ; радиальная протяженность диффузора  $\bar{D}_4 = D_4 / D_2$ .

Предприятия-изготовители располагают наборами из десятков модельных ступеней. Проблема в том, что и эти наборы не всегда перекрывают диапазон нужных параметров ступеней. Другая проблема – модельные ступени устаревают и начинают уступать по КПД и зоне работы ступеням нового поколения.

Современный процесс разработки модельных ступеней состоит из нескольких этапов: газодинамический проект с оптимизацией формы проточной части; испытание модельной ступени; внесение изменений для обеспечения параметров в расчетной точке, повышения КПД и расширения зоны работы; повторные испытания – до получения нужного результата (испытания до 18 вариантов); снятие газодинамических

характеристик окончательного варианта ступени в нужном диапазоне чисел Маха (испытания при разной окружной скорости).

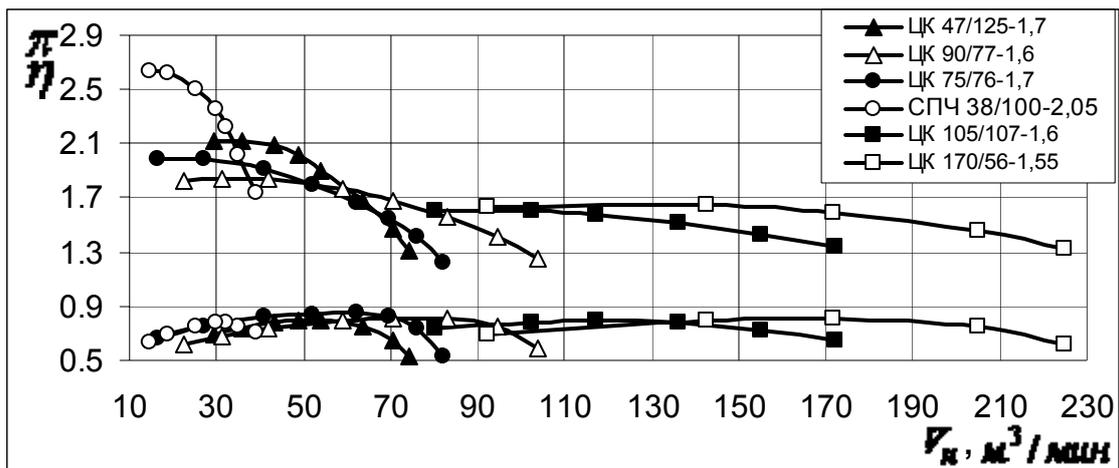
Совершенствование методов оптимального проектирования сокращает этапы экспериментальной проверки, что удешевляет проект. Совершенствование методов проектирования снизило затраты на разработку модельных ступеней, которые стабилизировались на уровне 150-250 тыс. дол. США. Вместе с тем применяемые в США методы проектирования все еще требуют экспериментальной проверки двух-шести вариантов проточной части. В связи с этим создание серии из десятков модельных ступеней и в настоящее время является очень дорогим и длительным процессом.

Положительный опыт создания машин нового поколения Методом универсального моделирования открывает возможность получения характеристик модельных ступеней без проведения дорогостоящих физических экспериментов. Наличие измеренных характеристик компрессоров при их прямо-сдаточных испытаниях открывает путь достаточно надежного определения газодинамических характеристик составляющих их ступеней. Для этого необходимо согласовать измеренные газодинамические характеристики компрессоров с характеристиками, рассчитанными Методом математического моделирования. Т. е., применительно к каждому из анализируемых компрессоров и СПЧ нужно несколько изменить эмпирические коэффициенты математических моделей расчета КПД и напора. Следует добиться наилучшего совпадения характеристик по данным ПСИ и расчету с откорректированными коэффициентами, а именно: отношения давлений  $\pi = \frac{P_k}{P_n} = f(\Phi)$ ;

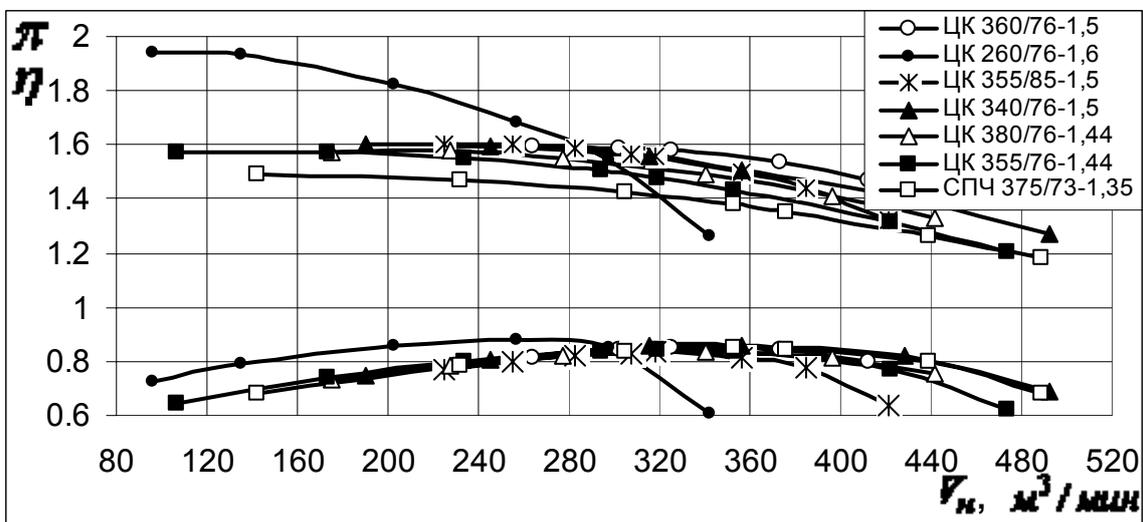
коэффициента полезного действия  $\eta = \frac{H_p}{H_i} = f(\Phi)$ . Политропный напор определяется измеренным отношением давлений. Затраченный напор измеряется по повышению температуры газа  $H_i = C_p \Delta T_i$ , поэтому моделирование должно обеспечить совпадение измеренного и рассчитанного повышения температуры  $\Delta T_i = T_k - T_n$ .

Точность расчета характеристик компрессора с большой степенью вероятности гарантирует соответствие действительных характеристик ступеней с расчетом по откорректированным коэффициентам. Такой результат позволяет использовать ступени испытанных компрессоров как модельные ступени при создании новых машин, хотя испытания собственно этих ступеней не проводились.

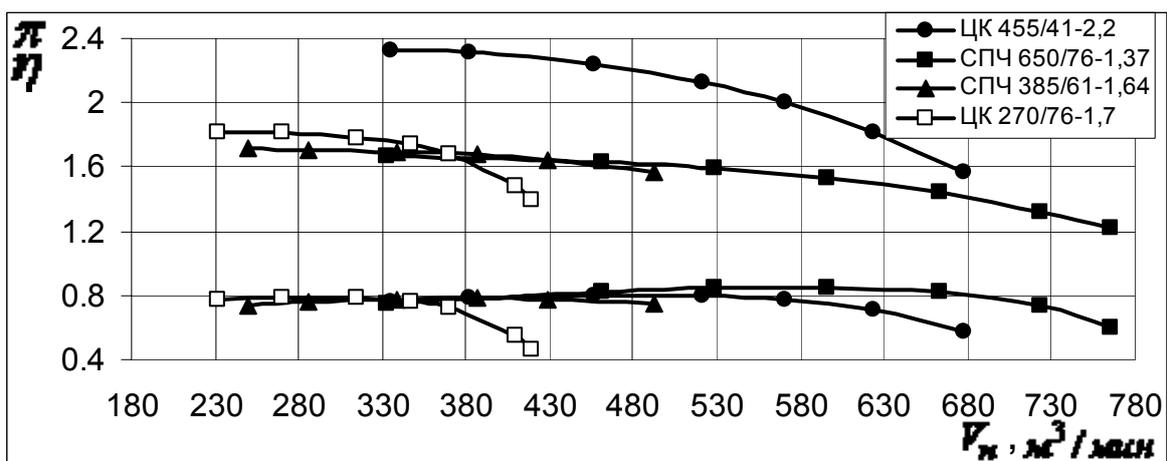
Точность расчета характеристик компрессора с большой степенью вероятности гарантирует соответствие действительных характеристик ступеней с полученными по расчету с откорректированными коэффициентами. Такой результат позволяет использовать ступени испытанных компрессоров как модельные ступени при создании новых машин. Для таких ступеней используется рабочий термин «виртуальные модельные ступени».



а)  $\bar{V}_{\text{норм}} = 10 - 150 \text{ м}^3 / \text{мин}$



б)  $\bar{V}_{\text{норм}} = 150 - 350 \text{ м}^3 / \text{мин}$



в)  $\bar{V}_{\text{норм}} = 300 - 650 \text{ м}^3 / \text{мин}$

Рис. 2. Газодинамические характеристики ЦК и СПЧ с оптимальной производительностью

Для создания базы модельных ступеней имелись данные по испытаниям 16 компрессоров и СПЧ с числом ступеней 2-6 (всего 49 ступеней). Для первых 16 ступеней рассчитаны характеристики с учетом входного патрубка и без учета входного патрубка – промежуточная ступень. С учетом этого могут быть получены характеристики 65 ступеней, из которых: 16 концевых ступеней с кольцевыми сборными патрубками; 16 всасывающих ступеней – промежуточные ступени + входной патрубок; 33 промежуточных ступеней с безлопаточными и лопаточными диффузорами.

Компрессоры и СПЧ перекрывают широкий диапазон параметров по производительности и отношению давлений, что показывают приведенные на рис. 2 характеристики. Все представленные машины – это машины нового поколения, которые прошли газодинамические приемо-сдаточные испытания.

Суть процесса создания набора модельных ступеней вытекает из структуры Метода универсального моделирования, объектом которого являются все типы ступеней и компрессоров всех возможных схем. При разработке виртуальных ступеней использованы данные ПСИ только компрессоров простой схемы – одновальных, без промежуточного охлаждения. На примере ЦК 16/85-1,5: ЦК (СПЧ, НЦ) – центробежный компрессор или сменная проточная часть, нагнетатель центробежный; 16 – расчетная (оптимальная) объемная производительность на входе  $\bar{V}_H$  (м<sup>3</sup>/мин); 85 – конечное давление в барах; 1,5 – отношение давлений.

Для соответствия рассчитанных напорных характеристик действительным, достаточно, чтобы правильно рассчитывалось повышение температуры в проточной части:  $\Delta T_{i\text{расч.}} = \Delta T_{i\text{изм}} = H_i / C_p$ . Зависимость  $H_i = f(\bar{V}_H)$  была бы близка к линейной для идеального компрессора, в котором отсутствуют потери напора, а число лопаток бесконечно. В реальных компрессорах и ступенях число лопаток конечно, наличие вязкости и сжимаемости, дискового трения и протечек в лабиринтных уплотнениях, в принципе, делает зависимость  $\Delta T_i = f(\bar{V}_H)$  нелинейной. Испытания модельных ступеней и промышленных компрессоров показывают, однако, что зависимость внутреннего напора от объемного расхода  $H_i = f(\bar{V}_H)$  практически линейная. Исключение составляет режим максимального расхода, на котором КПД стремится к нулю, а отношение плотностей  $\rho_k / \rho_n$  становится меньше единицы. В основной части характеристики, перечисленные выше факторы, частично взаимно компенсируются, что упрощает моделирование.

Модель напора в Методе универсального моделирования содержит формулы и два эмпирических коэффициента, которые позволяют рассчитать напор в расчетной точке (коэффициент  $K_\mu$ ), и наклон линейной напорной характеристики (коэффициент  $X_{\psi T_0}$ ). В большинстве случаев надлежащий подбор коэффициентов  $K_\mu$  и

$X_{\psi T_0}$  обеспечивает высокую точность моделирования, что демонстрируют примеры на рис. 3 [4, 5].

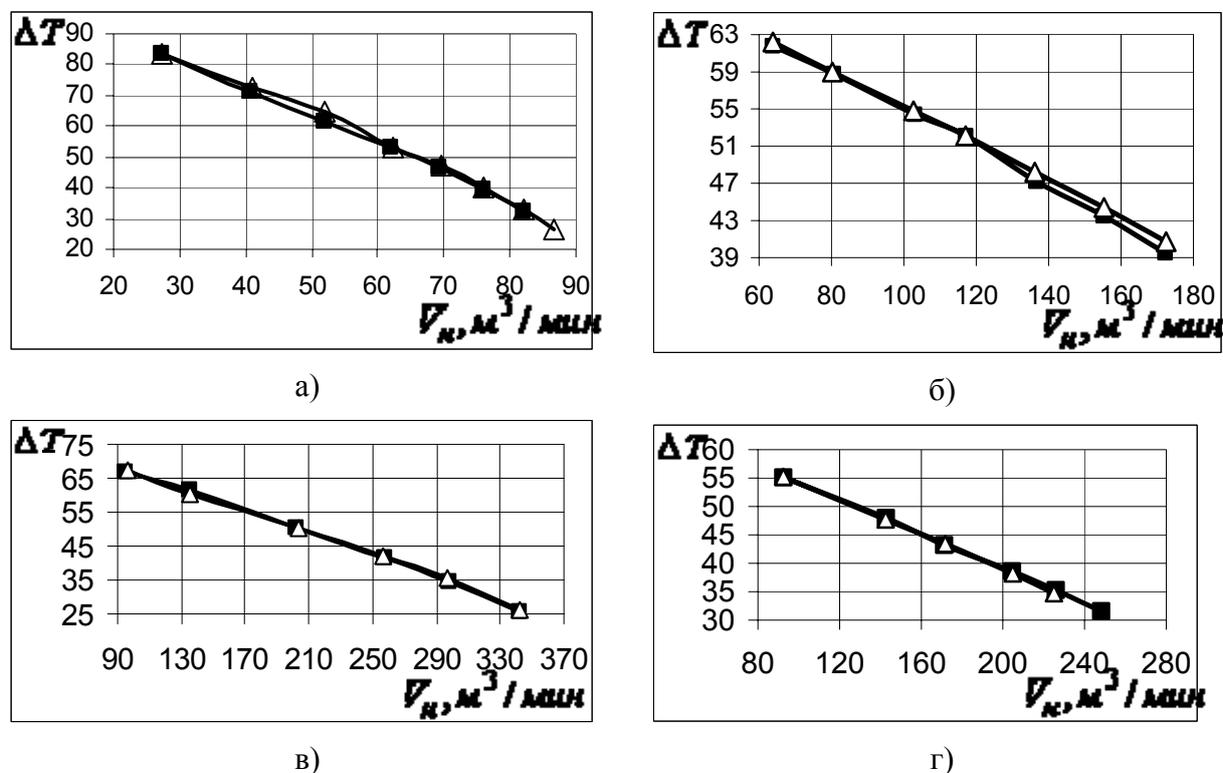


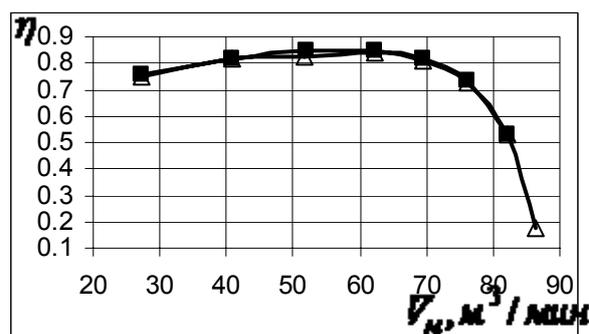
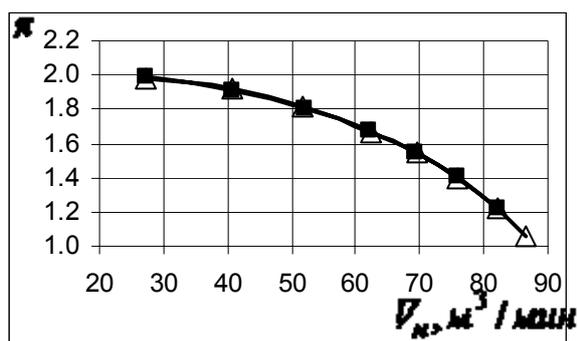
Рис. 3. Сопоставление измеренного и рассчитанного повышения температуры. а) ЦК 75/76-1,7; б) ЦК 105/107-1,6; в) ЦК 260/76-1,6; г) ЦК 170/56-1,55;  $\Delta$  – данные проекта;  $\blacksquare$  – данные испытаний

Для моделирования характеристики КПД и отношения давлений необходимо рассчитать потери напора Методом универсального моделирования. При этом основной принцип: суммирование потерь по месту их возникновения. Потери в компрессоре складываются из суммы потерь во входном парубке и в группе ступеней. При суммировании потерь следует иметь в виду возможность взаимного влияния элементов проточной части друг на друга.

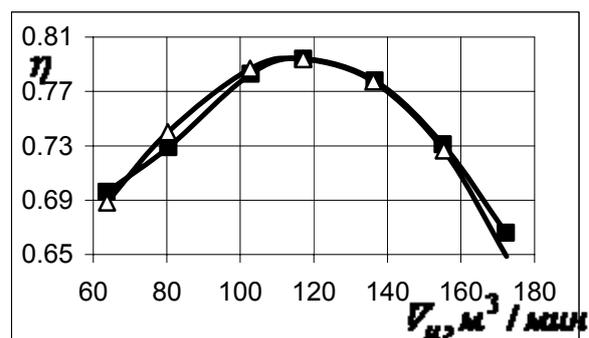
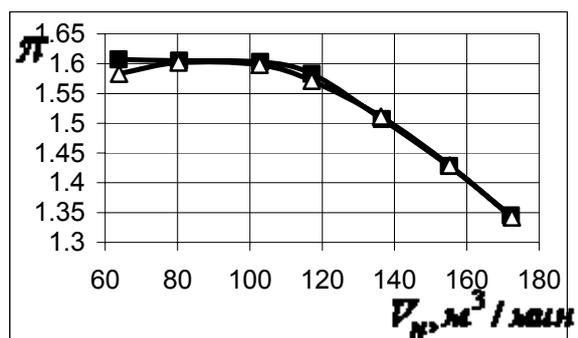
Взаимное влияние последовательно расположенных центробежных ступеней практически отсутствует при выполнении определенных приемов проектирования межступенчатых переходных каналов. При делении элементов ступени на основные элементы взаимное влияние: рабочее колесо-диффузор, диффузор-обратно-направляющий аппарат приближенно учитывается. Анализ опытных данных показал, что основная неравномерность потока в контрольных сечениях связана с радиальной скоростью, т.е. влияние определяется кинетической энергией этой составляющей скорости.

На примере компрессоров ЦК 75/76-1,7, ЦК 105/107-1,6 и ЦК 455/41-2,2 сопоставлены результаты прямо-сдаточных испытаний и моделирования

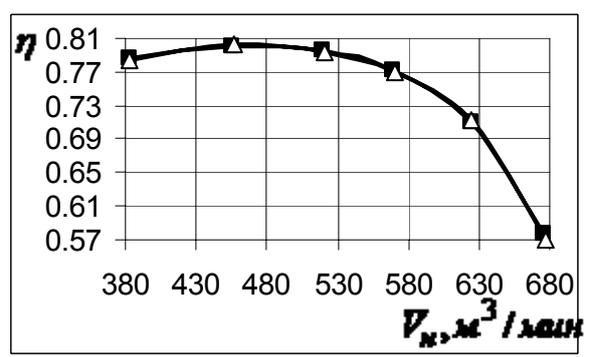
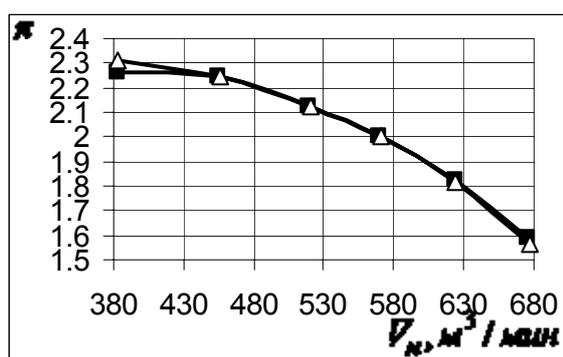
характеристик Методом универсального моделирования в результате корректировки эмпирических коэффициентов (рис. 4). При анализе соответствия-несоответствия данных испытания и расчетов следует учитывать неизбежный «разброс» экспериментальных точек относительно плавных кривых газодинамических характеристик. При подборе эмпирических коэффициентов отдавалось предпочтение тем значениям, при которых рассчитанные характеристики проходили ниже измеренных значений КПД и отношения давлений.



а)



б)



в)

Рис. 4. Сопоставление измеренных и рассчитанных отношений давления и КПД для компрессоров: а) ЦК 75/76-1,7, б) ЦК 105/107-1,6; в) ЦК 455/41-2,2:

Δ – данные проекта; ■ – данные испытаний

В названиях ступеней представлены их основные параметры:

- буквы – В – всасывающая, П – промежуточная, К – концевая;
- первые три цифры, например «031», означают, что  $\Phi_{opt} = 0,03$ ;
- три цифры после косой черты, например /418, означают, что  $\psi_{T_{opt}} = 0,418$ ;
- буква Л означает, что ступень имеет лопаточный диффузор (при отсутствии буквы Л – безлопаточный диффузор).

Параметры модельных ступеней лежат в широком диапазоне параметров проектирования  $\Phi_{opt} = 0,025 - 0,064$ ,  $\psi_{T_{opt}} = 0,401 - 0,849$ ,  $D_{вн} / D_2 = 0,258 - 0,483$ ,  $D_4 / D_2 = 1,316 - 1,720$ , максимальный КПД  $\eta_{max} = 0,763 - 0,887$ , отношение расхода на границе помпажа и оптимального расхода  $\Phi_{крит} / \Phi_{opt} = 0,304 - 0,93$ . Наибольший КПД (достигающий практически 89%) получен у ступени П 052/521. Ступень имеет оптимальное безразмерное число оборотов, что обеспечено достаточно большим коэффициентом расхода и небольшим коэффициентом напора. Ступень имеет безлопаточный диффузор большой радиальной протяженности  $D_4 / D_2 = 1,720$ .

На рис. 5 сопоставлены газодинамические характеристики модельной ступени нового поколения П059/508 и лицензионной ступени фирмы «Кларк». На рис. 6 для примера показаны характеристики нескольких модельных ступеней.

Разработанный банк данных в составе 65 модельных ступеней позволяет существенно повысить надежность газодинамического проектирования и практически избежать ошибок.

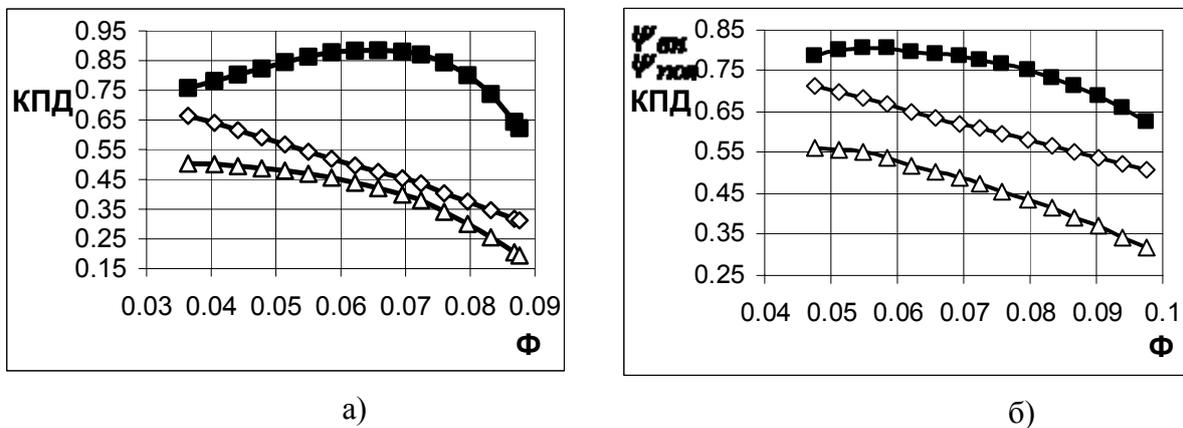


Рис. 5. Сопоставление газодинамических характеристик модельной ступени нового поколения П059/508 (а) и лицензионной ступени П063/638 (б) фирмы «Кларк»:

$$\Delta - \psi_{пол}, \blacksquare - \eta, \diamond - \psi_{вн}$$

Достигнутый КПД ступеней с оптимальным сочетанием параметров проектирования и радиальных размеров составляет около 90%, что практически является границей возможного, так как потери трения газа о поверхности проточной части и внутренние протечки нельзя свести к нулю ни в каком случае. Зона устойчивой работы ступеней так же достигла рекордной ширины.

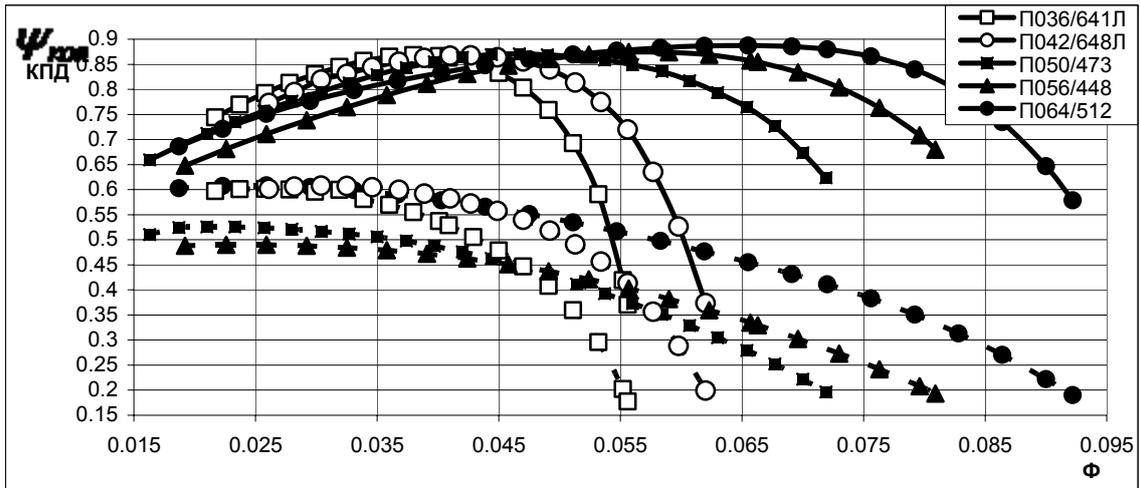


Рис. 6. Безразмерные характеристики нескольких виртуальных ступеней:  
 \_\_\_ – КПД, --- – коэффициент политропного напора [8, 12]

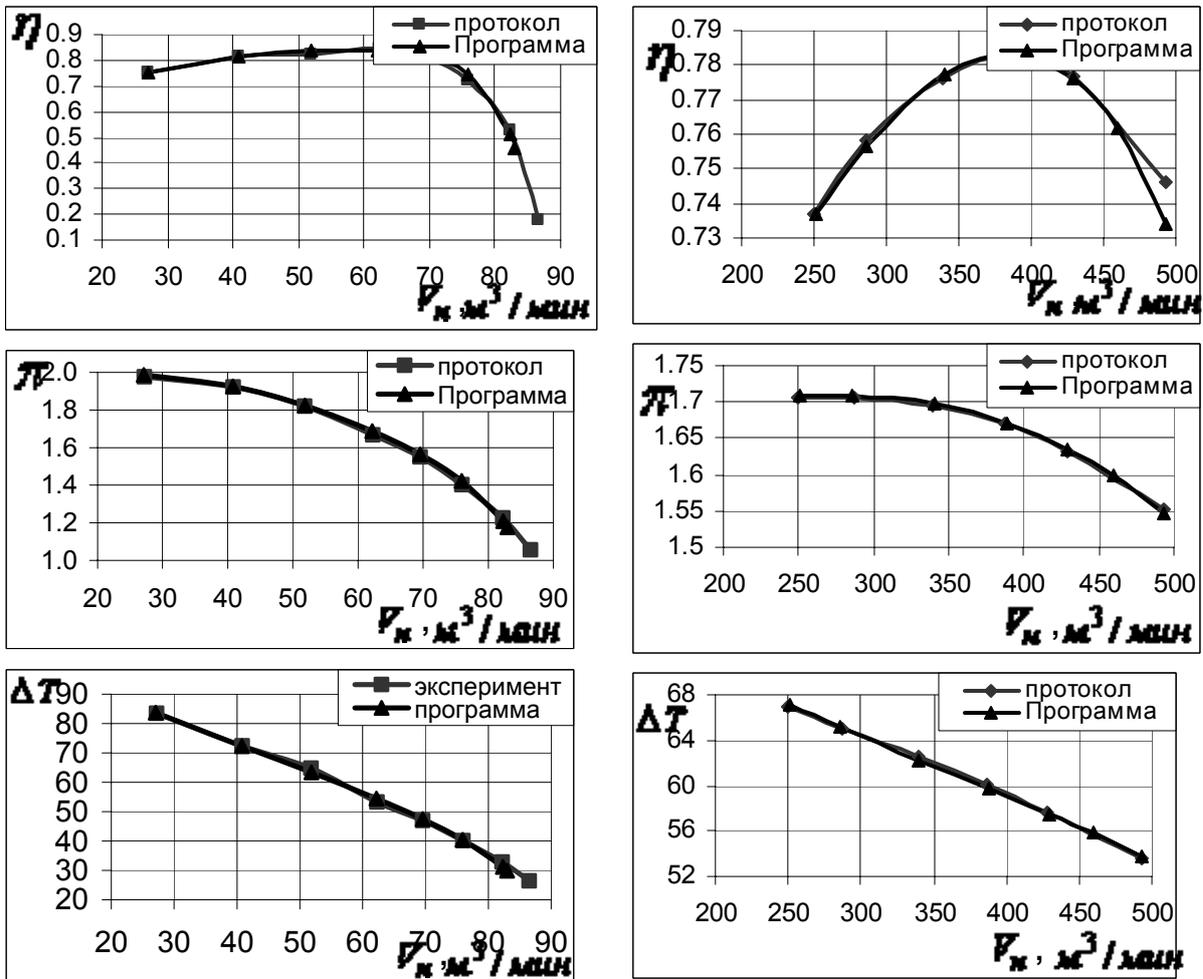


Рис. 7. Характеристики компрессоров ЦК 56/76-1,77 (слева) и СПЧ 385/61-1,67 (справа) по результатам испытаний и по программе 5-го поколения. Вверху – КПД, в середине – отношение давлений, внизу – повышение температуры [14]

Представленная работа в практическом плане решает задачу создания виртуальных модельных ступеней. Работа по времени велась параллельно с отработкой моделей и программ 5-го поколения.

Изложенное демонстрирует ряд преимуществ модели и программ 5-го поколения. В то же время рассчитанные с их помощью характеристики модельных ступеней с прикладной точки зрения не сильно отличаются от характеристик.

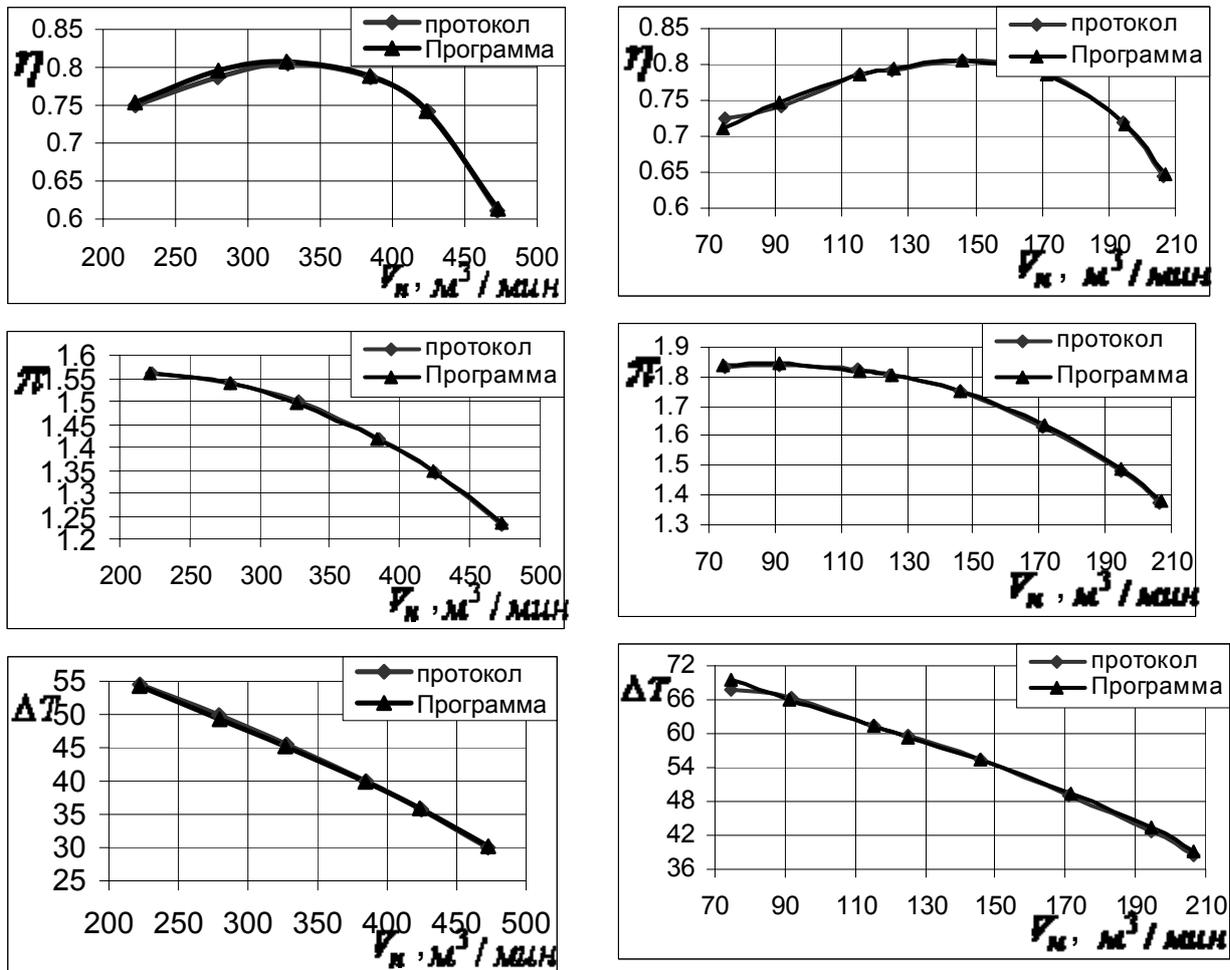


Рис. 8. Характеристики СПЧ 329/28-1,49 (слева) и СПЧ 146/71-1,75 (справа) по результатам испытаний («протокол») и по программе 5-го поколения. Вверху – КПД, в середине – отношение давлений, внизу – повышение температуры [8, 14]

Наиболее важное преимущество расчетов по модели и программам 5-го поколения – учет влияния шероховатости поверхностей на потери напора. Это важно, так как все использованные результаты испытания компрессоров и СПЧ получены при атмосферных условиях на входе. Работа в составе газопроводов с точки зрения теории подобия отличается более высокими числами Рейнольдса, на полтора порядка в среднем. Если исходить из концепции гидравлически гладких поверхностей, как в предыдущих моделях, то в натуральных условиях следует ожидать роста КПД и полезного напора на 2-3%. Вероятнее всего, с учетом шероховатости поверхностей в натуральных

условиях течение станет автомодельным по критерию Рейнольдса. Т. е., при соответствующей комбинации значений относительной шероховатости и чисел Рейнольдса потери не будут уменьшаться с ростом чисел  $Re_u$ . Учет шероховатости вносит определенность в соотношение между рассчитанными по «воздушным» испытаниям характеристиками «виртуальных» ступеней и их трансформацией при работе в натурных условиях.

С принципиальной точки зрения ожидаемое преимущество связано с тем, что расчет максимального КПД ступеней поколения 20СЕ, часть из которых использована в проектах компрессоров нового поколения, осуществляется единым набором эмпирических коэффициентов. Поэтому и для расчета «виртуальных» ступеней по программам 5-го поколения используются наборы эмпирических коэффициентов, в минимальной степени отличающиеся друг от друга. Это повышает степень достоверности расчетов. Кроме того, обработка экспериментальных данных по программам 5-го поколения позволила в лучшей степени согласовать данные испытаний и расчетов благодаря большей гибкости усовершенствованной модели.

На рис. 7-8 представлено сопоставление рассчитанных и экспериментальных характеристик для нескольких компрессоров.

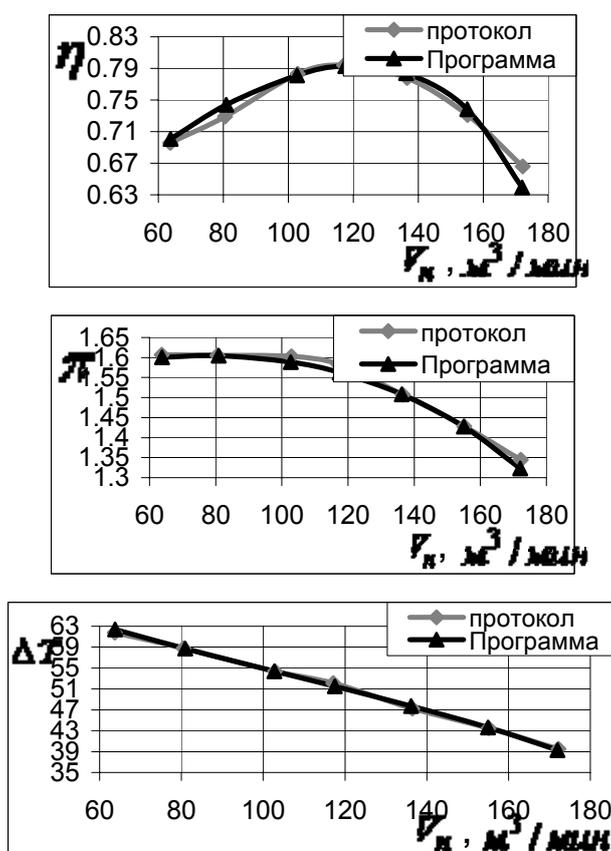


Рис. 9. Характеристики ЦК 121/107-1,55 по результатам испытаний и по программе 5-го поколения. Вверху – КПД, в середине – отношение давлений, внизу – повышение температуры

[8, 14]

Рассмотрим возможность применения модельных ступеней на следующем примере. Это новый по времени выпуска пятиступенчатый компрессор с отношением давления 1,6. Проточная часть составлена изготовителем из модельных ступеней фирмы Кларк, США, приобретенных министерством химического и нефтяного машиностроения в рамках лицензии на производство центробежных компрессоров высокого давления. Материалы по этой машине включены для возможности сопоставления с отечественными компрессорами нового поколения. Сопоставление газодинамических характеристик представлено на рис. 9.

Результаты моделирования удовлетворительные, т.к. при испытаниях допущены неточности измерения давлений и частоты вращения ротора. Однако, сравнение с отечественными многоступенчатыми компрессорами на аналогичное отношение давлений убедительно свидетельствует об их преимуществах, рис. 10.

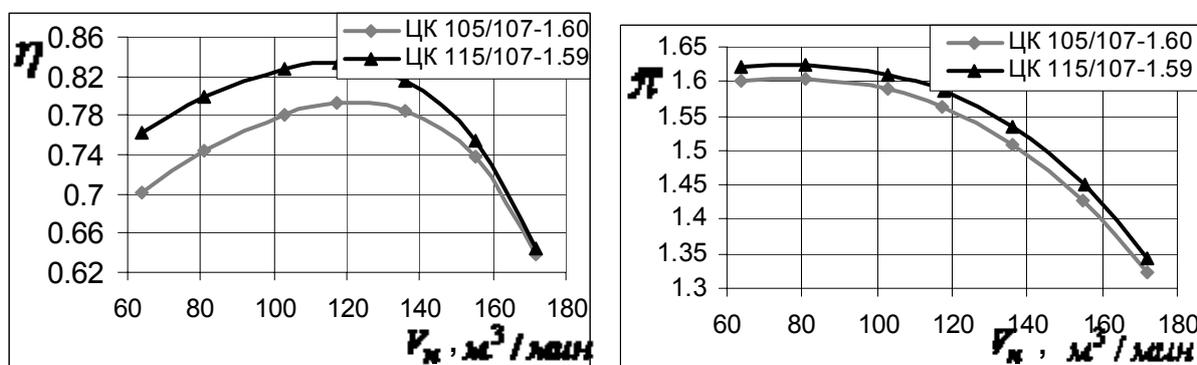


Рис. 10. Сопоставление расчетных характеристик компрессора ЦК 121/107-1,55 (лицензионные ступени) и ЦК 115/107-1,59 (модельные ступени) [8, 14]

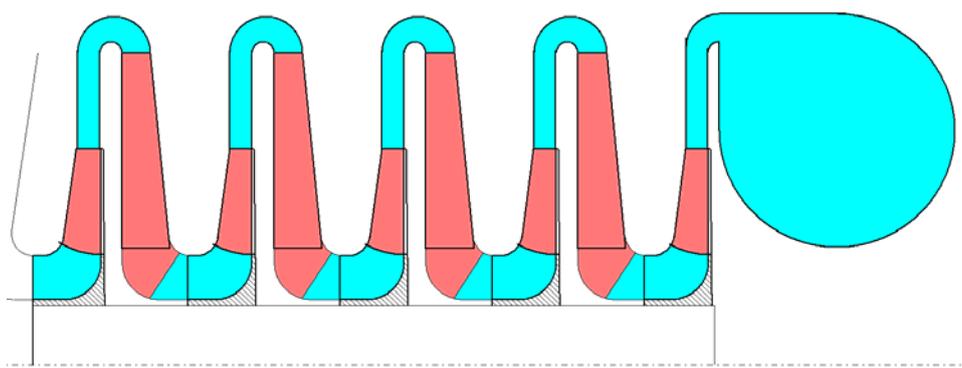


Рис. 11. Схема проточной части компрессора ЦК 128/107-1,585 на базе модельной ступени П 059/495

Для более конкретного составления Методом универсального моделирования была рассчитана проточная часть машины на аналогичные параметры. Количество ступеней и габариты проточной части идентичны. Расчет характеристик проведен при одинаковом состоянии уплотнений, шероховатости поверхностей и одинаковой потере КПД 1-й ступени из-за наличия входного патрубка, рис. 11. Название этого

«виртуального» компрессора ЦК 115/107-1,59. Его характеристики сопоставлены с расчетными характеристиками компрессора с лицензионными ступенями, рис. 12.

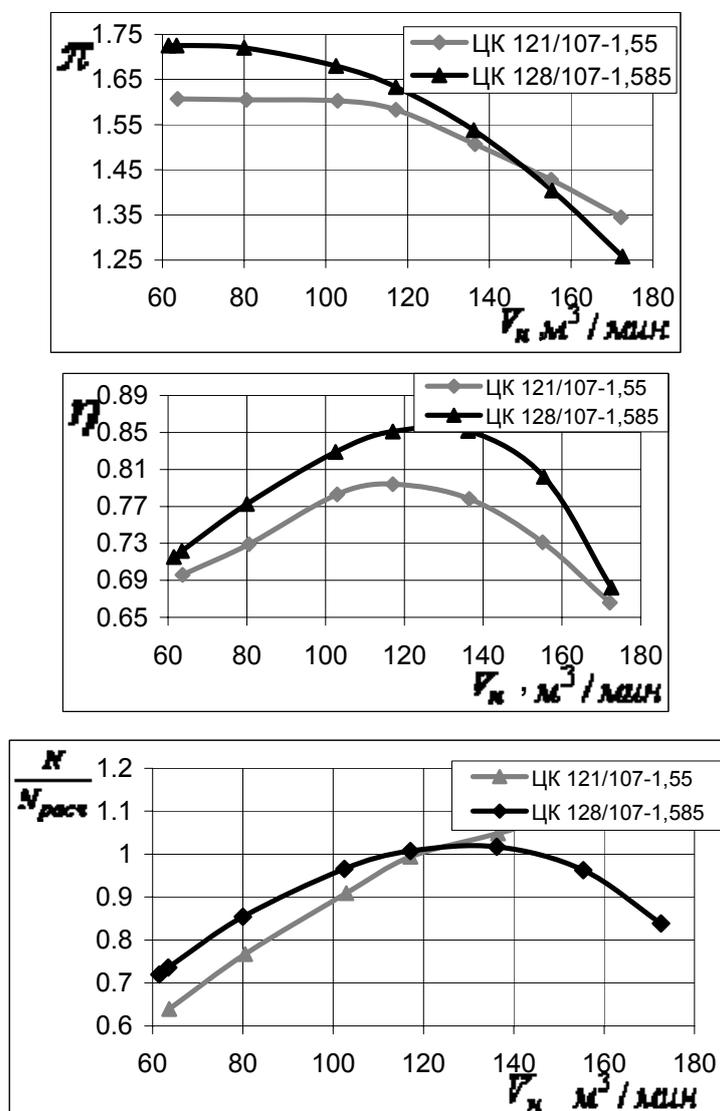


Рис. 12. Сопоставление измеренного повышения давления, КПД и потребляемой мощности компрессора ЦК 121/107-1,55 с рассчитанным компрессором ЦК 128/107-1,585

Максимальный КПД спроектированного компрессора на базе модельной ступени П 059/495 больше на 6%, чем у компрессора на базе лицензионных модельных ступеней. Обращает внимание разный характер протекания кривых отношения давлений и потребляемой мощности (потребляемая мощность представлена в виде отношения текущего значения мощности к значению в расчетной точке).

У сравнительно высоконапорных ступеней компрессора ЦК 121/107-1,55 отношение давлений при малом расходе незначительно возрастает по сравнению с расчетной точкой. У ступени с меньшим коэффициентом напора компрессора ЦК 128/107-1,585 напорная характеристика крутая, поэтому при малых расходах

отношение давлений возрастает. Специалисты газотранспортных предприятий считают такой вид характеристики более предпочтительным, так как при этом меньше опасность развития вращающегося срыва и помпажных явлений при малых расходах. Из-за крутизны напорной характеристики отношение давлений быстро уменьшается при расходе больше расчетного. Однако эти режимы не типичны для работы компрессоров ГПА. У компрессора ЦК 121/107-1,55 потребляемая мощность монотонно возрастает при увеличении производительности. Это создает неприемлемые условия работы приводной газовой турбины, мощность которой соответствует мощности на расчетном режиме. В рассчитанном диапазоне расходов КПД компрессора ЦК 128/107-1,585 выше примерно на 5%. Приведенный пример ярко демонстрирует преимущества новых модельных ступеней перед уже имеющимися.

Вся информация по модельным ступеням хранится в электронном виде в папке под названием «Модельные ступени», а также в программе «IDENT». Для каждой ступени имеется собственная папка со следующими файлами:

- OPTIMSTG.TMP – размеры проточной части – относительные линейные размеры в контрольных сечениях (по отношению к диаметру РК), число и относительная толщина лопаток, лопаточные углы на входе и выходе, относительная шероховатость поверхностей РК, диффузоров, ОНА или ВУ (по отношению к диаметру РК), тип и основные (относительные) размеры выходного устройства концевых ступеней;

- OPTIM2.TMP – условные числа Маха и Рейнольдса, показатель изоэнтропы, которые соответствуют режиму максимального КПД компрессора при приемосдаточных испытаниях;

- ZZ2PSI0.PSI – параметры, характеризующие напорную характеристику – коэффициенты  $K_\mu$  и  $\psi_{T_0}$ , коэффициент центра давления  $K_{цд}$ . Напорная характеристика представляется в виде линейной зависимости  $\Psi_T = f(\varphi'_2)$ ;

- MMDATBX.INL – поправочные коэффициенты для расчета потерь напора во входном патрубке всасывающих ступеней и выходном патрубке концевых ступеней.

В общей для всех ступеней папке «Виртуальные модельные ступени» имеется программа расчета ступеней CSPM-G5-E, по которой при необходимости рассчитываются характеристики и безразмерные параметры потока в контрольных сечениях при условиях работы в составе того или иного проектируемого компрессора. Возможности программы позволяют анализировать влияние на характеристики и параметры условий работы в безразмерном виде, т.е. через критерии подобия  $M_u, Re_u, k$ . С определенной осторожностью можно оценить при необходимости влияние отклонения от геометрического подобия. Например, часто из исходной ступени получают ступени с меньшей производительностью путем пропорционального уменьшения высоты лопаток РК, ЛД, ОНА, ширины БЛД. В данном случае расчет показал, что уменьшение проходных сечений РК, БЛД и ОНА на 19% смещает

оптимальный режим с  $\Phi_{opt} = 0,055$  до  $\Phi_{opt} = 0,044$ , т.е. на 25% при некотором снижении КПД и уменьшении запаса по помпажу  $\Phi_{кр} / \Phi_{opt}$ , что соответствует известным результатам физических экспериментов.

В результате уточнения алгоритмов расчета и модели потерь разработаны программы 5-го поколения Метода универсального моделирования, как для промышленного проектирования центробежных компрессоров (программа ССРМ-G5E) и ступеней (программа CSPM-G5E), так и для учебного процесса кафедры KBXT (программа РСХЦК-Г5). Все программы имеют акты внедрения и непосредственно используются при проектировке новых компрессоров, ступеней и СПЧ.

### Заключение

В процессе работы решены следующие задачи:

1. Произведен анализ состояния эффективности методов математического моделирования;
2. Разработаны теоретические положения совершенствования методов математического моделирования газодинамических характеристик;
3. Собрана информация о результатах испытания компрессоров нового поколения;
4. Произведена идентификация математических моделей напора и потерь напора по программам 4-го поколения, по которым выполнялись проекты компрессоров и по программам 4-го поколения для наиболее точного описания результатов испытания компрессоров;
5. Создан банк модельных ступеней для использования в проектах новых компрессоров и компьютерная программа для расчета их характеристик при работе в составе проточных частей проектируемых компрессоров.

С практической точки зрения в результате работы дополнительное теоретическое обоснование получил Метод универсального моделирования, расширены его возможности для оптимального проектирования компрессоров промышленного назначения.

В процессе работы созданы компьютерные программы Метода универсального моделирования 5-го поколения, обладающие более высокой точностью и универсальностью применения в проектной практике.

По программе Метода универсального моделирования 5-го поколения (программа ССРМ-G5E) произведено уточненное моделирование характеристик 16-ти испытанных компрессоров. По результатам моделирования составлен банк данных из 67-ми ступеней (16 всасывающих, 35 промежуточных и 16 концевых) с оптимальными параметрами в диапазоне  $\Phi_{opt} = 0,023-0,1$ ,  $\psi_{Topt} = 0,37-0,70$ ,  $D_{вм} / D_2 = 0,258-0,483$ ,  $D_4 / D_2 = 1,23-1,72$ ,  $\eta = 0,742-0,888$ ,  $\Phi_{крит} / \Phi_{opt} = 0,376-0,731$ ,  $M_u = 0,6$ .

Условный экономический эффект от выполнения работы составляет примерно 2,0 млн. долларов США.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Васильев, Ю.С., Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В. Оптимизация проточной части турбомашин (на примере центробежных компрессоров). «Известия Высших Учебных Заведений. Проблемы Энергетики». – 2011. – № 9-10. С.105-117.
2. Васильев Ю.С. (СПбГТУ), Родионов П.И. (ОАО «ГАЗПРОМ»), Соколовский М.И. (ОАО НПО «Искра»). Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения. Научные основы расчета, разработка методов оптимального проектирования и освоение производства. Промышленность России. – №10-11. – 2000. – М. – С. 78-85.
3. Галеркин Ю.Б. Турбокомпрессоры. — Изд-во СПбГТУ. — СПб. — 2010. — С.650.
4. Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В. Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Часть 1. Компрессорная техника и пневматика.– 2010.– № 2.– С. 2-11.
5. Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В. Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Часть 2. Компрессорная техника и пневматика.– 2010.–№ 3.–С. 15-22.
6. Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В. Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ. Под редакцией Галеркина Ю.Б. Изд. СПбГПУ. – 2010. – С. 419-432.
7. Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В., Дроздов, А.А. Уточнение алгоритма расчета параметров потока в центробежной компрессорной ступени. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 4. – С. – 150-157.
8. Галеркин Ю.Б., Солдатова К.В. Моделирование рабочего процесса промышленных центробежных компрессоров. Научные основы, этапы развития, современное состояние. — Монография. — Изд-во СПбГПУ. — СПб. — 2011. – С. 327.
9. Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В. Разработка «виртуальных» модельных ступеней с помощью программ 5-го поколения Метода универсального моделирования. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 4. – С. 241-247.
10. Галеркин, Ю.Б., Солдатова, К.В., Дроздов, А.А. О применении и расчете КПД проточной части турбокомпрессоров. Компрессорная техника и пневматика. – 2011. – № 8. – С. 2-11.
11. Попова Е. Ю. Оптимизация основных параметров ступеней турбомашин на основе математического моделирования. Дис...канд. техн. наук / СПбГПУ. – СПб. – 1991.
12. Солдатова, К.В. Математическое моделирование газодинамических характеристик промышленных центробежных компрессоров с целью повышения их эффективности. Наука и инновации в технических университетах. Материалы 4-го всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2010. – СПбГПУ.
13. Солдатова, К.В. Уточнение моделей потерь и напора в программах Метода универсального моделирования по результатам испытания промышленных центробежных компрессоров. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. – № 4. – С. – 300-308.

14. Солдатова К.В. Основы формирования семейства модельных ступеней центробежных компрессоров: Дис. докт. техн. наук. СПбГПУ. — СПб. — 2011. — С. 266.
15. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ. Под редакцией Галеркина Ю.Б. — М.: Изд. «СПбГПУ». — 2010.
16. Шайхутдинов А.З., Седов В.В., Сальников С.Ю., Щуровский В.А. Газокомпрессорная техника для новых проектов ОАО «Газпром». Труды XVI международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». — СПб. — СПбГПУ. — 2011.
17. Galerkin Y., Soldatova K. Industrial centrifugal compressor model stages based on compressor tests results. Ciepłne maszyny PRZEPLÝWOWE. Turbomachinery. — № 140. — 2011. С. 63-72.

А.В. Бышевская (молодой ученый)

ФГБОУ ВПО СГАФКСТ

Научный руководитель – д.г.н., профессор В.А. Шкаликов, СмолГУ

## ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА СМОЛЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

### РЕФЕРАТ

*Ключевые слова:* автотранспортная система, мониторинг, придорожные территории, факторы риска, безопасность движения.

**Актуальность темы** исследования обусловлена ухудшением обстановки на отдельных участках автотранспортного комплекса Смоленской области. Для поиска оптимальных, с точки зрения безопасности деятельности человека, инженерно-проектных решений возникает необходимость детального изучения особенностей различных автотранспортной системы региона. Проведение системного анализа и моделирование взаимосвязей между различными компонентами среды и автодорожным комплексом позволяет создать максимально полный перечень рисков и потерь и найти решения по их минимализации.

➤ **Цель работы:** выявить закономерности и масштаб трансформации автодорожного комплекса Смоленской области и обосновать пути его оптимизации.

#### **Задачи исследования:**

➤ Сбор, систематизация и обобщение результатов предшествующих исследований по проблеме

➤ Мониторинг придорожных территорий;

➤ Характеристика последствий функционирования автотранспортного комплекса на территории Смоленской области;

➤ Разработка предложений и рекомендаций по оптимизации автодорожного движения.

**Предмет исследования:** автотранспортная система Смоленской области.

### **Введение**

Ежегодно фиксируется увеличение количества транспортных средств, появление новых автодорог и объектов инфраструктуры. Протяженность автомобильных дорог общего пользования регионального и межмуниципального значения Смоленской области 10117 км. Общее количество дорог – 1028. Основу транспортного каркаса Смоленской области в настоящее время составляет международный транспортный коридор РЕ-2 (М1 «Москва-Минск») [4]. Средний

коэффициент плотности автомобильных дорог общего пользования составляет 0,15-0,25 % от общей площади района (рисунок 1).

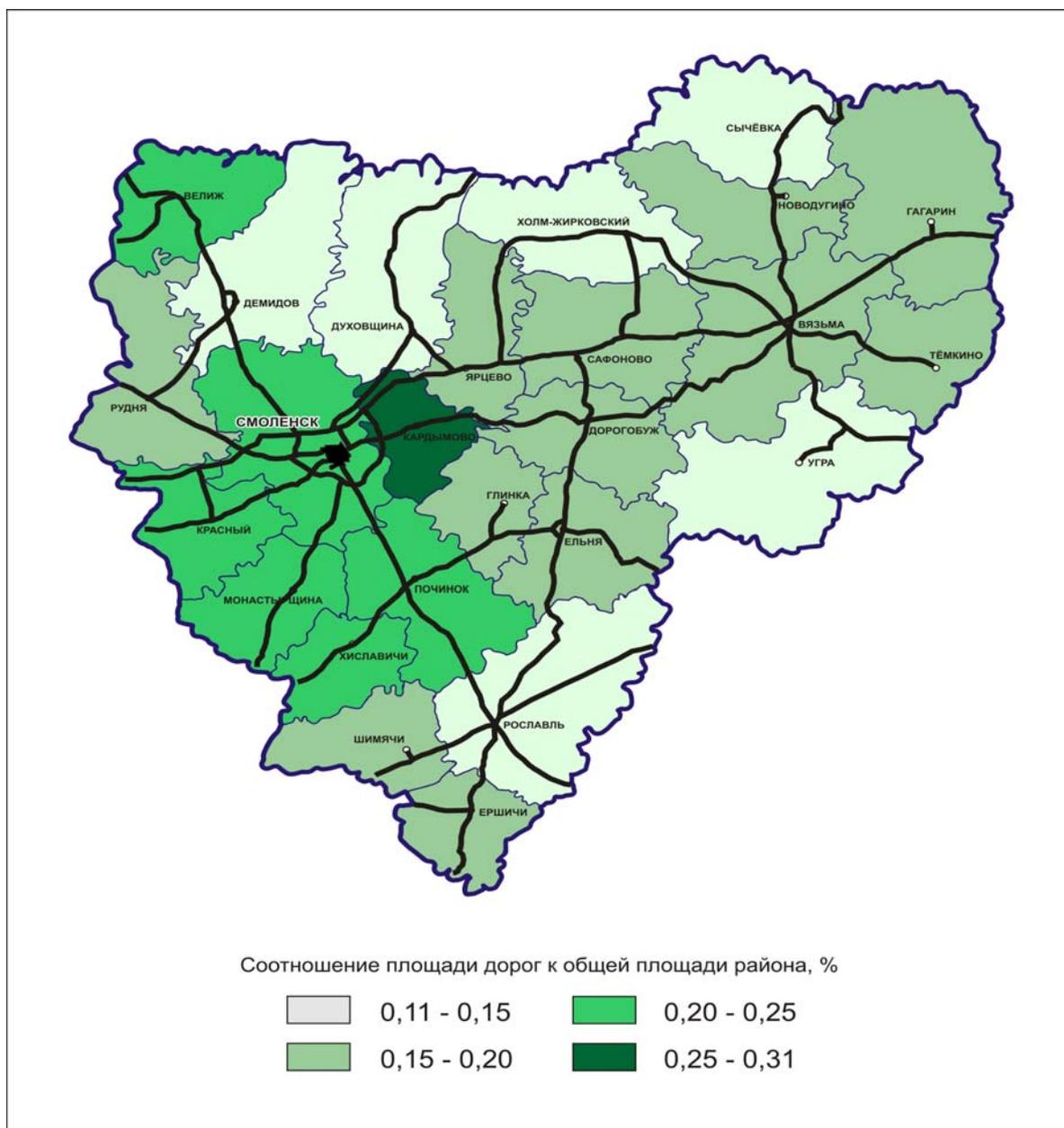


Рис. 1. Пространственное распределение коэффициента плотности автодорог общего пользования (автор – Бышевская А.В.)

За последние полтора десятилетия в Смоленской области, как и в России в целом аварии на дорогах с тяжкими последствиями для людей возросли настолько, что вполне могут быть отнесены к факторам, заметно влияющим на сокращение численности населения. При автомобильных авариях люди получают тяжкие травмы – черепно-мозговые, повреждения органов грудной клетки, брюшной полости, опорно-двигательного аппарата. Возможности же здравоохранения в

технических скоростях борьбы за жизнь человека явно не поспевают за научно-техническим прогрессом. Пострадавшие нередко длительное время находятся на месте без оказания даже первой медицинской помощи. В больницу многие из них попадают спустя несколько часов после произошедшей аварии. Упущенное время предопределяет часто более тяжкие потери здоровья, а иногда от этого зависит и сама жизнь пострадавших.

В связи с этим следует считать целесообразным создание на федеральных дорогах, и особенно отличающихся интенсивным движением транспорта, пункты по оказанию первой медицинской помощи пострадавшим в автомобильных авариях. Такие пункты могут быть построены при автозаправочных станциях, крупных стоянках автомашин, постах дорожно-патрульной службы, возле отдельных крупных деревень и сёл. На каждом таком пункте должно быть помещение, хорошо оснащённое медицинским оборудованием, обеспеченное медикаментами, необходима машина «скорой помощи». Постоянное дежурство здесь должны нести врач-травматолог, средний и младший медицинские работники, водитель, по первому сигналу готовые выехать на место дорожного происшествия. При необходимости они должны вызвать специализированную помощь, доставить пациента в больницу. Функционирование таких пунктов позволит за счёт выигранного времени спасти жизнь многих людей, максимально вернуть им здоровье, трудоспособность.

Придорожные пункты должны быть готовы помочь пострадавшим, потерявшим большое количество крови. Для этого в этих пунктах необходимы запасы донорской крови и её препаратов, компонентов крови и её заменителей, а также всего необходимого для переливания крови, чтобы можно было восполнить её потери и спасти больного.

Эти пункты при чрезвычайных происшествиях могут оказывать экстренную помощь сельскому населению на близлежащих территориях, особенно если там в последние годы были закрыты медицинские учреждения.

Необходимо обучить работников милиции, Госавтоинспекции, водителей, работников охранных предприятий, оказанию первичной медицинской помощи при переломах, правильному наложению шин, остановке кровотечения, правильной транспортировке при различных повреждениях опорно-двигательного аппарата. Они должны владеть простыми приёмами реанимации, делать искусственное дыхание и оказывать иную помощь пострадавшим.

В автодорожных авариях большинство потерпевших – это люди молодые. Сохранить им жизнь, вернуть трудоспособность очень важно. Время оказания помощи нередко в таких случаях имеет решающее значение. И это дополнительный довод в пользу открытия придорожных медицинских пунктов. Даже если подходить к этому только с экономической меркой, то ясно, что возвращённые к труду люди окупят затраты на спасительные медицинские пункты.

В современных условиях создание сети таких пунктов не по силам системе здравоохранения. Реально они могут быть созданы за счёт средств организаций, эксплуатирующих дороги и получающих от этого определённую долю прибыли. Прежде всего, это нефтяники, газовики и энергетики, получающие благодаря перевозкам по автодорогам значительную часть своей прибыли. Безусловно, на создание травмпунктов на дорогах должны быть выделены средства из федерального бюджета.

Подготовка хирургов-травматологов, специалистов по работе непосредственно на месте аварий и катастроф вполне по силам медицинским образовательным учреждениям.

О строительстве травмпунктов при крупных автотрассах говорилось на самом высшем уровне, но практического решения этого вопроса нет.

В Смоленской области создание придорожных медицинских пунктов необходимо, прежде всего, по основной её транспортной артерии – автодороге Москва-Минск. На данной трассе, несмотря на проведенный большой объём работ по её реконструкции, в том числе и направленных на снижение аварийности, отмечается наибольшее количество аварий с трагическими последствиями. Связано это в основном с заметным увеличением количества транспорта на трассе, повышением скорости движения на многих её участках. Опрос водителей, часто проезжающих по этой дороге, и данные патрульно-постовой службы свидетельствуют о том, что наиболее опасные участки её, где чаще случаются аварии, приурочены к заметно выраженным спускам и подъёмам, местам съезда на другие дороги при отсутствии транспортных развязок (дороги на Гагарин, Сычёвку, Холм-Жирки, Кардымово, Велиж и др.).

За три года (2005-2008) на данной трассе зафиксировано 934 дорожно-транспортных происшествий, в которых погибло 224 человека, тяжкие физические последствия получили 100, менее тяжкие 270 человек [3]. Пики аварийности на дорогах приходится на вечерние часы с 18.00 по 20.00.

Наибольшее количество ДТП произошло в Краснинском районе. Основная часть их приходится на небольшой участок, расположенный вблизи границы с республикой Беларусь (455 и 456 км). На этом участке зафиксирована 151 авария. Но количество пострадавших в этих авариях незначительно (2 погибших и 2 получивших телесные повреждения). Основная причина наиболее значительного количества аварий на данном участке связана, по-видимому, с поведением самих водителей. Одни из них расслабляются после прохождения таможни, другие - после задержки на досмотре увеличивают скорость движения, пытаясь наверстать упущенное время. Некоторые водители объясняют большое число аварий на этом участке дороги неблагоприятным её освещением в солнечную погоду. Вне сомнений, на этом участке дороги должны быть установлены знаки, предупреждающие об опасности аварии.

Количество аварий по районам области на данной автомагистрали не зависит от её протяжённости в их пределах. За исключением Кардымовского района протяжённость дороги в Краснинском и Ярцевском районах меньше, чем в остальных районах области, число же аварий в этих районах наибольшее.

Заметно прослеживается приуроченность аварий к населённым пунктам, и особенно значительных размеров, размещённых возле автомагистрали. Особенно часты аварии возле наиболее крупных населённых пунктов – Вязьмы, Сафоново, Ярцева и Смоленска. Возле Ярцева на участке 6 км (329-335 км) за три рассматриваемых года совершена 101 авария. Около 120 аварий зафиксировано за три года вблизи Смоленска на участке от д. Семиречье до д. Дивасы (382-388 км). Примерно от Вязьмы до д. Чёрное (221-241 км) было совершено за этот период 85 аварий. Наибольшее количество аварий, зафиксированное вблизи границы с республикой Беларусь, совершено также возле относительно крупного населённого пункта – пос. Красное. На всех этих участках дороги должны быть установлены дополнительно знаки, предупреждающие о возможности возникновения аварийных ситуаций.

Судя по приуроченности аварий к населённым пунктам можно предположить, что возникают они по причине нарушения скорости движения, невнимательности водителей при выезде на автомагистраль с примыкающим к ней дорогам, а также с нарушениями правил перехода дороги пешеходами. Нельзя исключать и то обстоятельство, что для всех этих участков характерны значительные перепады высот, связанные в основном с пересечением автомагистралью долин рек. На таких участках опасность аварий увеличивается. Это подтверждается данными по количеству аварий, совершённых на отдельных участках дороги, где отсутствуют населённые пункты, но весьма заметно выражены значительные перепады высот. Наиболее типичный пример такого участка – небольшой протяжённости отрезок автотрассы вблизи границы Гагаринского и Вяземского районов. Автотрасса пресекает здесь относительно глубокие долины рек Сежа, Гжать и их притоков. На этом участке, протяжённостью 8 км (169-177 км), совершена 91 авария. Основные причины аварий в таких местах – нарушение правил обгона, высокие скорости движения, при которых водители не справляются с управлением автомобилей. Опасность аварий в этих местах особенно заметно возрастает при неблагоприятных погодных условиях. Для таких участков обычно выше показатели смертности и травматизма.

Наибольшее число погибших и пострадавших в авариях приходится на Вяземский, Гагаринский и Ярцевский районы. Для этих районов характерно и наибольшее число погибших в аварии.

Размещение вдоль трассы медицинских пунктов должно быть проведено с обязательным учётом этих мест наибольшей вероятности возникновения аварийных ситуаций. Особенно актуально создание таких пунктов на участках автотрассы Москва-Минск, расположенных вблизи мест примыкания к ней дорог

регионального значения. Это позволит персоналу пунктов оказывать первую медицинскую помощь также пострадавшим в результате аварий и на этих дорогах, для которых свойственна обычно на первых 10-20 км более высокая аварийность.

Создавать придорожные медицинские пункты наиболее целесообразно в относительно крупных поселениях, с тем, чтобы можно было бы оказать экстренную помощь и её жителям, пострадавшим от производственных, бытовых травм или иных несчастных случаев. В случаях расположения сельских поселений на значительном удалении от автомагистрали, создавать медицинские пункты желательно в местах формирования автозаправочных комплексов, в которых предусматривается сервис разнообразных услуг для водителей и пассажиров. К сожалению, в настоящее время при создании таких комплексов не предусматривается даже продажа лекарственных препаратов.

Было опрошено 150 респондентов, мужского пола, в возрасте от 22 до 52 лет, со стажем работы водителем от 1 до 25 лет. Вопросы, содержащиеся в анкете, можно условно разделить на две группы: посвященные проблема функционирования транспортной сети и социально – экономические.

В результате опроса, позволили сделать следующие выводы:

1. Средняя продолжительность периода нахождения в дальних поездках варьируется в пределах от одного дня до двух недель.

2. Среди мест с наименее удовлетворительным состоянием автодорог на территории Смоленской области, были указаны: Подъезд к п. Кардымово, Рославльское шоссе, подъезд к Колодне, Краснинское шоссе, дороги Смоленского района, подъезд к границе с Брянской областью, дороги Починковского района (Шаталово – Зимницы, Белый Холм – Егорье), дорога Пречистое – Шиловичи (Духовщинский район), Велижский район (от Ситьково до границы с Псковской областью), дорога Демидов – Понизовье, дорога Монастырщина – Талашкино, Шумячский район (Полицкое – Зимонино), Ершичский район (Верховая – до гораници с р. Беларусь), Темкинский район (Абрамово – Темкино), обход п. Темкино, Вяземский р-он (Егорье-Туманово-Савенки), Ельнинский р-он (Павлово – Шмаково), Угранский р-он (обход п.Угра, Угра – Выходы, Угра – Мытищино), Сычевский район (Вараксино – Лесные дали).

3. Самыми эстетически непривлекательными и сильно замусоренными, были названы стоянками фур, на выезде из городов: Сафоново, Ярцево, Вязьма, на выезде из Смоленска, съезды с трассы Москва – Минск, поворот на Темкино: стоянка фур.

4. Среди самый аварийно опасных отмечены: Трасса Москва-Минск у д. Лонница, Трасса Москва – Минск от г. Вязьма в сторону г. Москва, долина р. Жижва, участок 5,5, 52 км; пос. Кубинка. Пост ДПС, за ним авт. остановка и неудобный спуск, долгий и пологий, 363 км; поворот на Кардымово, 223 км; поворот на Сычевку; от Вязьмы до Сычевки; обход п. Угра; везде на спусках, подъемах и других условиях плохой видимости; перед Нетризово; на подъезде к

Суетово; на пересечение дорог (поворот на г. Дорогобуж перед автобусной остановкой), на въезде в Сафоново, 2 км после Истомино, на подъезде к Яковлево.

5. Частыми местами пробок или аварийных стоянок (минимальное и максимальное время стоянок) все опрошиваемые единогласно назвали, таможенный пункт (д. Красная горка) перед границей с р. Беларусь. Время нахождения на вынужденной стоянке, в связи с прохождением таможни было указано от 1 часа до 12 часов.

6. В какое время года состояние дорог наименее удовлетворительное?», 30% водителей ответили «весной», 50% – «зимой», 20% – «осенью».

7. На вопрос «укажите участки, где требуется повышенное внимание водителя, с чем это связано», были получены следующие ответы:

поворот с трассы Москва-Минск на Сергиево-Ивановское, часто плохая видимость из-за туманов; за г. Рославль в сторону границы с Брянской областью, очень много выбоин, нет кюветов, знаков (резкий подъем и спуск);

на границе Смоленской и Калужской областей большие выбоины, зимой сильный гололед, заносы; от Вязьмы до Сычевки, полотно в очень плохом состоянии, ремонта не было больше 5 лет; 2-3 км от Рославля к границе с Калужской областью: неровное полотно, максимальная скорость движения 20 км в час; по старой Смоленской дороге на резких поворотах нет указательных знаков, машину может выбросить с дороги, на мостах, по дороге от Вязьмы до Москвы, на подъезде к г. Духовщина, дорога плохо сневилирована, часто подтоплена.

8. Было указано 34 места, на которых, по мнению водителей, отсутствуют необходимые дорожные знаки.

9. Неудовлетворительной сочли работу эксплуатационных автодорожных служб 100% респондентов.

Анализ данных аварийных ситуаций на дороге Москва – Минск, учёт особенностей размещения медицинских учреждений в городах, расположенных вблизи трассы, позволяют рекомендовать в пределах области следующие места, где наиболее целесообразно разместить стационары по оказанию первой медицинской помощи пострадавшим в авариях на дорогах: возле пос. Красное; около д. Дивасы или возле заправочной станции, расположенной у съезда с автомагистрали на дорогу к Смоленску; у д. Мушковичи; около Ярцево у дороги на Духовщину; возле заправочных станций около Сафоново и Вязьмы; возле д. Займище.

Возможен и иной вариант оказания первой медицинской помощи пострадавшим в авариях на данной дороге и на примыкающих к ней автодорогах. С этой целью можно использовать вертолёты, размещая их в Смоленске и Вязьме.

Мониторинг мест складирования и захоронения ТБО показал, что 92% свалок расположены в непосредственной близости от автодорог. 43% от общего числа свалок несанкционированные. Свалки с максимальным объемом отходов (25

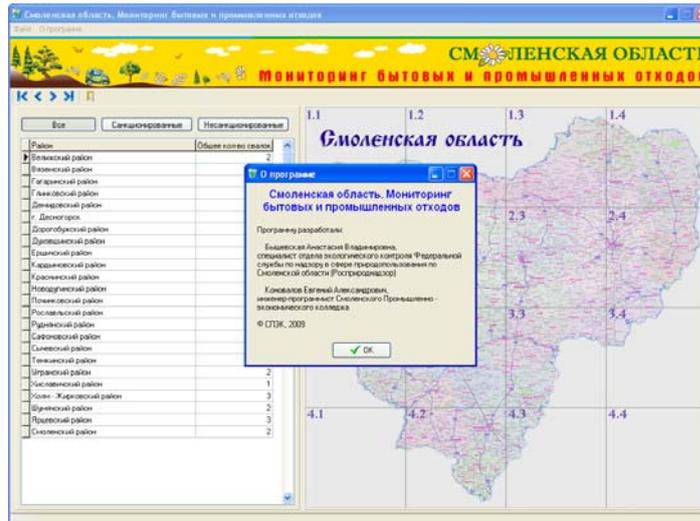
и более тыс.м.куб.) расположены вдоль федеральных автотрасс. На придорожных свалках преобладают отходы 2,3,4,5 классов опасности (рисунок 2).



Рис. 2. Объем и классы опасности ТБО на свалках вдоль автодорог Смоленской области (среднее за период 2010-2011 гг.) (автор – Бышевская А.В.)

Наибольшая концентрация подобных экотоксикантов с придорожных свалок фиксируется в летний период, когда средняя дневная температура увеличивается до 20 и более градусов.

Для своевременного получение данных о количестве и составе придорожных мест складирования ТБО автором, совместно с инженерами по программированию Смоленского промышленно – экономического колледжа был создан программный продукт «Смоленская область. Мониторинг бытовых и промышленных отходов». Программа позволяет в режиме реального времени получать информацию о количестве и составе придорожных свалок ТБО, определять статус места складирования, удалять и добавлять объекты, ранжировать желаемые территории по различным параметрам (рис. 3).



Вязьмский район - свалки

ID	Вместимость объекта, т. куб.м	Мощность объекта, т. куб.м/г	Класс отходов, т. куб.м	Площадь объекта, га	Ширина СЗЗ, м	Ближайший водный объект	Ближайший населенный пункт
1	1000	72,7	1940	19	1000	р. Вязьма 20 м	д. Колосово 1,9 км
5	5	0,5	2	3	500	д. Топоново 1,5 км	д. Топоново 1,5 км
7	1,5	0,02	0,1	2	1000	д. Шельское 1,3 км	д. Шельское 1,3 км
8	1	0,01	0,1	1	1000	д. Откосово 1 км	д. Откосово 1 км
9	2	0,01	0,15	1	1000	д. Тучиново	д. Тучиново
15	0	0,05	1,2	0,5	1000	д. Пасляново	д. Пасляново
16	0	0,08	2	0,5	1000	д. Андрейково	д. Андрейково
18	0	0	0,05	0,5	0	г. Вязьма 2 км	г. Вязьма 2 км
19	32,4	0,4	4	0,4	400	г. Вязьма 500 м	г. Вязьма 500 м
20	43,8	0,337	3	2,5	800	г. Вязьма 500 м	г. Вязьма 500 м
21	3,1	3,1	0	1	400	Богородское болото 50 м	г. Вязьма
22	415	43	100	1	400	р. Мозжица 300 м	г. Вязьма
23	2	0,04	0,5	1,5	800	р. Вязьма 200 м	г. Вязьма
119	5	0,5	2	3	500	д. Масловское 1 км	д. Масловское 1 км
24	7	7	7	1	400	заболоченная пойма реки Млг	г. Вязьма
107	540		140	0	0	р. Мозжица Тен.р. Волосата д. Володарцы 2,5 км	д. Володарцы 2,5 км

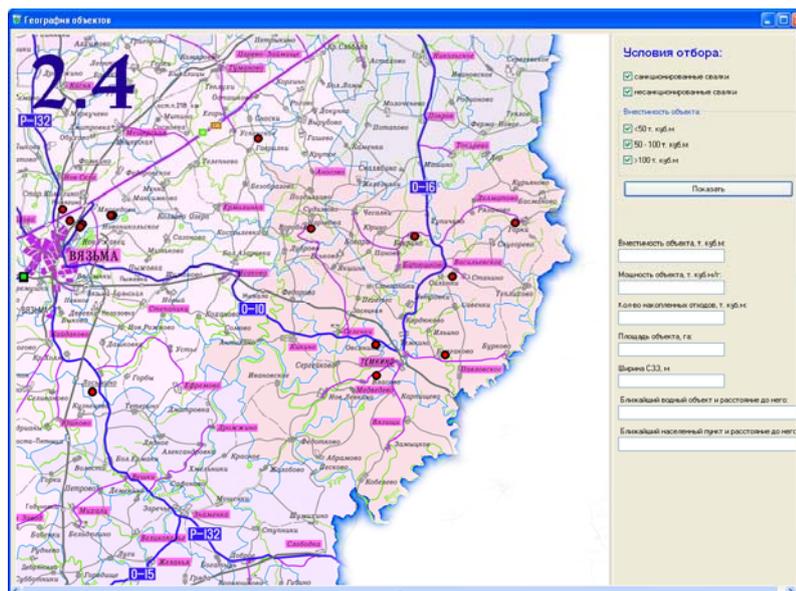


Рис. 3. Программа: «Смоленская область. Мониторинг бытовых и промышленных отходов» (разработчики – Бышевская А.В.; Коновалов Е.А.)

Основные направления в снижении опасного воздействия АТК в России в целом и Смоленской области в частности, заключаются в совершенствовании конструкции двигателей, ужесточении эколого-правовых норм, использование экологически чистых материалов, управление транспортными потоками, уменьшение вредных выбросов в окружающую среду, снижение износа транспортных средств; совершенствовании технического обслуживания и ремонта автомобильных дорог, утилизации выведенных из эксплуатации транспортных средств.

Важно подходить к решению этой задачи комплексно, учитывая интересы всех сторон. Принципы экологизации в той или иной степени отражены в существующих законах: «Об охране окружающей среды» (2002), «Об охране атмосферного воздуха» (1998), «Об охране недр» (1992) и др. Тем не менее, ощущается необходимость в существовании отдельного, комплексного закона об экологической безопасности АТК. Линейная протяженность дорог создает своеобразие ландшафта, животного и растительного мира, ближайшее окружение дороги и она сама представляют своеобразную геотехносистему. Дорожно-строительные регламенты и нормы, действующие ГОСТЫ и другие стандарты, принятые в 80-е годы XX века в значительной мере устарели, кроме того они зачастую содержат лишь общие положения, не учитывая особенности местных природных условий.

Один из ключевых элементов экологизации АТК области – выстраивание системы частно-государственного партнерства, представляющей собой четкую и скоординированную структуру состоящую из хозяйствующих субъектов, к примеру ОАО «Смоленск Автодор, ДРСУ, ФГУ ДЕП-4, ФГУ ДЕП-12 и т.п., представителей гражданского общества, неправительственных экологических организаций и др.». Создании на базе перечисленных выше участников постоянно действующей площадки для обсуждения насущных проблем АТК, предложении и внедрении мероприятий направленных на стабилизацию экологической ситуации в реальном времени.

С точки зрения эффективного регулирования природопользования на придорожных землях наиболее перспективным представляется разработка мер по предотвращению загрязнения и утраты природно-ресурсного потенциала. На решение этой проблемы в России в настоящее время тратится всего около 15% инвестиций направленных на решение экологических проблем транспортного комплекса. Необходимы так же разработка и внедрение автоматизированной системы сбора и обработки экологической информации с учетом региональных особенностей АТК. С последующим внедрением конкретных мер и анализом их эффективности.

Еще один необходимый элемент алгоритма экологизации АТК – совершенствование организации автодорожного движения. Создание эффективной системы управления движением – задача, успешно решаемая во многих

зарубежных странах (Швеция, Германия, Япония и др.). Подобная система необходима создания более благоприятных условий для передвижения людей и перевозки грузов, организации бесперебойной работы АТК. Новая система управления, позволит уменьшить экологический ущерб за счет: уменьшения количества остановок транспортных средств, количества выбросов и шума за счет сокращения времени работы двигателей. Принцип подобной системы заключается в информировании водителей, по навигационным средствам связи. Информация включает в себя: статистику о заторах на дорогах, местоположении транспортного средства, осуществляет активную помощь в подборе оптимального маршрута. Подобная система способствует повышению безопасности дорожного движения, оптимизации и перераспределению транспортных потоков и улучшению общих условий функционирования АТК.

### **Заключение**

1. Комплексное загрязнение почвенного покрова, атмосферного воздуха, водных объектов охватывает более 70% придорожных территорий. Обнаруживается стабильное присутствие элементов – загрязнителей: тяжелых металлов, противогололедных реагентов, нефтепродуктов. Зоны загрязнений локализуются в виде аномалий, приурочены к крупным населенным пунктам, объектам инфраструктуры АТК (заправочным станциям, пунктам техобслуживания, стоянкам фур и др.) и представляют большую опасность для местного населения.

2. За последние 5 лет удвоился показатель аварийности на автодорогах с интенсивностью движения 10000 авт/сут и более. Ощущается острая потребность в регулировании транспортных потоков и поиска оптимальных режимов движение.

3. Предложенные в работе меры, по осуществлению мониторинга состояния, могут способствовать безопасности функционирования автотранспортного комплекса. Разработанный в ходе исследований программный продукт: «Смоленская область. Мониторинг бытовых и промышленных отходов», успешно используется в работе образовательных учреждений (Смоленская государственная академия спорта, туризма и физической культуры, Смоленский промышленно-экономический колледж), формируя у молодых специалистов в области безопасности и охраны окружающей среды, практические навыки мониторинга и работы с ГИС (акт внедрения прилагается).

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Бышевская А.В. Влияние автомобильных дорог на экологическое состояние прилегающих к ним территорий. 46 – 47. Актуальные проблемы экологии – 2007: тез. Докл. III Междунар. научн. – практ. конф., Гродно, 21-23 нояб. 2007 г. / ГрГУ им.Я.Купалы; Гродно: ГРГУ, 2007. – 119 с.

2. Евгеньев И.Е. Экологическая безопасность автомобильной дороги // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1997. – № 1. – С. 22-24.
3. Шкаликов В.А. Экологические проблемы развития дорожной сети. Чтения памяти профессора В.В. Стачинского. Издательство СМОЛГУ. 2000, 242-247
4. Шкаликов В.А., Бышевская А.В. Этапы формирования современной системы автомобильных дорог Смоленской области 80 – 84. Актуальные проблемы современной географии. Вып. 5. Сборник научных статей. – Смоленск: Универсум, 2007. – 348 с.

С.Н. Соловьёва (ассистент)  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
Научный руководитель – А.А. Лapidус, к.т.н., доц., ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

## СПЕЦИФИКА ТЕРМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ 0,4 кВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ

### Реферат

*Ключевые слова:* короткое замыкание, место повреждения, кабельная линия, температура, нагрев, возгорание, автоматический выключатель.

В представленной работе рассмотрены вопросы проверки кабелей в сетях 0,4 кВ на возгорание. Предложена уточняющая методика расчета нагрева проводников, определены области ее применения, приведено сравнение новой методики с общепринятой. Разработан программный модуль для расчета нагрева кабелей по предложенной методике с учетом теплового спада тока. Определены наиболее тяжелые условия проверки проводников на возгорание. Рассмотрены вопросы учета неадиабатического нагрева кабеля. Даны рекомендации по изменению существующей нормативно-технической документации в части проверки кабелей на возгорание.

### ВВЕДЕНИЕ

Класс напряжения 0,4 кВ на станциях и подстанциях в основном используется для обеспечения питания собственных нужд, основное оборудование которых является ответственными потребителями.

Чаще всего сети 0,4 кВ оснащены устройствами защиты и автоматическими выключателями (АВ), не обеспечивающими необходимое качество функций релейной защиты и автоматики (чувствительность, быстродействие, стабильность характеристик, отстройка от режимов группового пуска и самозапуска двигателей и т.д.).

При коротких замыканиях (КЗ) в кабельных коммуникациях в случае отказа защиты и отключающего аппарата, как правило, происходит воспламенение поврежденного кабеля с последующим пожаром в кабельном хозяйстве. Отсутствие эффективной защиты приводит к массовому выходу из строя (выгоранию) автоматических выключателей.

По данным ФГУ ВНИИ противопожарной обороны МЧС РФ, четверть общего числа пожаров в России происходит вследствие возгорания электротехнических изделий, а наиболее пожароопасными среди электротехнических изделий являются кабельные линии. В России более 60% общего числа пожаров, произошедших от

электротехнических изделий, случаются по причине возгорания кабелей [1]. Зачастую такие пожары сопряжены с человеческими жертвами. При расчете материального ущерба от возгорания кабелей следует учитывать не только прямой ущерб, т.е. стоимость сгоревших кабелей, помещений, имущества, но и косвенный ущерб от перерыва электроснабжения, недоотпуска электроэнергии, нарушения телекоммуникационной связи, который в 5-8 раз превышает прямой ущерб.

В связи с большой опасностью перехода коротких замыканий в возгорание кабелей, нормативно-техническая документация регламентирует проверку кабелей на термическую стойкость (ТС) и невозгораемость (НВ). При этом возникает необходимость точного определения конечной температуры нагрева кабеля при протекании по нему тока короткого замыкания. Особенно острой является проблема обеспечения термической стойкости и невозгораемости кабельных коммуникаций в системе электроснабжения собственных нужд станций и подстанций, где кабельные трассы имеют большую протяженность и плотность потоков, а также высокую ответственность.

В то же время в современных директивных указаниях не уделено должное внимание методике расчета нагрева жил кабеля с учетом теплового спада тока и неадиабатического нагрева проводников.

Требование обеспечения невозгораемости кабельных линий (КЛ) необходимо связывать, прежде всего, с возможностью реализации дальнего резервирования.

Дальнее резервирование имеет место, когда при несрабатывании защиты, обслуживающей данный участок сети, или соответствующего коммутационного аппарата, срабатывает защита, обслуживающая соседний (вышестоящий или более близкий к источнику) участок сети.

На ближнее резервирование в сети 0,4 кВ обычно не рассчитывают, т.к. две резервирующие друг друга защиты (тепловой и электромагнитный расцепители автоматического выключателя) находятся в одном устройстве. Например, при отказе дугогасительной системы выключателя, при спекании главных контактов или при повреждении общих элементов расцепителей, короткое замыкание не будет отключено ни тепловым, ни электромагнитным расцепителем.

## **1. Обзор существующей нормативно-технической документации, посвященной нагреву кабелей**

В настоящее время выбор и проверку КЛ по термической стойкости и на невозгорание освещают следующие основные отраслевые документы: Правила устройства электроустановок [2], действующий государственный стандарт [3], противопожарный циркуляр [4], директивные указания [5]. Однако по части требований к выбору кабелей в данных источниках существует ряд разногласий и несостыковок.

В главе 1.4 «Выбор электрических аппаратов и проводников по условиям КЗ» ПУЭ [2] термин «невозгорание» не упоминается вообще. ПУЭ регламентирует проверку по режиму КЗ в электроустановках до 1 кВ только распределительных щитов, токопроводов и силовых шкафов [2, п. 1.4.2]. Проверка кабелей не предусматривается ни по ТС при срабатывании основного автоматического выключателя, ни на НВ при действии резервной защиты.

Однако в седьмом издании ПУЭ, вероятно, будет введена рекомендация проверки кабелей напряжением до 1 кВ на НВ [6], так как эта проверка позволит достичь более высокого уровня надежности электрооборудования при эксплуатации благодаря снижению вероятности возникновения пожаров при КЗ.

При рассмотрении директивных указаний [5] оказалось, что кабели вторичных сборок необходимо проверять на невозгораемость, а именно: «п. 1.3. Должна обеспечиваться пожарная безопасность кабелей при КЗ в кабеле (за отрезком кабеля длиной 20 м и более) и отказе собственного выключателя, при отключении КЗ резервной защитой (защитой питающего трансформатора 6/0,4 кВ или селективным выключателем в цепи групповой линии)».

В соответствии с циркуляром [4] сечение кабеля выбирается из условий ТС (пригодности кабелей к дальнейшей эксплуатации) и НВ [4, п. 1.1]. При выборе кабелей нужно выбирать сечение КЛ по термической стойкости и сразу проводить проверку на невозгорание: проверить, чтобы конечная температура жил кабелей при отключении КЗ в начале кабельной линии резервной защитой не превышала допустимой температуры. Если КЛ подходит по условию ТС, но не проходит проверку на НВ, необходимо применять мероприятия по п. 1.2 [4] или выбирать точку КЗ на расстоянии 20 м (для сетей до 1 кВ) от начала кабельной линии при проверке невозгораемости.

Неизвестно, отменяет ли п. 1.1 циркуляра [4] п. 1.4.2 ПУЭ [2], согласно которому в электроустановках до 1 кВ проверка кабелей по режиму КЗ не предусматривается.

Действующий государственный стандарт [3] регламентирует, что при проверке силовых кабелей на НВ при коротких замыканиях расчетную точку КЗ следует выбирать в начале кабеля независимо от того, является ли он одиночным или частью КЛ, содержащей несколько параллельно включенных кабелей. Если одиночный кабель имеет ступенчатое сечение по длине, то для каждого участка с новым сечением кабеля необходимо принимать свою расчетную точку КЗ в начале этого участка [3, п. 6.4.1].

Это действительно будет соответствовать максимальному нагреву кабеля током КЗ при условии срабатывания основного АВ, но при реализации дальнего резервирования наиболее опасное место возникновения КЗ может не совпадать с началом КЛ, что будет показано в п. 3 данной работы.

## 2. Расчет нагрева проводников 0,4 кВ в системе собственных нужд подстанций

В настоящее время согласно существующих методик расчета температур нагрева кабельных линий, предлагаемых различными источниками [4, 7, 8], нагрев проводников осуществляется через действующее значение периодической составляющей тока КЗ  $I_{пт}$ .

При расчете температуры нагрева проводника необходимо на каждом шаге по времени  $dt$  рассчитывать приращение количества теплоты  $dQ$ . Для высокой точности расчетов требуется брать достаточно малые приращения  $dt$ . Очевидно, что такой расчет возможен только с помощью вычислительной техники. При малых временах отключения  $t_{откл}$  приращения  $dt$  могут становиться меньше периода рабочей частоты  $T = 0,02$  с. При таких временах усреднение тока за период теряет физический смысл.

Возникает необходимость разработки новых уточняющих методик расчета нагрева проводников, особенно при малом времени протекания токов КЗ.

Наиболее тяжелый с точки зрения электродинамики переходный процесс возникает при начальной фазе  $\varphi = \pi/2$ , так как именно при этом условии величина ударного тока максимальна. Но максимальная температура нагрева проводника токами короткого замыкания может быть достигнута при начальной фазе, отличной от  $\pi/2$ .

При малых временах отключения нагрев проводника зависит не столько от амплитудного (или действующего) значения тока, сколько от зависимости мгновенного значения  $i(t)$  в течение времени отключения, которое определяется начальной фазой  $\varphi$ .

Для определения выражения мгновенного значения полного тока КЗ  $i(t)$  в общем виде необходимо рассмотреть переходный процесс, представленный на рис. 1.

Решение задачи переходного процесса (рис. 1) проводится в операторной форме. Переходные процессы в правой и левой частях схемы, представленной на рис. 1, протекают независимо друг от друга, поэтому операторная схема замещения для решения данной задачи переходного процесса (рис. 2) будет включать в себя только левую часть цепи КЗ.

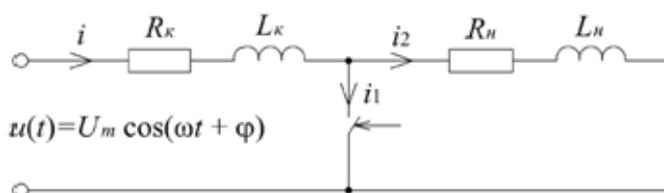


Рис. 1. Схема замещения цепи КЗ

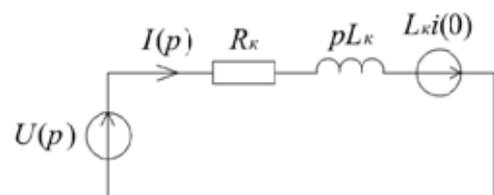


Рис. 2. Схема замещения цепи КЗ, для решения задачи операторным методом

Для рассматриваемых схем (рис. 1, 2) можно записать формулы для нахождения оригинала мгновенного значения напряжения  $u(t)$  и его изображения по Лапласу  $U(p)$  и тока в момент возникновения КЗ:

$$u(t) = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \stackrel{\cdot}{\rightleftharpoons} U(p) = U_m \frac{p \cdot \cos \varphi - \omega \cdot \sin \varphi}{p^2 + \omega^2}; \quad (1)$$

$$i(0) = \frac{U(0)}{z(0)} = \frac{U_m \cdot \cos \varphi}{z_H} \quad (2)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – угловая частота вращения.

Для схемы замещения, представленной на рис. 2, будет верно:

$$U(p) + L_K \cdot i(0) = I(p) \cdot (r_K + p \cdot L_K); \quad (3)$$

$$I(p) = \frac{U(p) + L_K \cdot i(0)}{R_K + p \cdot L_K} \doteq i(t). \quad (4)$$

Решение данного уравнения даст зависимость мгновенного тока от времени. Подставляя (1) и (2) в (4), получим:

$$I(p) = \frac{U(p) + L_K \cdot i(0)}{R_K + p \cdot L_K} =$$

$$= \frac{U_m}{L_K \cdot z_H \cdot \left( \frac{1}{T_a} + p \right) \cdot (p^2 + \omega^2)} \cdot (L_K \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi - \omega \cdot z_H \cdot \sin \varphi + p \cdot z_H \cdot \cos \varphi + L_K \cdot p^2 \cdot \cos \varphi) \quad (5)$$

где  $T_a = \frac{L_K}{r_K}$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

Представим (5) в виде:

$$\frac{U_m}{L_K \cdot z_H} \cdot \frac{(L_K \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi - \omega \cdot z_H \cdot \sin \varphi) + (z_H \cdot \cos \varphi) \cdot p + (L_K \cdot \cos \varphi) \cdot p^2}{(a + p) \cdot (\omega^2 + p^2)} \quad (6)$$

где  $a = \frac{1}{T_a} = \frac{r_K}{L_K}$  – вспомогательная переменная.

Разложив изображения на простые дроби, найдем оригинал:

$$i(t) = \frac{U_m}{z_K} \cdot \left( \cos(\omega \cdot t + \varphi - \varphi_K) - \cos(\varphi - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \right) + \frac{U_m}{z_H} \cdot \cos \varphi \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (7)$$

В выведенную формулу (7) входит сопротивление нагрузочной цепи  $z_H$ . В связи с многочисленностью и разнородностью нагрузок целесообразно упростить указанную формулу, считая, что  $z_K \ll z_H$ :

$$i(t) = \frac{U_m}{z_K} \cdot \left( -\cos(\varphi - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + \cos(\omega \cdot t + \varphi - \varphi_K) \right) \quad (8)$$

Используя данную формулу, можно привести алгоритм расчета температуры нагрева проводника с помощью предлагаемой методики (рис. 3) и сравнить его с алгоритмом расчета по общепринятой методике (рис. 4).

В данных алгоритмах величины  $T_a$ ,  $\varphi_K$ ,  $r_i$  (рис. 3) и  $r_i$  (рис. 4) подлежат пересчету ввиду учета теплового спада тока.

Анализируя алгоритм расчета нагрева кабелей (рис. 3), можно сделать вывод об усложнении методики по сравнению с существующей методикой расчета по действующему значению периодической составляющей тока КЗ (рис. 4). Поэтому

обоснованный расчет теплового воздействия на проводник в сети напряжением до 1 кВ при КЗ возможен только с помощью вычислительной техники.

Для исследования разных методик расчета токов КЗ и температур нагрева кабелей в сетях 0,4 кВ была разработана программа в рабочей среде Microsoft Office Access.

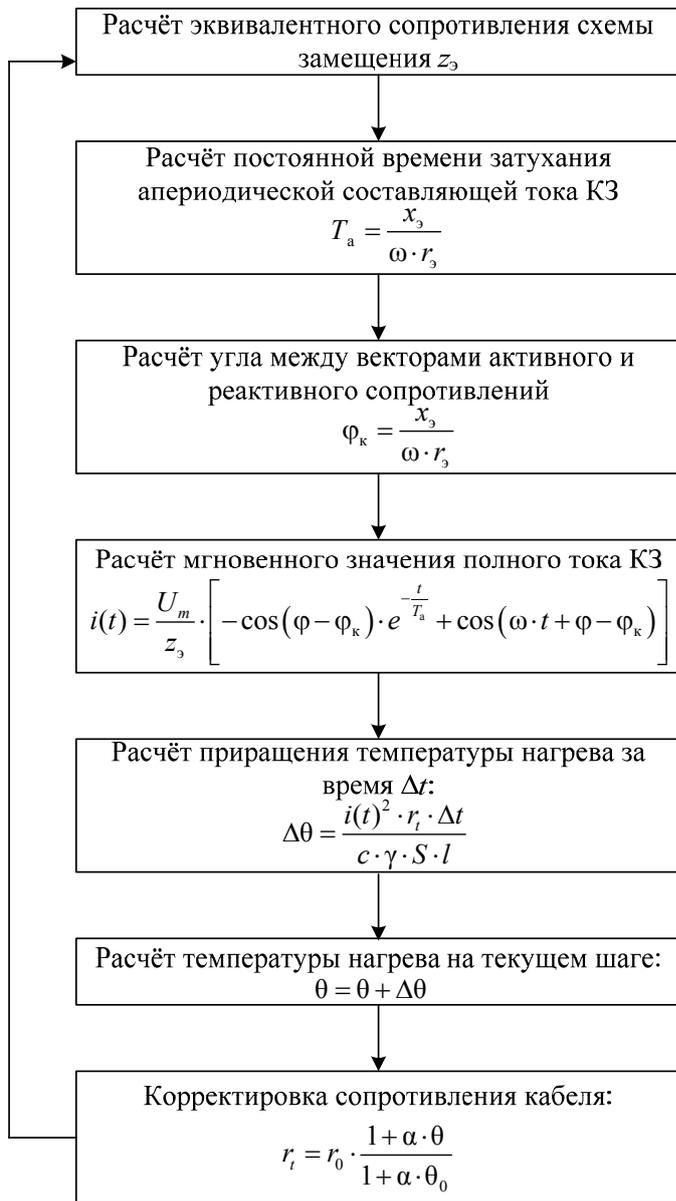


Рис. 3. Алгоритм расчета температуры нагрева проводника по мгновенному значению полного тока КЗ

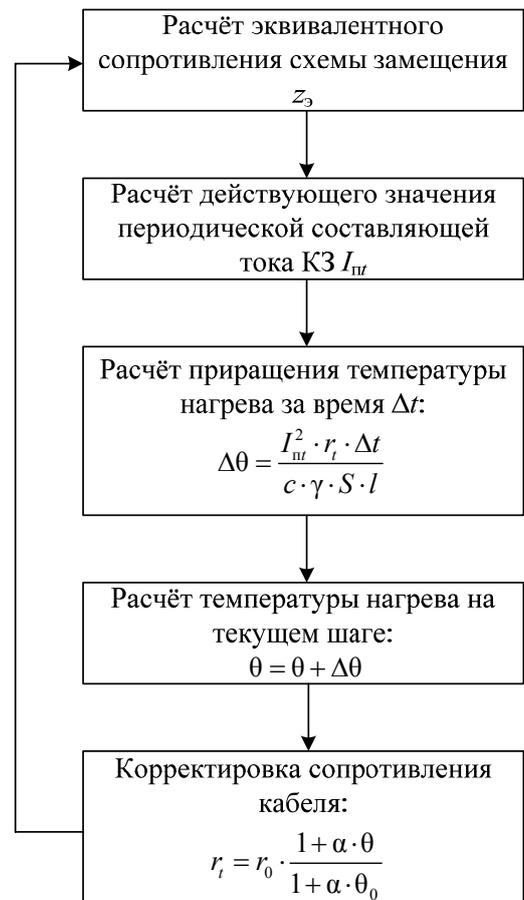


Рис. 4. Алгоритм расчета температуры нагрева проводника по действующему значению периодической составляющей тока КЗ

Интерфейс программного модуля (рис. 5) включает в себя окно с изображением типовой схемы СН станций и подстанций, на которой в зависимости от назначения

расчета возможно выбирать расчетные точки КЗ на сборках или в любом месте на кабеле. Параметры трансформаторов задаются маркой и полной номинальной мощностью  $S_{\text{ном}}$  [кВА], а такие параметры как напряжение и потери активной мощности КЗ ( $u_{\text{к}}$  [%],  $P_{\text{к}}$  [кВт]) задаются автоматически. Параметры кабелей зависят от маркировки КЛ (материал и сечение токоведущей жилы  $S$  [мм<sup>2</sup>]), по известной марке проводника из таблицы, заданной в программе, выбираются удельные погонные сопротивления линии. Пользователь также вводит в окно исходных данных длину кабеля ( $l$  [м]), либо расстояние до точки КЗ на исследуемой КЛ.

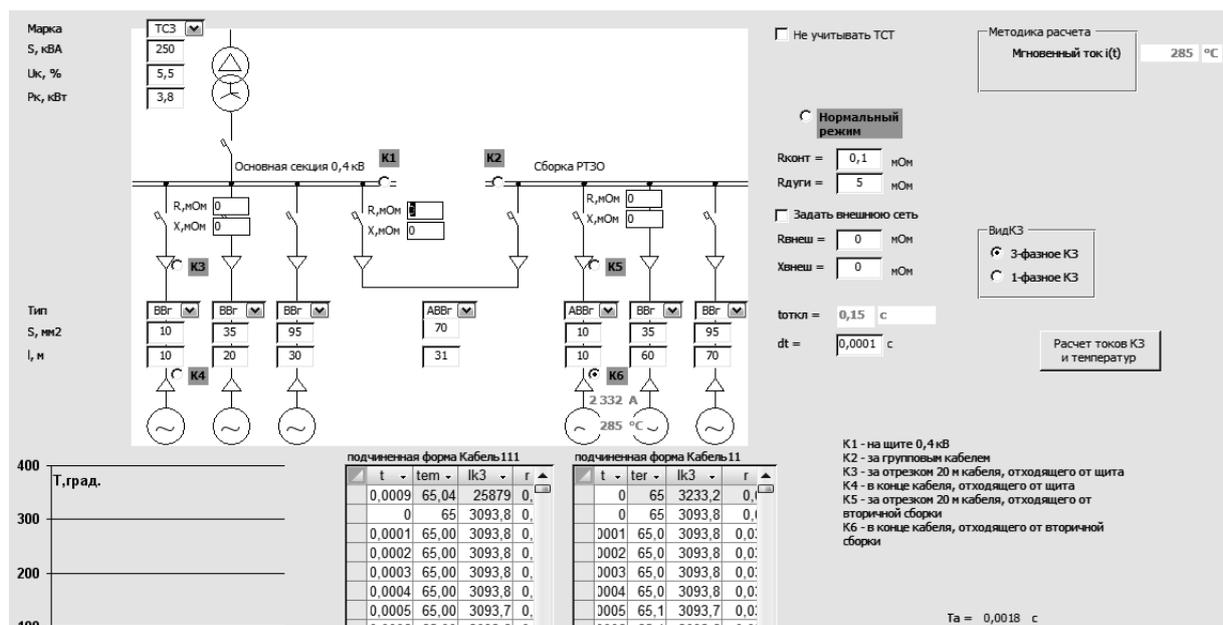


Рис. 5. Интерфейс программного модуля

Программа позволяет производить расчет тока КЗ по предложенной методике  $i(t)$ . Для любой точки КЗ на кабеле рассчитывается температура нагрева токоведущей жилы. При этом время отключения поврежденного элемента определяется автоматически, исходя из величины рассчитанного тока на каждом шаге интегрирования с помощью существующих время-токовых характеристик расцепителей АВ.

Температура нагрева КЛ рассчитывается с учетом теплового спада тока, при этом величину шага интегрирования  $\Delta t$  пользователь задает по своему усмотрению.

Произведем расчет температуры нагрева проводника  $\theta$  для различных начальных фаз возникновения КЗ. Для этого рассмотрим типовую схему СН станций и подстанций (рис. 6).

На рис. 6 обозначены характерные точки КЗ: К1 – в начале индивидуальной кабельной линии (КЛ), отходящей от щита 0,4 кВ; К2 – на расстоянии 20 м от начала индивидуальной КЛ (для проверки на невозгораемость согласно [4]); К3 – на зажимах потребителя; К4 – в начале групповой кабельной линии, отходящей от щита 0,4 кВ; К5

– на расстоянии 20 м от начала групповой КЛ; К6 – на вторичной сборке; К7 – в начале КЛ, отходящей от вторичной сборки; К8 – на расстоянии 20 м от начала КЛ, отходящей от вторичной сборки; К9 – на зажимах конечного потребителя.

Максимально опасная фаза возникновения КЗ определяется через тепловой импульс:

$$B = \frac{U_m^2 \cdot T_a}{2 \cdot z_k^2} \cdot \left[ \cos^2(\varphi - \varphi_k) \cdot (1 - e^{-2t/T_a}) + 4 \cdot \cos(\varphi - \varphi_k) \cdot \cos \varphi_k \cdot (\cos(\omega \cdot t + \varphi) \cdot e^{-t/T_a} - \cos \varphi) + ctg \varphi_k \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t + 2\varphi - 2\varphi_k) + \frac{t}{T_a} \right]$$

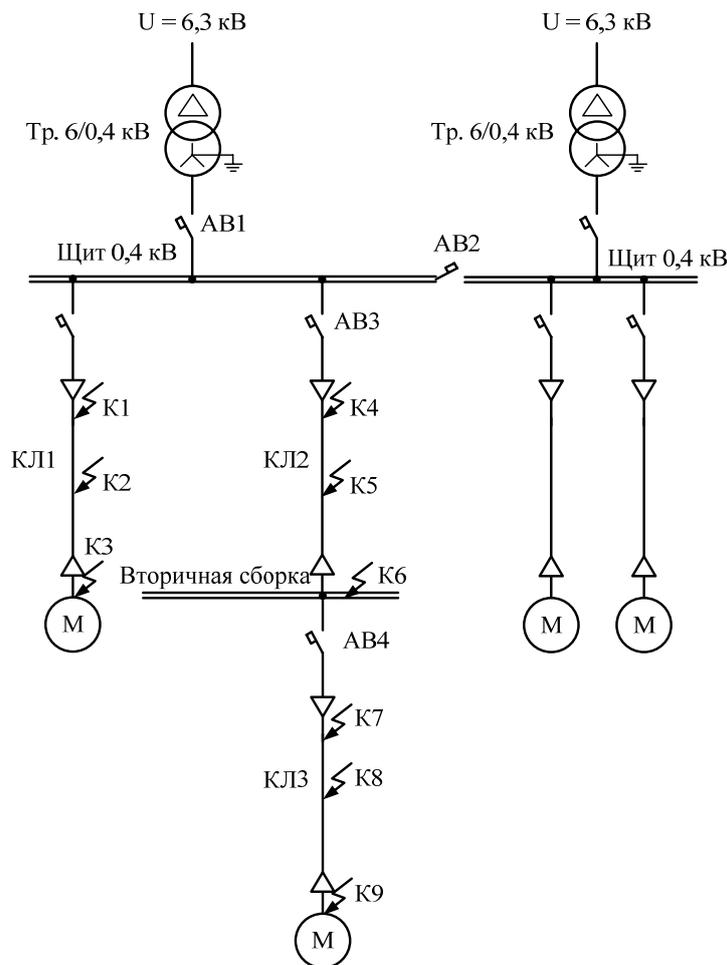


Рис. 6. Типовая схема собственных нужд станций и подстанций

При максимально опасной фазе  $\varphi$  возникновения КЗ тепловой импульс  $B$  достигает своего экстремума. Это происходит в диапазоне  $[0; \pi]$ . Полученная величина  $\varphi$  и будет использоваться при расчете  $i(t)$ .

Построим зависимость  $\theta = f(\varphi)$ , чтобы убедиться, что максимально опасная фаза возникновения КЗ отличается от  $\pi/2$  с точки зрения термического воздействия тока КЗ (рис. 7).

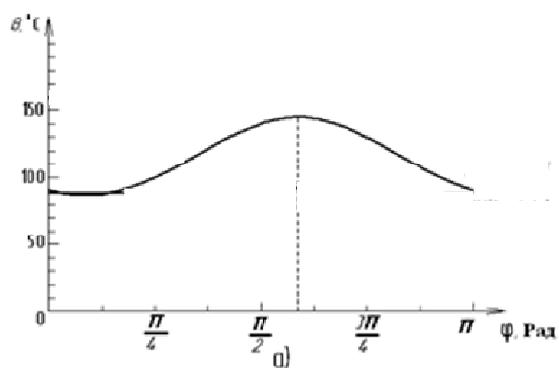
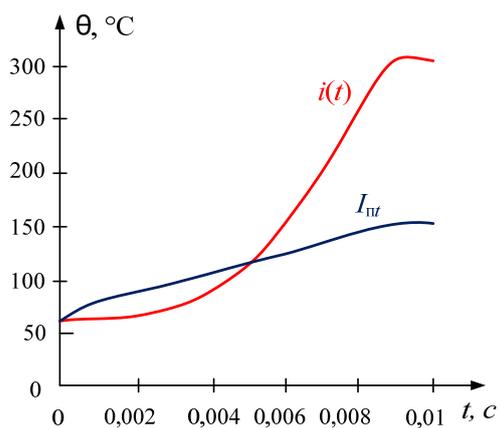
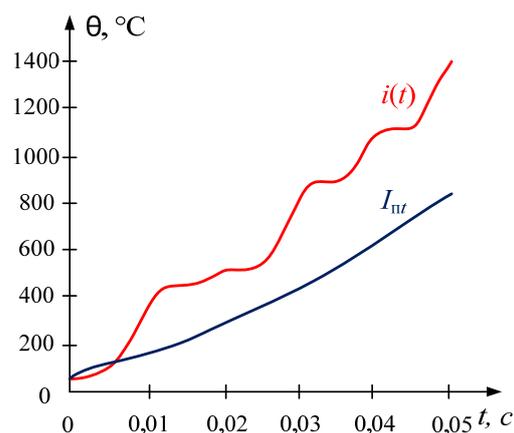


Рис. 7. Пример графической зависимости  $\theta = f(\varphi)$

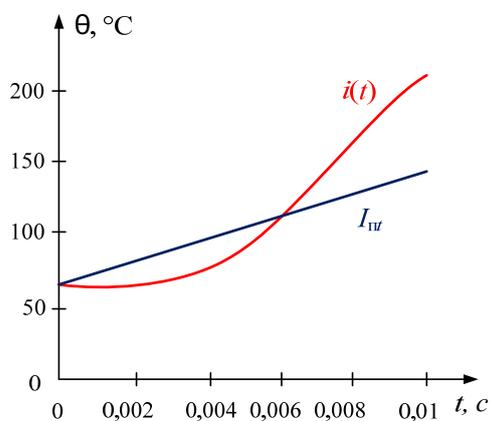
При малых временах отключения КЗ термическое воздействие токов КЗ существенно зависит от начальной фазы возникновения повреждения. При этом, как видно из графика (рис. 7), максимально опасная фаза  $\varphi_{\max} \neq \pi/2$ . Погрешность расчета при некорректном допущении о начальной фазе может составить более 60%.



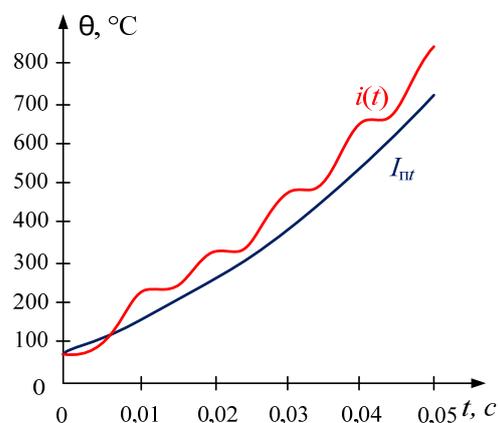
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Графики  $\theta = f(t)$  для индивидуальных КЛ, отходящей от первичной (а, б) и вторичной (в, г) сборок, и разных времен отключения КЗ

На рис. 8 приведены графики зависимости нагрева кабеля от времени протекания тока КЗ, рассчитанных по разным методикам и для разного времени отключения повреждения. Данные зависимости построены для индивидуальной КЛ сечением  $16 \text{ мм}^2$ , отходящей от первичной сборки, (рис. 8, а,б) и для КЛ сечением  $6 \text{ мм}^2$ , отходящей от вторичной сборки (рис. 8, в,г).

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что чем меньше время отключения тока КЗ, тем сильнее отличаются результаты расчета по разным методикам. При рассматриваемом времени  $t_{\text{откл}} = 0,01 \text{ с}$  погрешность расчета составила 55%, что является недопустимым. Для большего времени отключения  $t_{\text{откл}} = 0,05 \text{ с}$  погрешность не всегда превышает допустимый уровень, и переход к методике по мгновенному значению полного тока  $i(t)$  не всегда является обязательным.

Произведенные исследования позволили сделать основные выводы:

1. Чем меньше время отключения КЗ, тем больше термическое воздействие на КЛ зависит от начальной фазы возникновения КЗ.

2. Температура нагрева кабельной линии при расчете по мгновенному значению полного тока КЗ может отличаться от полученного значения температуры при расчете по действующему значению периодической составляющей тока КЗ как в большую, так и в меньшую стороны.

3. Способ задания определенного тока КЗ на вторичной сборке не влияет на электротепловые процессы за сборкой.

4. При расчете нагрева кабелей по  $I_{\text{пг}}$  для сетей, защищенных автоматами с малыми временами отключения, погрешность расчета становится недопустимой в связи с усреднением тока на малом промежутке времени; при расчете удаленных точек КЗ результаты обоих методик практически одинаковы.

5. Для различных мощностей трансформаторов, при фиксированном токе КЗ на вторичной сборке:

- температура, определенная по методике  $I_{\text{пг}}$ , остается неизменной;
- температура, определенная по методике  $i(t)$ , с ростом мощности трансформатора снижается и стремится к величине, определенной по методике  $I_{\text{пг}}$ .

Изложенные закономерности позволяют сделать общий вывод: расчет нагрева жил кабелей при воздействии токов КЗ малой длительностью (сотые доли секунды) в начале кабельной линии, необходимо осуществлять, опираясь на мгновенные значения тока.

### **3. Влияние расположения расчетной точки КЗ на условия нагрева кабелей**

Как уже упоминалось, некоторые нормативно-технические документы (НТД) зачастую имеют противоречия друг другу. В частности, в существующей нормативно-технической документации имеются расхождения требований по расчетным условиям проверки.



При выборе и проверке кабелей по нагреву токами КЗ расчетным считается наиболее тяжелый режим, при котором токи КЗ имеют максимальные значения. Произведем расчеты нагрева кабелей при трехфазных металлических КЗ.

При расчетах рассматривалась типовая схема электроснабжения напряжением 0,4 кВ от трансформаторов с различными номинальными мощностями (рис. 6). Параметры АВ, отключающего кабель при реализации дальнего резервирования, задаются в виде ВТХ автомата [10]. Общий вид характеристики представлен на рис. 10, где  $I_{ном}$  – номинальный ток АВ,  $I_{э/м.р.}$  и  $t_{э/м.р.}$  – минимальный ток и время срабатывания электромагнитного расцепителя,  $I_{р.о.}$  – ток КЗ, начиная с которого отключение автоматического выключателя будет происходить за счет давления, которое создается энергией дуги при КЗ, т.е. по характеристике «рефлексного» отключения (кривая 1 на рис. 11),  $t_{т.р.}$  – минимальное время срабатывания теплового расцепителя АВ,  $t_{р.о.}$  – максимальное время срабатывания «рефлексного» отключения.

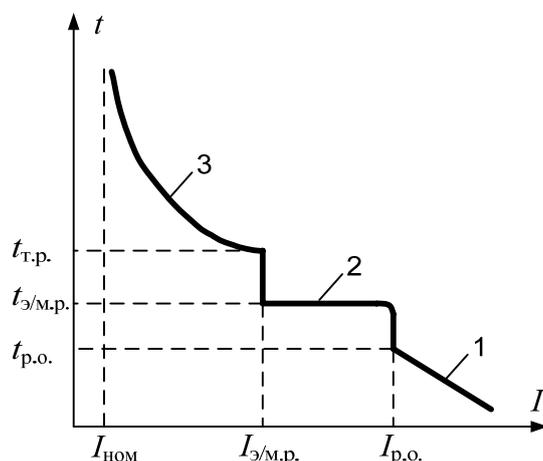


Рис. 10. Время-токовая характеристика АВ с тремя зонами отключения:

- 1 – зона «рефлексного» отключения; 2 – зона отключения электромагнитного расцепителя;  
3 – зона отключения теплового расцепителя

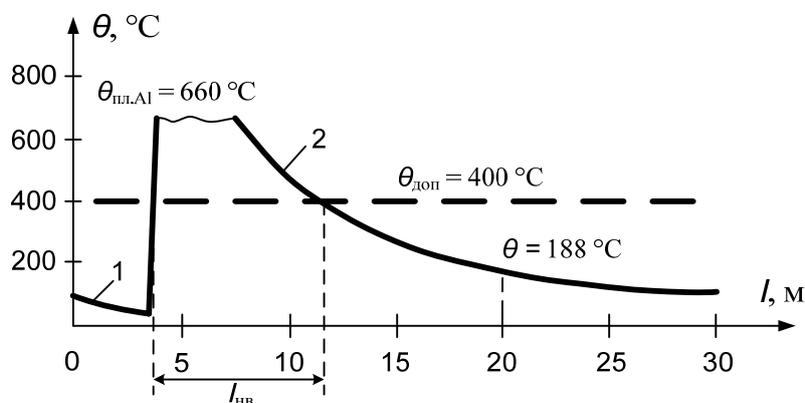


Рис. 11. Графическая зависимость  $\theta = f(I_{кз})$  при отключении тока КЗ электромагнитным расцепителем АВ или с помощью «рефлексного» отключения

Рассмотрим две типовые зависимости  $\theta = f(l)$ , полученные при вариативных расчетах.

График на рис. 11 представляет собой зависимость  $\theta = f(l)$ . Срабатывание автомата при возникновении КЗ на расстоянии от начала линии в диапазоне  $l = 0 \div 3,5$  м происходит по характеристике «рефлексного» отключения. В этой зоне при больших токах КЗ АВ срабатывает за минимальное время. За счет роста сопротивления кабеля с увеличением его длины ток КЗ уменьшается, время его протекания при этом остается практически постоянным. Соответственно, конечная температура нагрева КЛ уменьшается по мере отдаления расчетной точки КЗ от вторичной сборки (кривая 1, рис. 11).

Резкий скачок температуры нагрева кабеля обусловлен переходом АВ в зону срабатывания электромагнитного расцепителя. По мере возрастания дистанции до точки КЗ ток снижается с учетом соответствующего роста сопротивления кабельной линии, время его протекания при этом остается практически постоянным, т.к. АВ срабатывает в зоне действия электромагнитного расцепителя. Соответственно, конечная температура нагрева КЛ уменьшается по мере отдаления расчетной точки КЗ от вторичной сборки (кривая 2, рис. 11).

Следует также отметить, что на графике существует зона, для которой при возникновении КЗ расчетная температура КЛ становится выше температуры плавления металла проводника (для алюминия  $\theta_{пл} = 660^\circ\text{C}$ ). В связи с этим график в области температур выше  $660^\circ\text{C}$  не имеет физического смысла и на рисунках обрывается.

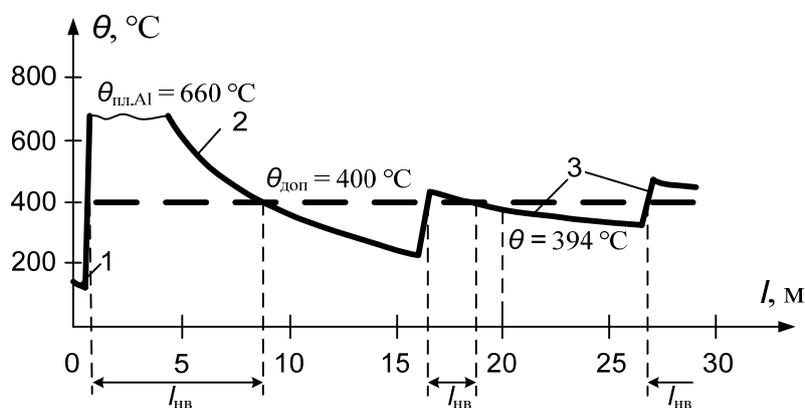


Рис. 12. Графическая зависимость  $\theta = f(l_{кЛ})$  при отключении тока КЗ любым расцепителем АВ

Аналогичное объяснение имеют кривые 1, 2, представленные на рис. 12. Однако, при возникновении КЗ на определённом расстоянии от начала КЛ ( $l \approx 16,5$  м в рассматриваемом примере) начинает срабатывать тепловой расцепитель АВ. Время воздействия тока КЗ опять увеличивается, и происходит очередной скачок температуры нагрева кабеля (кривая 3). Далее, по мере удаления расчетной точки КЗ возникает эффект, связанный с увеличением интенсивности роста ВТХ теплового расцепителя при плавно уменьшающемся токе КЗ.

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что оборудование (КЛ и АВ), выбранное согласно требованиям действующей нормативно-технической документации, в действительности не всегда удовлетворяет требованиям пожаростойкости.

С развитием компьютерного моделирования стало возможно производить проверку оборудования при различных авариях по методикам, которые ранее были нецелесообразны ввиду сложности расчетов. Однако в настоящее время эта задача решается с помощью доступных вычислительных средств.

Подводя итог, можно сформулировать основные выводы данного этапа исследования.

1. При отказе основной защиты расчетная температура нагрева кабеля не всегда будет максимальной при возникновении КЗ в начале линии или на расстоянии 20 м от ее начала, как регламентируют основные НТД.

2. Удаленность от начала линии точки КЗ, приводящей к наибольшему нагреву КЛ, зависит от параметров схемы и ВТХ автоматического выключателя и не может быть определена в обобщенном виде для различных схем.

В результате данных исследований можно сформулировать основной подход к нахождению наиболее опасного места повреждения проводника. Для этого необходимо делать прямой перебор всех длин с определённым шагом с помощью компьютерного моделирования.

#### **4. Учет неадиабатического нагрева**

При расчётной продолжительности короткого замыкания до 1 с процесс нагрева проводников под действием тока КЗ допустимо считать адиабатическим, а при расчётной продолжительности более 1 с или при небыстродействующих АПВ следует учитывать теплоотдачу в окружающую среду [п. 8.1.2, 7].

В низковольтных сетях, где большое распространение имеет именно дальней резервирование, т.е. отключение поврежденного участка в случае отказа основной защиты силами вышестоящих и обслуживающих соседние участки коммутационных аппаратов, сохраняется большая вероятность довольно длительных аварий. Очевидно, что в этом случае необходим учет отвода тепла в окружающую среду при расчете нагрева кабельных линий.

Данная проблематика наиболее подробно раскрыта в [11], однако методика расчета процесса неадиабатического нагрева в данном документе основывается на учете неадиабатического коэффициента. Упомянутый коэффициент предлагается рассчитывать по формулам, содержащим эмпирические коэффициенты, что влечет за собой получение неточного результата и не дает возможности рассмотрения физики процессов в кабеле при его нагреве.

Нормативные документы [7] и [8] также регламентируют принципы расчета неадиабатического нагрева, однако методики определения неадиабатического

коэффициента отличаются друг от друга, но все так же основаны на эмпирических данных.

При расчете температуры нагрева кабеля с учетом отвода тепла в окружающую среду необходим обязательный учет теплового спада тока.

При увеличении активного сопротивления ( $R$ ) вследствие нагрева кабеля конкурируют два противоположных явления. С одной стороны снижается ток КЗ, а значит уменьшается нагрев проводника. С другой стороны рост  $R$  кабеля, по закону Джоуля-Ленца  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ , ведет к увеличению нагрева проводника. Какое из явлений окажется главенствующим, заранее сказать невозможно.

Рассмотрим уравнение теплового процесса в кабеле, вывод которого представлен в [12]:

$$j^2 \cdot \rho = c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{K}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2},$$

где  $j$  – плотность тока,  $\rho, \gamma, c, K$  – удельное сопротивление, плотность, удельная массовая теплоёмкость, коэффициент теплопроводности материала проводника соответственно,  $\theta$  – температура нагрева кабеля,  $t$  – время,  $r$  – радиальная координата.

Так как дифференциальное уравнение получилось в частных производных второго порядка и по разным параметрам, то аналитически решить его в общем виде представляется затруднительным. Поэтому используют методы численного интегрирования. Например, метод конечных разностей.

Сущность метода конечных разностей заключается в том, что область непрерывного изменения аргумента ( $r$  и  $t$ ) заменяется конечным (дискретным) множеством точек (узлов). Вместо функций непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определенные в узлах сетки. Производные, входящие в дифференциальные уравнения, аппроксимируются при помощи соответствующих разностных соотношений. Дифференциальные уравнения при этом заменяются системой алгебраических уравнений (разностными уравнениями). Начальные и краевые условия тоже заменяются разностными начальными и краевыми условиями для сеточной функции.

Граничными условиями рассматриваемой задачи теплопроводности будут являться температуры по всей длине кабеля в момент возникновения КЗ, т.е. в момент времени  $t = 0$ , и температуры по краям кабеля в любой момент времени, т.е. температура окружающей среды.

Для решения уравнения методом конечных разностей можно использовать явную схему Эйлера, реализованную на четырёхточечном шаблоне (рис. 13, а), которая вычисляет значение результата через несколько соседних точек данных:

$$\theta_{i,j} = A + (1 - C) \cdot \theta_{i,j-1} + \frac{C}{2} \cdot (\theta_{i-1,j-1} + \theta_{i+1,j-1}),$$

где  $A = \frac{j^2 \cdot \rho \cdot \Delta t}{c \cdot \gamma}$  – коэффициент, отвечающий за нагрев проводника по закону Джоуля-

Ленца,  $C = \frac{K \cdot \Delta t}{c \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \Delta r^2}$  – коэффициент Куранта, характеризующий интенсивность теплопередачи.

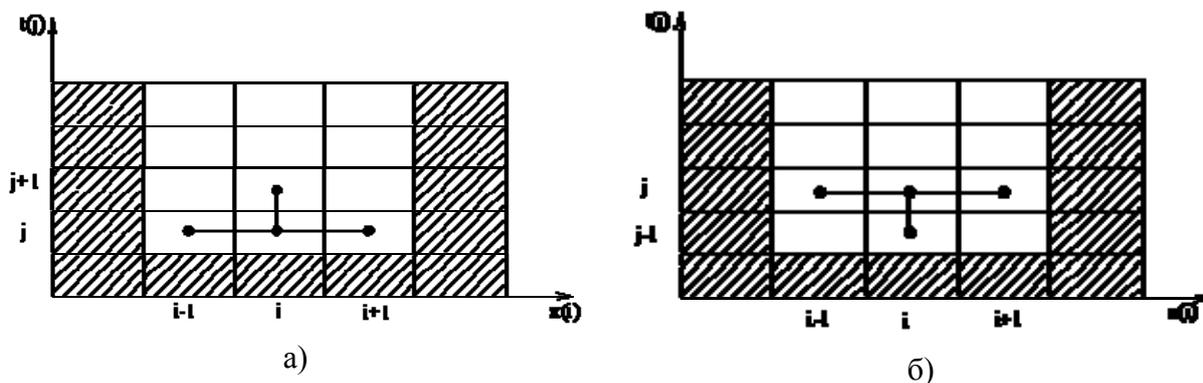


Рис. 13. Четырёхточечная схема Эйлера: а) явная; б) неявная

Однако применение явной схемы Эйлера имеет ряд ограничений. Это связано с устойчивостью разностной схемы, которую характеризует коэффициент Куранта.

Условие Куранта заключается в том, что скорость распространения возмущений в разностной задаче не должна быть меньше, чем в дифференциальной. Тогда  $C < 1$ .

Данный критерий устойчивости может не выполняться в том случае, если при исследовании достаточно тонких кабелей необходимо выбрать слишком малый шаг по координате по сравнению с шагом по времени. В этом случае результат разностной схемы может не стремиться к решению дифференциального уравнения (рис. 14).

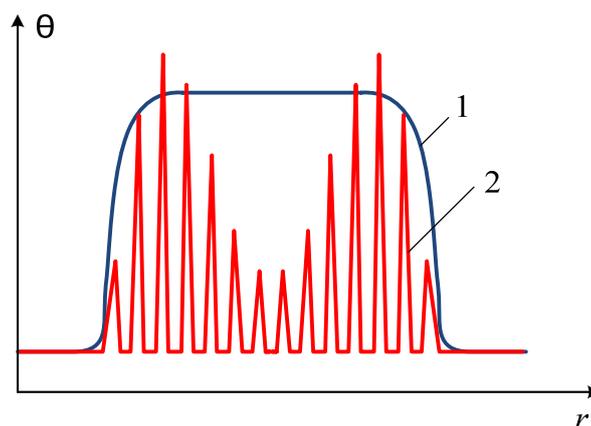


Рис. 14. Пример потери устойчивости разностной схемы: решение дифференциального уравнения: 1 – при  $C < 1$ ; 2 – при  $C > 1$

В рамках данной работы был проведен ряд вариативных расчетов. Результаты расчетов показали, что разностная схема теряет устойчивость при исследовании кабельных линий сечением  $6 \text{ мм}^2$  с алюминиевыми жилами и  $4 \text{ мм}^2$  с медными жилами и менее.

В случаях, когда коэффициент Куранта больше единицы, система становится неустойчивой и полученное решение не имеет физического смысла. Выходом из ситуации является использование неявной схемы Эйлера (рис. 13, б), которая является устойчивой при любых значениях коэффициента Куранта.

Однако ценой устойчивости является необходимость решения на каждом шаге по времени системы алгебраических уравнений:

$$A_i \cdot \theta_{i-1} - B_i \cdot \theta_i + C_i \cdot \theta_{i+1} = F_i,$$

где  $A_i, B_i, C_i$  – коэффициенты, которые выражаются через шаги по координате и времени ( $r$  и  $t$ ),  $F_i$  – коэффициент, в котором заключаются известные значения слоя  $j$ .

Данной системе уравнений будет соответствовать трехдиагональная матрица, для численного решения которой можно воспользоваться методом Гаусса:

$$Y = \begin{pmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & B_n \end{pmatrix}$$

Трёхдиагональные матрицы наиболее эффективно с точки зрения трудозатрат решать методом прогонки, который является численно устойчивым и проявляет слабую чувствительность как к погрешностям задания начальных условий, так и к погрешностям вычислительного характера. Суть метода прогонки заключается в том, что, используя специфику структуры матрицы системы уравнений (наличие трех диагоналей), удаётся получить рекуррентные формулы для вычисления последовательности коэффициентов прогонки

$$\alpha_i = \frac{f_i - a_i \cdot \alpha_{i-1}}{b_i + a_i \cdot \beta_{i-1}},$$

$$\beta_i = \frac{-c_i}{b_i + a_i \cdot \beta_{i-1}},$$

которые позволяют на обратном ходу вычислить значения функции в узлах сетки:

$$\theta_n = \alpha_n + \beta_n \cdot \theta_{n+1}.$$

На рис. 15 представлен графический пример результатов расчета нагрева кабеля с учетом неадиабаты по радиальной координате  $r$  для разных моментов времени по предложенной методике.

Из анализа представленной зависимости  $\theta = f(r)$  (рис. 15) можно сделать вывод, что при учете неадиабатического нагрева воздух вокруг кабеля не успевает прогреваться до высоких температур, это соответствует реальной картине, поскольку

воздух обладает худшими свойствами теплопроводности по сравнению с материалом проводника. То же относится и к слою изоляции.

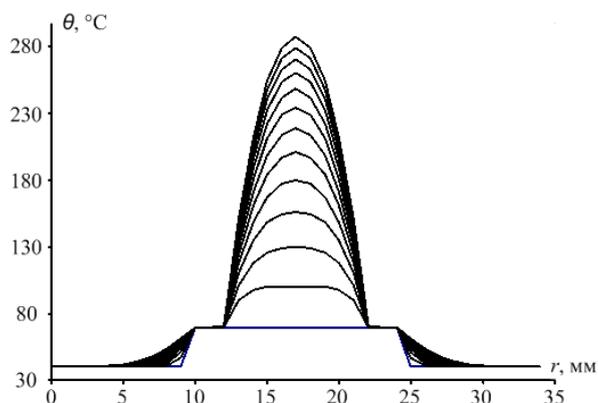


Рис. 15. Пример результатов расчета нагрева кабеля с учётом неадиабаты

Обычно электротепловые процессы в кабелях рассчитываются, как адиабатический процесс. Но для больших времен необходимо рассматривать неадиабатический процесс, иначе погрешность расчета может достигать 5-15% в сторону как увеличения, так и уменьшения температур.

## ВЫВОДЫ

В данной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана новая уточненная методика для расчета температуры нагрева проводников в сетях 0,4 кВ. Определены граничные условия ее применения.
2. Проанализирована существующая нормативно-техническая документация, регламентирующая исследуемую проблематику.
3. Обоснованы расчетные условия для проверки кабельных линий на возгорание.
4. Создана математическая модель неадиабатического нагрева проводников.
5. Разработан программный модуль для расчета температур нагрева КЛ в системах собственных нужд станций и подстанций.

Основные тезисы, представленные в работе, отражены в публикациях [9, 13 – 17].

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Официальный сайт МЧС России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/>
2. Правила устройства электроустановок. – 6-ое изд., перераб. и доп., с изм. – СПб. : изд-во ДЕАН, 2005. – 463 с.

3. ГОСТ Р 52736-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания». – М. : Стандартинформ, 2007. – 40 с.
4. Циркуляр № Ц-02-98(э) «О проверке кабелей на возгорание при воздействии тока короткого замыкания» Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России», 1998. – 12 с.
5. Директивное указание от 18.04.1986 №2794-Э «О проверке кабелей 0,4 кВ по условиям нагрева при коротких замыканиях». – СПб.: СПбАЭП, 1986.
6. Новости Электротехники. Приложение «Вопрос – ответ». 2007. №6. С. 27.
7. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527-98 / под ред. Б. Н. Неклепаева. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. 152 с
8. ГОСТ 28249-93. Токи короткого замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
9. Лapidус А.А., Соловьёва С.Н. Влияние расположения расчётной точки короткого замыкания на условия нагрева кабелей 0,4 кВ при реализации дальнего резервирования // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. №5. С. 8 – 13.
10. Автоматические выключатели типа COMPACT NS. Технические условия. 1996.
11. ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88). Расчёт термически допустимых токов короткого замыкания с учётом неадиабатического нагрева. – М. : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1991. – 13 с.
12. Лapidус А.А. Моделирование и расчёт электротеплового процесса в кабелях напряжением до 1000 В при коротких замыканиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. №6 (70). С. 93 – 98.
13. Лapidус А.А., Соловьёва С.Н. Специфика расчета нагрева проводников // Новости Электротехники. 2010. №2. С. 44 – 46.
14. Лapidус А.А., Соловьёва С.Н. Расчёт нагрева кабелей при реализации дальнего резервирования в сетях 0,4 кВ // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XIV Всерос. конф. Т.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 185 – 186.
15. Соловьёва С.Н., Лapidус А.А. Методика проверки кабелей 0,4 кВ при реализации дальнего резервирования с учетом время-токовых характеристик автоматов // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: материалы конференций политехнического симпозиума. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 69 – 71.
16. Лapidус А.А., Соловьёва С.Н. Учёт неадиабатического нагрева при проверке кабелей 0,4 кВ на возгорание // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XIV Всерос. конф. Т.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С 185 – 186.
17. Лapidус А.А., Соловьёва С.Н. Анализ термического действия токов короткого замыкания в кабельных линиях напряжением 0,4 кВ в зависимости от места повреждения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №3 (130). С. 46 – 50.

## АННОТАЦИИ РАБОТ ЛАУРЕАТОВ КОНКУРСА В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ПРОЕКТ МОЛОДОГО УЧЕНОГО»

Н.М. Вербова (доцент, СПбГМТУ)

Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет  
Научный руководитель – М.В. Агунов, д.т.н., профессор СПбГМТУ

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФАЗОВРАЩАЮЩИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ И СИСТЕМАХ С ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ

На первый взгляд формирование ортогонального напряжения несложно. Как кажется, это можно сделать, просто сдвинув напряжение на 90 электрических градусов или, что то же самое, задержать его на четверть периода.

В цепях с несинусоидальными режимами ситуация становится еще более сложной. Здесь для создания ортогонального сигнала необходимо задержать на четверть периода каждую гармонику из полосы частот составляющих несинусоидальный сигнал.

Практически всем низкочастотным аналоговым схемам, использующим либо конденсаторы, либо катушки индуктивности неотъемлемо присуще внесение большего сдвига, чем фаза в 90 градусов. Это объясняется тем обстоятельством, что конденсаторы и катушки индуктивности являются причинными элементами, данное означает, что они могут "помнить" то, что происходило в прошлом, но не обладают никакими средствами предсказания будущего. Таким образом, более высокочастотные гармонические составляющие сигнала несинусоидальной формы имеют тенденцию все большего и большего отставания.

Этот эффект известен как проблема группового запаздывания (задержки).

Фазочастотная характеристика электрической цепи связана с функцией группового времени запаздывания соотношением:

$$\theta(\omega) = -\int t_{\Gamma}(\omega) d\omega + \theta_0.$$

Фактически, как оказывается, известного точного способа построения широкополосных аналоговых квадратурных схем до сегодняшнего дня не существовало.

С другой стороны, в соответствии с теоремой Бореля (теорема о свертке) согласно которой

$$F[f_1(t) * f_2(t)] = F_1(\omega) \cdot F_2(\omega),$$

где  $F[f_1(t)*f_2(t)]$  – преобразование Фурье свертки функций  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$ ;  $F_1(\omega)$  и  $F_2(\omega)$  – преобразования Фурье соответственно функций  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$ , существует потенциальная возможность реализации беспричинной разностной цепи в виде свертки двух функций.

Свертка реализуется как математическая операция, где каждое выходное значение выражается суммой входных значений сигнала умноженных на набор взвешенных коэффициентов импульсной характеристики электрической цепи.

Таким образом, успех решения всей задачи сводится к нахождению топологии и параметров широкополосной квадратурной фазовращающей цепи реализующей преобразование входного несинусоидального напряжения в желаемое выходное в соответствии с преобразованием Гильберта.

Для реализации цепи осуществляющей преобразование Гильберта, необходимо представить уравнение в виде, удовлетворяющем условиям физической реализации. Для этого интеграл заменим на сумму бесконечного числа слагаемых, тогда

$$s_1(t) = H\{s\} = -\frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{s(t + \tau_n) - s(t - \tau_n)}{\tau_n} \Delta \tau_n, \quad (1)$$

где  $\frac{s(t + \tau_n) - s(t - \tau_n)}{\tau_n} \Delta \tau_n$  - элемент суммы;  $\Delta \tau_n$  – сегмент разбиения;  $\tau_n = \sum_{i=0}^n \Delta \tau_i$ .

Запишем (1) следующим образом:

$$s_1(t) = H\{s\} = -\frac{1}{\pi} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Delta \tau_n}{\tau_n} s(t + \tau_n) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Delta \tau_n}{\tau_n} s(t - \tau_n) \right]. \quad (2)$$

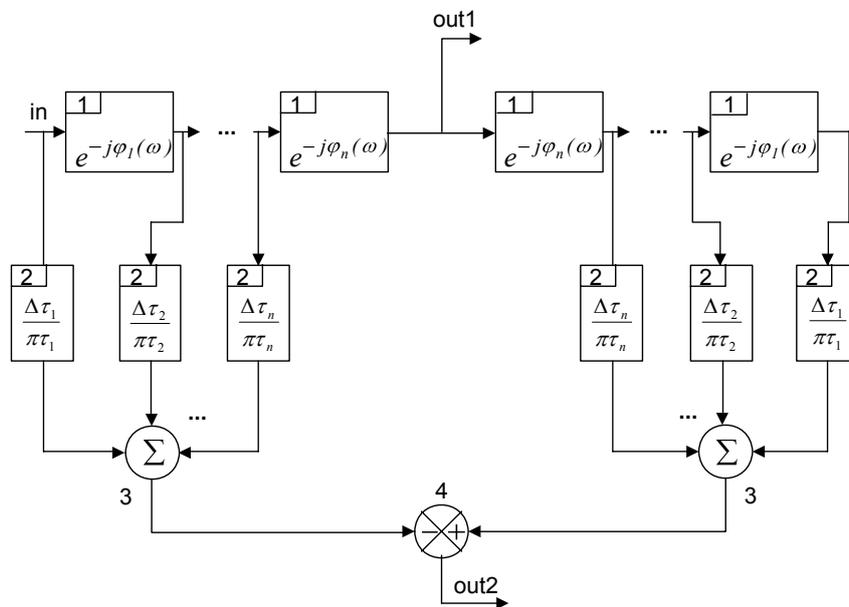


Рис. 1

Из (2) следует, что преобразование Гильберта может быть физически реализовано с помощью двух операций суммирования взвешенных сигналов с  $n$  входов

для каждой операции суммирования, операции получения разности двух сумм и  $2n$  операций преобразования группового времени запаздывания сигнала.

Операции взвешивания, суммирования и операция получения разности двух сумм могут быть реализованы, с помощью одного операционного усилителя. Для реализации групповой задержки сигнала, на некоторое время, могут быть использованы фазовые контуры.

Таким образом, в соответствии с (2), широкополосный квадратурный разностный фазовращатель (преобразователь Гильберта) будет иметь структуру, показанную на рис. 1.

$$\begin{aligned}
 W_H(p) = & -h_1 \frac{1}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)\dots W_n(p)} - h_2 \frac{1}{W_2(p)W_3(p)\dots W_n(p)} - \\
 & - h_3 \frac{1}{W_3(p)\dots W_n(p)} - \dots - h_n \frac{1}{W_n(p)} + h_n W_n(p) + \dots + h_3 W_3(p)\dots W_n(p) + \\
 & + h_2 W_2(p)W_3(p)\dots W_n(p) + h_1 W_1(p)W_2(p)W_3(p)\dots W_n(p).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Для реализации преобразования Гильберта передаточная характеристика (3) для области положительных частот должна определяться как  $e^{-j\pi/2}$  или  $-j$ , а для области отрицательных частот как  $e^{j\pi/2}$  или  $j$ .

Такое равенство возможно, если передаточная функция элементарного фазового контура определяется как  $e^{-j\varphi(\omega)}$ . К элементам, имеющим такие передаточные характеристики относятся линии задержки или фазовые фильтры.

А.А. Гиргидов, А.Д. Гиргидов (к.т.н., в.н.с.)

ОАО «ВНИИГ им. Веденеева»

Научный руководитель – Фёдоров М.П., чл.-корр. РАН, ректор СПбГПУ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАССЕЙВАЮЩИХ ТРАМПЛИНОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПРИДОННЫХ СКОРОСТЕЙ В ВОДОБОЙНОМ КОЛОДЦЕ

Отмечается, что при расчете нагрузок на водобойную плиту в случае высоконапорных гидроузлов, следует учитывать нагрузку, возникающую при больших придонных скоростях. Они могут создавать не только значительные силы на поверхности плит, но при определенных условиях являться причиной возникновения взвешивающей силы, действующей на блоки водобойной плиты водобоя. Для уменьшения придонных скоростей рекомендуется в концевую часть водосброса

включить группу рассеивающих трамплинов с поверхностью двойкой кривизны. Численное моделирование режима работы колодца показывает, что при этом в колодце формируется затопленный гидравлический прыжок, а придонные скорости уменьшаются более чем в два раза, а, следовательно, происходит уменьшение нагрузки более чем в четыре раза.

Е.Г. Гурова (к.т.н., доцент)

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель – Н.И. Щуров, ФГБОУ ВПО «НГТУ», д.т.н., зав. кафедрой,  
профессор каф. ЭТК, декан ФМА

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВИБРОЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО ТРАНСПОРТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Одной из важнейших инженерных задач является борьба с шумом и вибрациями, создаваемыми работающими машинами и механизмами. Данная проблема наиболее остро стоит в автомобилестроении, судостроении, локомотивостроении, промышленности во всех областях техники. Вибрационные колебания оказывают значительное негативное влияние на надёжность и работоспособность различных устройств. Особенно опасны такие колебания для человека, вызывая различные заболевания.

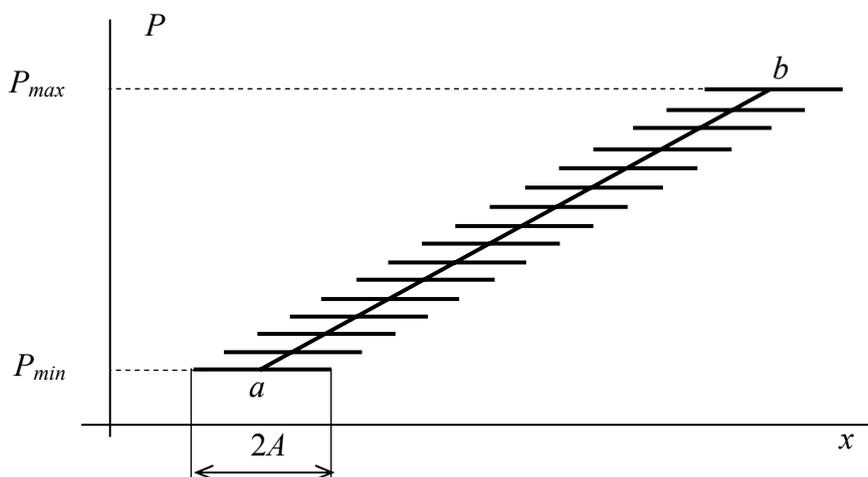


Рис. 1. Силовая характеристика виброизолятора с плавающим участком нулевой жёсткости

Как известно вибрация – произвольные пространственные колебания, то есть и исключать вибрацию необходимо относительно всех трех осей. Сегодня наиболее распространённым методом защиты от пространственных вибраций, создаваемых

двигателями, является их установка на пассивные виброизоляторы (пружины, амортизаторы). Однако, отличаясь простотой и надёжностью, такие виброизоляторы малоэффективны, так как снижение их коэффициента жёсткости с целью уменьшения передаваемых динамических усилий, приводит к увеличению относительных перемещений двигателя и сочленяемого с ним оборудования. От этого недостатка избавлены виброизоляторы с плавающим участком нулевой жёсткости, силовая характеристика, которых относительно одной оси пространства показана на рисунке 1.

Характеристика виброизолятора представляет собой бесконечное множество отрезков прямых, равных по длине размаху колебаний  $2A$ , параллельных оси перемещений  $x$  и расположенных своими серединами на наклонной прямой  $ab$ . Виброизолятор с такой силовой характеристикой обеспечивает практически нулевую жёсткость для колебаний с частотой вибрации, исключая передачу динамических усилий на защищаемое основание. В то же время, для медленно изменяющихся внешних усилий  $P$  виброизолятор имеет вполне определённую жёсткость, определяемую углом наклона прямой  $ab$  на рисунке 1.

Рассмотренную силовую характеристику нулевой жёсткости можно получить, если параллельно несущему упругому элементу включить компенсатор жёсткости, который имеет падающую силовую характеристику. Для того, чтобы виброизолятор сохранял работоспособность при изменяющихся внешних усилиях, компенсатор жёсткости снабжают устройством управления, обеспечивающим перемещение участка нулевой жёсткости по силовой характеристике при изменении взаимного положения вибрирующего и защищаемого объектов.

Одним из вариантов компенсатора является электромагнитный компенсатор жёсткости (ЭКЖ) [1], представляющий собой два встречно включенных электромагнита постоянного тока с общим якорем. Была разработана, изготовлена и испытана модель одноосного виброизолятора с ЭКЖ и устройством управления. Эксперименты показали, что виброзащитное устройство с перестраиваемым ЭКЖ снижает уровни виброускорений на 20-55 дБ на частотах от 4 до 128 Гц и позволяет исключить возникновение резонансных режимов. Проведенные испытания показали работоспособность и эффективность одноосного адаптивного виброизолятора с электромагнитным компенсатором жёсткости. Для исключения пространственных вибраций разработана методика установки одноосных виброизоляторов.

На основании проведенных теоретических и практических исследований одноосного виброизолятора с ЭКЖ для исключения пространственных вибраций предложен трехосный виброизолятор с электромагнитным компенсатором жесткости, который позволит обеспечить идеальную виброизоляцию как при постоянных по величине, так и при произвольно меняющихся нагрузках относительно всех трех осей.

Для описания пространственной вибрации и предлагаемого виброизолятора будем использовать математический аппарат – кватернионы (система гиперкомплексных чисел):

$$q = u + x \cdot \bar{i} + y \cdot \bar{j} + z \cdot \bar{k} .$$

Предлагаемый математический аппарата описывает пространственное движение материальной точки или твердого тела, что позволяет разработать методики расчета и проектирования предлагаемого трехосного виброизолятора. Трехосный виброизолятор может быть использован в любой области машиностроения и техники, а также может оказаться очень эффективным для защиты человека от вибраций, генерируемых энергетическими установками транспортных средств.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент 031010. Виброизолятор с электромагнитным компенсатором жёсткости [Текст]/ Гурова Е.Г., В.Ю. Гросс (РФ). - № 2010121808; заявл. 28.05.2010 – 7 с.: ил.

А.А. Мухамадиев (докторант), Р.Г. Фаррахов (доцент)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Научный руководитель – М.А. Ураксеев, д.т.н., профессор УГАТУ

### АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТОВ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Во многих технологических процессах возникает необходимость измерения температуры. При этом часто требуется обеспечить высокую точность и чувствительность в широком диапазоне измерения. Имеющиеся не сегодняшний день способы и средства измерения, основанные на них, не позволяют измерять температуру с высокой точностью и чувствительностью в широком диапазоне измерения. Невысокая точность измерения обусловлена тем, что коэффициент излучения объектов либо неизвестен, либо изменяется по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, а также не возможностью сканирования спектра излучения с целью выбора окон прозрачности атмосферы. Работа направлена на решение данной проблемы, т.е. на разработку акустооптического измерительного преобразователя температуры, обладающего улучшенными метрологическими характеристиками.

Проведенный анализ различных способов и средств измерения, основанных на них, показал, что основные ограничения метрологических характеристик вводятся используемыми элементами оптики, которые ограничивают количество длин волн на которых производятся измерения. Для качественного улучшения характеристик

предлагается использование активной оптики, основанной на акустооптическом эффекте.

В качестве данного элемента предлагается использовать акустооптический перестраиваемый фильтр, на базе которого проектируется акустооптический монохроматор, имеющий еще и поляризаторы, расположенные перед и после фильтра, для продифрагировавшего и непродифрагировавшего пучков излучения. Акустооптический монохроматор предназначен для выделения из широкого спектрального диапазона электромагнитного излучения узкой линии, длина волны которой изменяются в соответствии с электронным управляющим сигналом.

Предлагаемое устройство (рисунок 1) работает следующим образом. Электромагнитная волна в виде светового потока, излучаемая объектом, температуру которого необходимо измерить, поступает в оптический блок 1, проходит через стеклянное окно прозрачное в инфракрасном диапазоне 2 и фокусируется линзой 3 на входной торец волоконного световода 4. С выходного торца световой поток попадает на акустооптический монохроматор 5 и в результате его дифракции на акустических волнах, пропускается лишь монохроматический поток с эффективной длиной волны  $\lambda_{эф}$ . Перестройка монохроматора осуществляется по управляющему сигналу. Пропущенное монохроматическое оптическое излучение с эффективной длиной волны  $\lambda_{эф}$  попадает в измерительный блок 6, имеющий соответствующую элементную базу и программное обеспечение. Устройство индикации измерительного блока показывает температуру объекта в соответствии с интенсивностью оптического излучения [1, 2].

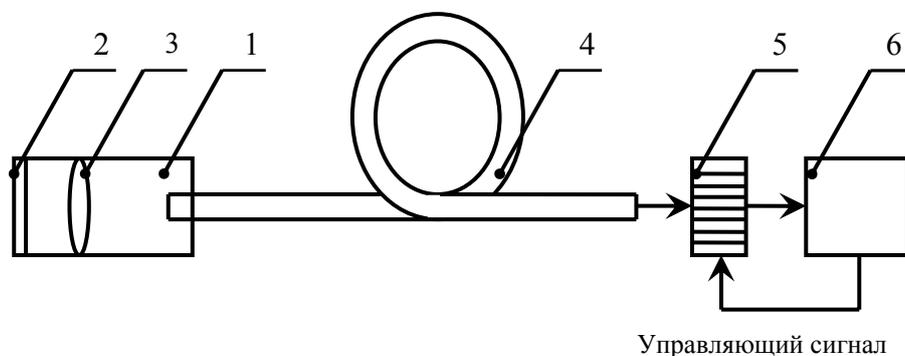


Рис. 1. Структурная схема акустооптического измерительного преобразователя температуры

Возможность проведения измерения на разных длинах волн позволит с высокой точностью и чувствительностью в широком диапазоне измерять температуру при неизвестном коэффициенте излучения объектов, либо изменении температуры по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, а также имеет возможность сканирования спектра излучения с целью выбора окон прозрачности атмосферы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Пат. 2399892 РФ, МПК<sup>7</sup> G01K1/02, G02F1/33. Оптический преобразователь температуры / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. (RU). – № 2009122755/28; заявл. 15.06.2009; опубл. 20.09.2010
2. Пат. 88801 РФ, МПК<sup>7</sup> G01J5/10. Устройство дистанционного измерения температуры / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. (RU). – № №2009126218/22; заявл. 08.07.2009; опубл. 20.11.2009, Бюл. №32.

С.С. Налимова (ассистент)

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель – В.А. Мошников, д.ф.-м.н., проф. каф. МНЭ СПбГЭТУ

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛООКСИДОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ

В настоящее время полупроводниковые адсорбционные сенсоры на основе оксидов металлов широко востребованы в экологическом мониторинге, медицинской неинвазивной диагностике, экспресс-мониторинге качества продуктов, криминалистике, военном деле, машиностроении, горном деле и других областях. Низкая стоимость и коммерческая доступность этого типа сенсоров определили их наиболее широкое практическое использование. Одной из наиболее перспективных областей применения металлооксидных сенсоров является медицинская неинвазивная экспресс-диагностика. Сенсорные материалы с повышенной чувствительностью к ацетону могут представлять интерес для разработки устройств для самоконтроля больных сахарным диабетом, а исследование чувствительности к этанолу перспективно для создания устройств диагностики инфекционных заболеваний мочевыводящих путей. В последнее время ведутся разработки по получению сенсорных материалов в виде многокомпонентных металлооксидов, которые в ряде случаев обладают улучшенными газочувствительными свойствами. Повышение газочувствительности возможно при правильном выборе отдельных составляющих и их соотношения. В этом случае создается новый синергетический эффект наносистемы – раздельное ускорение процессов адсорбции и окисления молекул газа [1]. Целью работы являлось развитие возможностей диагностики и направленного изменения адсорбционных свойств поверхности металлооксидов для управления их сенсорным откликом к парам ацетона и этанола.

Металлооксиды ( $ZnO$ ,  $Fe_2O_3$  и  $ZnFe_2O_4$ ) были синтезированы методом химического соосаждения. Исследования микроструктуры порошков методом растровой электронной микроскопии показали, что размеры наночастиц оксида цинка имеет разброс в диапазоне 20-300 нм, в то время как наночастицы оксида железа

практически монодисперсны – 10 нм, а размеры наночастиц при образовании цинкового феррита составляют 20-30 нм.

Проведено исследование чувствительности ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, полученных методом химического соосаждения, к парам ацетона и этанола. Максимальные значения газочувствительности к обоим газам имеет цинковый феррит. Его чувствительность к этанолу почти в 6 раз превышает чувствительность оксида цинка и в 25 раз – оксида железа, а чувствительность к ацетону увеличивается в 1250 раз по сравнению с оксидом цинка и приблизительно в 70 раз по сравнению с оксидом железа. Полученные в работе высокие значения газочувствительности могут быть объяснены образованием перколяционного стягивающего кластера при условиях, незначительно превышающих порог протекания.

Исследование распределения поверхностных центров по кислотно-основным свойствам проводилось методом адсорбции кислотно-основных индикаторов. Полученные данные (рис. 1) показали, что на поверхности ZnO преобладают льюисовские кислотные центры при невысоком содержании бренстедовских центров. Поверхность Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> преимущественно заполнена слабокислыми бренстедовскими центрами (гидроксильными группами с pK<sub>a</sub> = 5.0), а также льюисовскими основными центрами (атомами кислорода) с pK<sub>a</sub> < 0. Для ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> характерно высокое содержание бренстедовских центров, обладающих выраженными кислотными свойствами (pK<sub>a</sub> = 2.5) за счет особенностей перераспределения электронной плотности в элемент-кислородных связях смешанного оксида. Обнаружено, что чувствительность образцов к этанолу коррелирует с концентрацией гидроксильных групп кислотного типа с pK<sub>a</sub> 2.5 (рис. 2), что может быть обусловлено способностью молекул C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH к адсорбции на центрах данного типа [2].

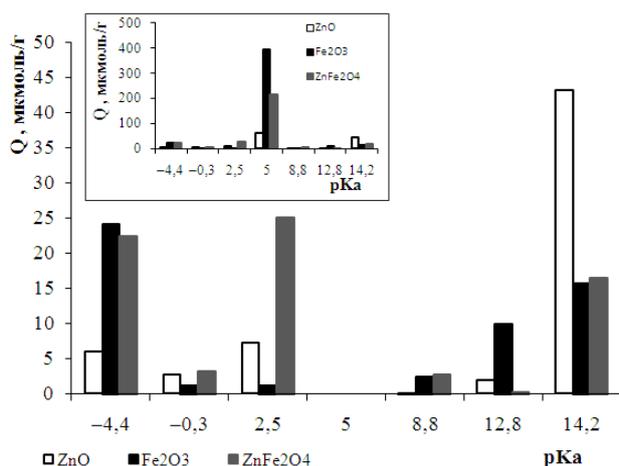


Рис. 1. Распределение центров адсорбции на поверхности ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

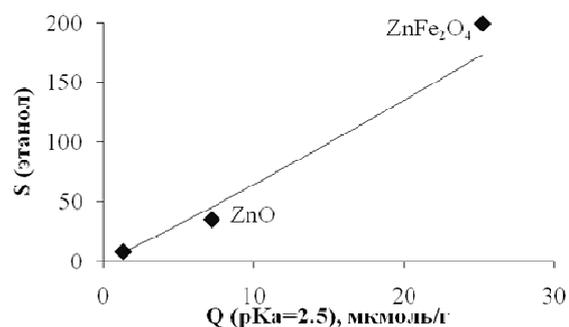


Рис. 2. Зависимость чувствительности к этанолу от содержания гидроксильных групп кислотного типа (pK<sub>a</sub> 2.5)

Химический состав поверхности нанопорошков исследовался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. При рассмотрении вклада кислорода в виде гидроксильных групп и в форме  $O^{2-}$  обнаружено, что оптимальным условием для достижения повышенной газочувствительности является соизмеримая величина данных пиков. Этот факт обусловлен тем, что при детектировании восстанавливающих газов происходит два процесса – адсорбция молекул газа и их окисление. Адсорбция молекул газа происходит с участием кислотных центров Бренстеда (т.е. гидроксильных групп кислотного типа), в то время как в реакции полного окисления молекул принимает участие кислород формы  $O^{2-}$ . Для достижения большой величины сенсорного сигнала и малого времени отклика необходимо, чтобы скорости реакций адсорбции и окисления были соизмеримы. Поэтому должно быть соизмеримо количество адсорбционных центров и элементов, за счет которых происходит окисление.

Таким образом, применение в качестве газочувствительных материалов многокомпонентных металлооксидов позволяет достичь эффекта увеличения чувствительности к парам ацетона и этанола. Это достигается правильным выбором компонентов (например, Zn и Fe), обеспечивающим оптимальное соотношение поверхностных центров адсорбции и окисления этих газов. Разработанные материалы перспективны для создания на их основе сенсоров для целей медицинской неинвазивной диагностики, например для самоконтроля больных сахарным диабетом, и диагностики инфекционных заболеваний мочевыводящих путей.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Карпова С.С. Механизм взаимодействия восстанавливающих газов с оксидами металлов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 6. – С. 15-24.
2. Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства  $ZnO$ ,  $Fe_2O_3$  и  $ZnFe_2O_4$  / С. С. Карпова, В. А. Мошников, С. В. Мякин, Е. С. Коловангина // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, Вып. 3. – С. 369–372.

В.Е. Овсянников (к.т.н., молодой ученый)  
ФГБОУ ВПО «Курганский государственный университет»  
Научный руководитель – В.Н. Орлов, к.т.н., профессор кафедры «Инноватики и менеджмента качества»

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Одной из основных задач модернизации отечественного машиностроения, является широкое внедрение станков с ЧПУ. Значительным недостатком существующих станков с ЧПУ, является то, что они зачастую не гарантируют заданных жестких требований по точности и качеству обработки деталей. Поэтому для более эффективного использования станков необходимо решить проблему создания надежного аппарата технологического диагностирования процесса обработки, а также необходим подход к управлению технологическим процессом, основанный на адаптации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, связанных с разработкой модели шероховатости поверхности, установлением взаимосвязи параметров шероховатости поверхности с параметрами виброакустического сигнала и разработкой устройства для автоматического обеспечения шероховатости поверхности в процессе резания

С точки зрения теории случайных функций, профиль поверхности рассматривается как реализация стационарной случайной функции, характеризующей профиль шероховатости:

$$y(t) = y_{\beta}(t) + y_{\gamma}(t)$$

где  $y_{\beta}(t)$  – детерминированная составляющая,  $y_{\gamma}(t)$  – случайная составляющая.

Разделение профиля на случайную и систематическую составляющие и их анализ дает возможность определить текстуру профиля и управлять характеристиками шероховатости поверхности.

Геометрическая интерпретация корреляционной функции основной модели, которая может быть описана следующей формулой:

$$K_{xx}(\tau) = 0,5A^2 \cos \frac{2\pi}{T\beta} \tau + D_{\gamma} e^{-\alpha\tau^2}$$

Для расчета корреляционной функции профиля поверхности необходимо через параметры шероховатости поверхности  $Ra$ ,  $Sm$  выразить следующие величины: дисперсию случайной составляющей  $D_{\gamma} = K_{\gamma}(0)$ , коэффициент затухания корреляционной функции случайной компоненты  $\alpha$ , амплитуду систематической составляющей  $A$ , шаг систематической составляющей  $T_{\beta}$ .

В случае, когда в профиле поверхности преобладает систематическая составляющая и его можно описать суммой трех гармоник, возможно применение в качестве модели – площади поперечного сечения профиля шероховатости. В этом случае площадь прямоугольника  $2R_q l$  будет характеризовать среднюю площадь профиля:

$$S_{pr} = 2R_q l = 2l \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dl}$$

Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке мод. 16К20 и токарном станке с программным управлением 16К20РФ3С5Р132. В качестве обрабатываемого материала применялись конструкционные, углеродистые стали марок ст.45, ст.3, а также сталь 12ХН. Выбор диапазона изменения факторов проводился на основе предварительных исследований и обзора литературы, и исходя из производственного опыта.

Было изучено влияние технологических факторов (скорости резания, подачи и износа) на основную модель шероховатости и параметры вибросигнала. Были получены следующие уравнения регрессии:

$$\gamma(S) = 0.98246 - 5.74701S - 107.844S^2 + 329.5205S^3$$

$$\gamma(V) = 0.912 - 0.0075 \times V + 0.0000409 \times V^2$$

$$\gamma = 0.7671 - 0.12775U - 0.1102U^2$$

По экспериментальным данным были вычислены и построены оценки авто- и взаимно-корреляционных функций. По таблицам типовой идентификации была получена структурная модель системы управления. Результаты расчета численных параметров модели представлены на рис. 1.

$$G(S) = \frac{2.1498 \times 10^5}{(1 + 1.376 \times 10^9 S)(1 + 25.232S)(1 + 25.226S)} \times e^{(-28.647S)}$$

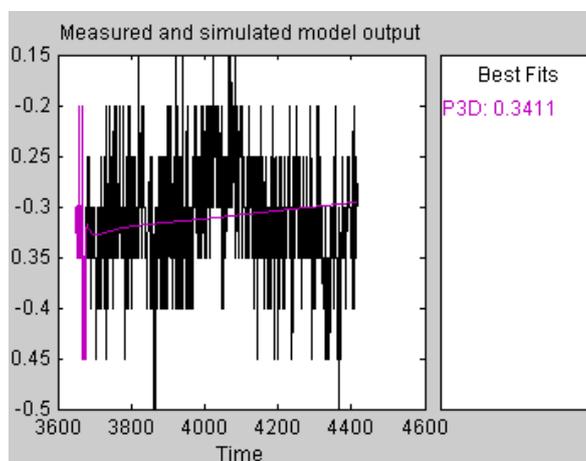


Рис. 1. Результаты тестирования точности модели

Как можно видеть из рис. 1 точность полученной модели составляет более 99%, что говорит о применимости полученных результатов на практике. Испытания разработанной системы управления показали, что заданные параметры шероховатости поверхности возможно обеспечивать с погрешностью 15-20%, что более чем достаточно для технических нужд. Оценка экономической эффективности разработанных решений показала возможность получения определенного экономического эффекта от внедрения разработок в промышленную практику. Основными направлениями дальнейших исследований является исследование возможности применения разработанных научно-технических решений для других видов обработки: выглаживания, фрезерования и шлифования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Симонов А.М., Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга: монография. – Курган.: изд-во курганского гос. ун-та, 2010. – 117 с.
2. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Управление формированием шероховатости поверхности при обработке на токарных станках с ЧПУ. – Lambert academic publishing, Munich, 2011. – 285 с.

Р.Н. Садеков (научный сотрудник)

Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики»  
Научный руководитель – С.Б. Беркович, д.т.н., начальник отдела «Навигационных систем и комплексов», МОУ «Институт инженерной физики»

### ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕО-ВИЗУАЛЬНЫХ И КУРСО-ОДОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАВИГАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Повышение точности определения навигационных параметров возможно путем комплексирования данных, различных типов навигационных систем, при этом, недостатки присущие каждой из систем в отдельности, могут быть частично снижены. Рассмотрим комплексированную систему на основе одометрической и стерео-визуальной навигационной системы, такая система обладает автономностью в силу автономности одометрической системы и более высокой точностью вследствие использования дополнительной стерео-визуальной информации. Рассмотрим математические модели одометрической и стерео-визуальной навигационной системы и оценим точность работы комплексированной системы в целом.

Уравнение навигации системы счисления пути запишем в виде

$$\begin{aligned}
x_{k+1} &= x_k + V_k \cos \alpha_k dt - \Delta \alpha_k V_k \sin \alpha_k dt + \Delta V_k \cos \alpha_k dt \\
y_{k+1} &= y_k + V_k \sin \alpha_k dt + \Delta \alpha_k V_k \cos \alpha_k dt + \Delta V_k \sin \alpha_k dt \\
\Delta V_{k+1} &= \Delta V_k + \Delta V_k^{cn} \quad \Delta \alpha_{k+1} = \Delta \alpha_k + \omega_k dt + \Delta \alpha_k^{cn} \quad \omega_{k+1} = (1 - dt / \tau_\omega) \omega_k + \sigma_\omega dt \sqrt{2 / \tau_\omega} \omega_k^{cn}
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $x_k, y_k$  – координаты объекта в момент времени  $k$ ,  $dt$  – шаг дискретизации,  $V_k, \alpha_k$  – истинные значения скорости и дирекционного угла,  $\Delta V_k^{cn}, \Delta \alpha_k^{cn}, \omega_k^{cn}$  – бел шумные составляющие скорости, дирекционного угла и дрейфа,  $\omega_k$  – угловая скорость дрейфа гироскопа,  $\tau_\omega$  – постоянная дрейфа гироскопа,  $\sigma_\omega$  – средняя квадратическая погрешность дрейфа гироскопа.

В матричной форме уравнение (1) примет вид

$$X_{k+1} = F_k \cdot X_k + U_k + G_k \cdot w_k \tag{2}$$

где  $X_k = [x_k \ y_k \ \Delta V_k \ \Delta \alpha_k \ \omega_k]^T$  – вектор состояния,  $F_k, G_k$  матрица состояния и матрица шумов, соответственно,  $U_k = [V_k \cos \alpha_k dt \ V_k \sin \alpha_k dt \ 0 \ 0 \ 0]^T$  – вектор управления,  $w_k = [\Delta V_k^{cn} \ \Delta \alpha_k^{cn} \ \omega_k^{cn}]^T$  – вектор шумов.

Стереосистема технического зрения в момент времени  $k$  определяет углы  $\alpha', \alpha''$  на каждую из найденных на изображении ключевых точек. Ключевые точки на изображении находят с помощью специальных алгоритмов детектирования [2,4,7,8,9]. По измеренным значениям углов рассчитывается дальность до ключевой точки объекта. Измерения, стерео-визуальной системы в момент времени  $k$  для каждой из ключевых точек  $i$  запишем в виде вектора  $z_k^i = [\alpha_k^{i'} \ \alpha_k^{i''} \ D_k^i]^T$ , а уравнения связи угловых параметров объекта с его местоположением на местности в виде

$$\begin{aligned}
\alpha_k^{i'} &= a \tan\left(\frac{y_k^i - y_k + 0.5b \cos \alpha_k}{x_k^i - x_k - 0.5b \sin \alpha_k}\right) - \alpha_k \quad \alpha_k^{i''} = a \tan\left(\frac{y_k^i - y_k - 0.5b \cos \alpha_k}{x_k^i - x_k + 0.5b \sin \alpha_k}\right) - \alpha_k \\
D_k^i &= \sqrt{(x_k^i - x_k)^2 + (y_k^i - y_k)^2}
\end{aligned} \tag{3}$$

где  $\alpha_k^{i'} \alpha_k^{i''}$  – углы, определенные стерео-визуальной системой, причем измеряемые, вправо от визирной оси примем «положительными», а влево «отрицательными»,  $\alpha_k$  – дирекционный угол продольной оси объекта,  $x_1^i, y_1^i, x_2^i, y_2^i$  – координаты камер,  $b$  – стереобаза.

Требуется оценить параметры навигационной системы  $\hat{X}_k$  по измерениям вида  $z_k = h(X_k) + v_k$ .

Расширим размерность исходного вектора состояния  $X_k$ , добавив в него координаты ключевых точек  $x_k^n, y_k^n$ , тогда

$$X_k = [x_k \ y_k \ \Delta V_k \ \Delta \alpha_k \ \omega_k \ x_k^1 \ y_k^1 \ \dots \ x_k^n \ y_k^n]^T.$$

Оценку параметров навигационной системы проведем с использованием Extended Kalman Filter [5,6], для его реализации необходимо найти  $H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{X}_{k+1/k}}$ .

Оценка точности разработанного алгоритма проводилась путем многократного моделирования маршрута движения объекта, траекторий навигационной системы счисления пути, а также корректируемой траектории с учетом информации системы технического зрения. Результаты моделирования показали, что, несмотря на общую положительную динамику роста погрешности определения координат, темп роста погрешностей комплексированной системы на 20-50% (в зависимости от исходной точности стереосистемы) меньше чем у системы счисления пути.

Совместное использование информации систем счисления пути и стереовизуальных систем позволяет повысить точность определения навигационных параметров. Решение задачи оценивания может быть построено на основе Extended Kalman Filter или particle filter. В ходе решения задачи оценивания вектора состояния, решается также задача картографирования – уточнения координат ключевых точек сцены, такая задача в иностранной литературе получила название Simultaneous Localization and Mapping (SLAM).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2009. 496 с.
2. Шапиро Л.Г. Компьютерное зрение /Л.Шапиро, Дж.Стокман; Пер. с англ. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний. 2006. 752 с.
3. A.E.Jonson, S.B. Goldberg, Yang Cheng, L.H.Matthies “Robust and Efficient Stereo Feature Tracking for Visual Odometry”, Robotics and Automation, 2008. ICRA. IEEE International Conference on 19-23 May. Pages: 39-46.
4. D.Nister, O.Naroditsky, J.Bergen, “Visual odometry”, Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Volyme 1, 27. Page(s): I-652-1-659 Vol. 1.
5. G.Welch, G. Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July 24, 2006. Pages: 16.
6. M. I. Ribeiro. Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties. 2004. Pages: 44.
7. Yavor Georgiev. E90 Project: Stereo visual odometry. May. 2006. Pages: 28.
8. Yang Cheng, M.W.Maimone, L.Matthies “Visual odometry on the Mars exploration rovers – a tool to ensure accurate driving and science imaging”, Robotics & Automation Magazine, IEEE, Volume 13, Issue 2, June 2006. Pages: 54-62.
9. Ye-hu Shen, Ji-lin and Xin Du, “Environment map building and localization for robot navigation based on image sequences”, Journal of Zhejiang University, Volume 9, Apr. 2008. Pages: 89-499.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>В.Э. Гасумяни, Т.А. Итс, Д.Д. Каров.</i> Формирование компетенций в сфере управления инновациями .....	3
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

### **Работы победителей конкурса в номинации**

<b>«Лучший проект студента» .....</b>	<b>10</b>
<i>К.Ю. Афанасьев.</i> Разработка и оптимизация схемы обессоливания стоков водоподготовительной установки ТЭЦ .....	10
<i>А.К. Воробьева.</i> Проектирование пассажирского трубопроводного транспортного комплекса .....	
<i>П.И. Вайнмастер.</i> Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта .....	
<i>Н.Г. Тетеркина.</i> Проект коммерциализации разработки «Осцилляторный сенсор температуры» .....	
<i>О.З. Алюкаева.</i> Создание методики определения плотности и концентрации водных растворов солей оптическим способом (на примере лития бромида).....	
<i>Ш.А. Ахмедова.</i> Формирование оптимального инвестиционного портфеля с помощью самонастраивающихся интеллектуальных информационных технологий эволюционного типа.....	
<i>Е.Э. Шмидт.</i> Способ гидрофобной защиты строительных материалов .....	

### **Аннотации работ лауреатов конкурса в номинации**

<b>«Лучший проект студента» .....</b>	
<i>А.Г. Алексеева.</i> Использование биопрепаратов на основе экскретов дождевых червей ( <i>Aporrectodea caliginosa</i> ) при рекультивации нарушенных земель .....	
<i>В.А. Воронцов.</i> Эффективность работы катализатора в микроканальном реакторе парциального окисления метана .....	
<i>М.П. Дякина.</i> Синтез алюмосиликатного наносорбента ионов тяжелых металлов .....	
<i>А.О. Колинченко.</i> Виброизолирующие устройства с нулевой жесткостью транспортных средств.....	
<i>А.В. Ледовских, В.В. Иванов.</i> Разработка фазового регулятора на основе управляемого выпрямителя.....	
<i>О.А. Михалёва.</i> Проектирование гибридного транспортного средства на основе современных накопителей энергии .....	
<i>Д.В. Немова.</i> Повышение энергоэффективности зданий детских садов .....	
<i>А.Г. Николаева.</i> Шахматы как инновационный инструмент развития креативности мышления студентов.....	
<i>А.А. Сергеев.</i> Виброзащитное кресло водителя троллейбуса с эффектом нулевой жесткости .....	

*А.Е. Тептин.* Частотно-временная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта .....

### **Работы победителей конкурса в номинации**

**«Лучший проект аспиранта»** .....

*А.В. Лысянников.* Повышение эффективности снегоочистки дорожных покрытий за счет использования комплекта навесного оборудования .....

*А.С. Цой.* Инновационные технологии моделирования пожаротушения распылённой водой: разработка, апробация, применение .....

*Л.Б. Матюшкин.* Получение и исследование систем с квантовыми точками на основе узкозонных полупроводников для солнечной и кремниевой энергетики.....

*Е.С. Сенченко.* Алгоритмы контроля 3D объектов теневым методом .....

### **Аннотации работ лауреатов конкурса в номинации**

**«Лучший проект аспиранта»** .....

*Н.А. Бабушкин.* Математическое моделирование работы газовых контактных водонагревателей.....

*А.А. Дроздов.* Совершенствование пакета программ для расчета центробежных компрессоров и компрессорных ступеней, основанных на методе универсального моделирования.....

*Н.С. Клёхта.* Разработка методики тестирования ферритов и наноструктур на основе импульсного воздействия на электронную и ядерную спиновые системы образцов .....

*Д.Д. Колосова.* Применение трековых мембран в доочистке сложных стоков

*О.С. Комарова.* Исследование электронного транспорта в рст-материале состава  $Ge_{0.15}Sb_{0.85}$  .....

*В.В. Куриц.* Имитационное моделирование автомобильного трафика в городских и загородных условиях.....

*Ю.А. Мирошникова.* Методические рекомендации по капитализации системных услуг и оптимизации режимов работ для ГАЭС .....

*Ю.Н. Нагурянская.* Исследование условий синтеза катализаторов на металлических носителях.....

*А.Г. Никифоров.* Разработка приборного комплекса для мониторинга состояния очищенных вод.....

*В.А. Павлов.* Исследование алгоритмов распознавания доказуемости в аксиоматических теориях и разработка системы автоматического логического вывода.....

*О.В. Смирнова.* Оценка влияния износа оборудования на условия труда на строительной площадке.....

*А.В. Чернова.* Методика обоснования параметров энергокомплекса ВЭС-ГЭС с учётом влияния климатических факторов .....

*В.Г. Шрам.* Повышение надежности работы машин и механизмов за счет наиболее эффективного использования смазочных материалов.....

#### **Работы победителей конкурса в номинации**

**«Лучший проект молодого ученого»** .....

*М.В. Коробчук.* Опыт применения нелинейных колебаний для смешивания тонкодисперсных материалов .....

*Д.С. Медведев.* Проект коммерциализации разработки «Электронный водопроводный смеситель».....

*К.В. Солдатова.* Основы формирования семейства модельных ступеней центробежных компрессоров .....

*А.В. Бышевская.* Повышение безопасности функционирования автотранспортного комплекса смоленской области .....

*С.Н. Соловьёва.* Специфика термического действия токов короткого замыкания в кабельных линиях 0,4 кВ собственных нужд подстанций.....

#### **Аннотации работ лауреатов конкурса в номинации**

**«Лучший проект молодого ученого»** .....

*Н.М. Вербова.* Разработка методов структурного синтеза широкополосных фазовращающих цепей для применения в электротехнических комплексах и системах с первичной обработкой сигналов .....

*А.А. Гиргидов, А.Д. Гиргидов.* Использование рассеивающих трамплинов для уменьшения придонных скоростей в водобойном колодце.....

*Е.Г. Гурова.* Пространственное виброзащитное устройство транспортных энергетических установок .....

*А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов.* Акустооптический преобразователь для измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью .....

*С.С. Налимова.* Синтез и исследование наноструктурированных газочувствительных металлооксидов для медицинской неинвазивной экспресс-диагностики .....

*В.Е. Овсянников.* Автоматическое формирование заданной шероховатости поверхности при обработке на станках с ЧПУ .....

*Р.Н. Садеков.* Применение стерео-визуальных и курсо-одометрических систем для навигации подвижных объектов .....