

**НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТРАНСПОРТА СИБИРИ  
И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА**

*Научный журнал*

Учредитель журнала  
Сибирский Государственный  
Университет Водного Транспорта

Журнал выходит  
на русском языке с 2002 года

Периодичность – 4 выпуска в год

*Журнал широкой научной тематики:*

- Эксплуатация и экономика транспорта
- Путь. Путевое хозяйство
- Судовождение
- Теплоэнергетика
- Электроэнергетика
- Экология
- Транспортное образование

Редакционная коллегия:

**Бернацкий Анатолий Филлипович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Строительного производства Новосибирского государственного университета архитектуры, дизайна и искусств

**Гладков Геннадий Леонидович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Водных путей и водных изысканий Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова

**Бунеев Виктор Михайлович** – докт. экон. наук, профессор, заведующий кафедрой Управления работой флота Сибирского государственного университета водного транспорта

**Иванова Елена Васильевна** – докт. техн. наук, профессор кафедры Электроэнергетических систем и электротехники Сибирского государственного университета водного транспорта

**Манусов Вадим Зиновьевич** – докт. техн. наук, профессор кафедры Электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета

**Сальников Василий Герасимович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Электроэнергетических систем и электротехники Сибирского государственного университета водного транспорта

**Сичкарев Виктор Иванович** – докт. техн. наук, профессор кафедры Судовождения Сибирского государственного университета водного транспорта

**NAUCHNYE PROBLEMY  
TRANSPORTA SIBIRI  
I DAL'NEGO VOSTOKA**

*Science Magazine*

The founder of the journal  
Siberian State University  
of Water Transport

The magazine is published  
in Russian in 2002

Frequency – 4 issues per year

*Science magazine with the headings:*

- Transport operation and economics
- Infrastructure of transport routes
- Management and maintenance of means of transport
- Heat power industry
- Electric power industry
- Ecology
- Transport Education

Editorial team:

**Anatolii Bernatskii** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Construction Industry in Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts

**Vitalii Sedykh** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Waterways and Water Surveys of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

**Victor Buneev** – Doctor of Economic Sciences, Professor at the Department of Fleet Management in Siberian State University of Water Transport

**Elena Ivanova** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Electric Power Systems and Electric Engineering in Siberian State University of Water Transport

**Vadim Manusov** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Electric Power Systems in Novosibirsk State Technical University

**Vasilii Sal'nikov** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Electric Power Systems and Electric Engineering in Siberian State University of Water Transport

**Victor Sichkarev** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Navigation in Siberian State University of Water Transport

## ABOUT THE JOURNAL

### Редакция журнала

#### *Главный редактор*

**Палагушкин Борис Владимирович**,  
докт. техн. наук, профессор

#### *Заместители главного редактора:*

**Бик Юрий Игоревич**,  
докт. техн. наук, профессор

**Барановский Александр Михайлович**  
докт. техн. наук, профессор

**Горелов Сергей Валерьевич**,  
докт. техн. наук, профессор

### Межрегиональный редакционный совет:

**Малов Владимир Юрьевич** – докт. экон. наук,  
профессор Института экономики и организации  
промышленного производства СО РАН  
(г. Новосибирск)

**Черемисин Василий Титович** – д-р техн. наук,  
профессор Омского государственного  
университета путей сообщения (г. Омск)

**Худоногов Анатолий Михайлович** – докт. техн.  
наук, профессор Иркутского государственного  
университета путей сообщения (г. Иркутск)

**Кича Геннадий Петрович** – докт. техн. наук,  
профессор Морского государственного  
университета имени адмирала  
Г.И. Невельского» (г. Владивосток)

### The editorial staff

#### *Editor in Chief*

**Boris Palagushkin**  
Holder of an Advanced Doctorate  
in Engineering Sciences, Prof.

#### *Deputy chief editor:*

**Yurii Bik**  
Holder of an Advanced Doctorate  
in Engineering Sciences, Prof.

**Aleksandr Baranovskii**  
Holder of an Advanced Doctorate  
in Engineering Sciences, Prof.

**Sergei Gorelov**  
Holder of an Advanced Doctorate  
in Engineering Sciences, Prof.

### Interregional editorial board:

**Vladimir Malov** – Holder of an Advanced  
Doctorate in Economic Sciences, Prof. of Institute  
of Economics and Industrial Engineering of  
SB RAS (Novosibirsk)

**Vasilii Cheremisin** – Holder of an Advanced  
Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of  
Omsk State Transport University (Omsk)

**Anatolii Hudonogov** – Holder of an Advanced  
Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of  
Irkutsk State Transport University (Irkutsk)

**Gennadii Kicha** – Holder of an Advanced  
Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of  
Maritime State University named  
after admiral G.I.Nevelskoi (Vladivostok)



## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНУТРЕННЕГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ОСВОЕНИИ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водногортранспорта»

М.Г. Сеницын, Т.В. Глоденис, С.Н. Масленников

### PROSPECTS FOR INLAND WATER TRANSPORT DURING THE DEVELOPMENT OF THE CONTINENTAL SHELF OF THE RUSSIAN FEDERATION

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Mikhail G. Sinitsyn (Senior Lecturer of SSUWT)

Tatiana V. Glodenis (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Sergey N. Maslennikov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The article deals with the development of methodological foundations in the study of the possibility of involving newly developed areas in a single transport network of the country. The authors determined the gravity areas of oil and gas condensate fields. The transport infrastructure of each base port is considered.

**Keywords:** Inland water transport, continental shelf, Northern Sea Route, transport fleet, marine, economic and mathematical models, offshore field.

В статье рассмотрены вопросы разработки методических основ при исследовании возможности вовлечения вновь осваиваемых участков в единую транспортную сеть страны. Авторами определены районы тяготения нефтегазоконденсатных месторождений. Рассмотрена транспортная инфраструктура каждого базового порта.

Ориентируясь на современную ситуацию, рассматривая возможные перспективы развития, руководителям транспортных предприятий (и, в частности, воднотранспортных) необходимо уделять серьезное внимание перспективам развития Восточных регионов России, осуществлять активизацию решения проблем, стоящих в стране, благодаря использованию внутреннего потенциала. Важное значение будет иметь транспортное обеспечение при освоении углеводородных ископаемых районов шельфовой зоны арктических морей и Дальнего Востока [1]. В бассейнах Тихого и Северного Ледовитого океанов необходимо строительство современных портовых сооружений и судов ледового класса, создание новых типов транспортных, технологических и перегрузочных средств, новых технологий доставки грузов – использование лихтеровозных систем, судов на воздушной подушке, перевозка крупногабаритных сборных блоков и конструкций к местам их установки, создание водоизмещающих судов, способных работать в условиях мелководья, строительство ледовых причалов и многое другое. В качестве примера на рисунке 1 показана ледостойкая нефтедобывающая платформа.

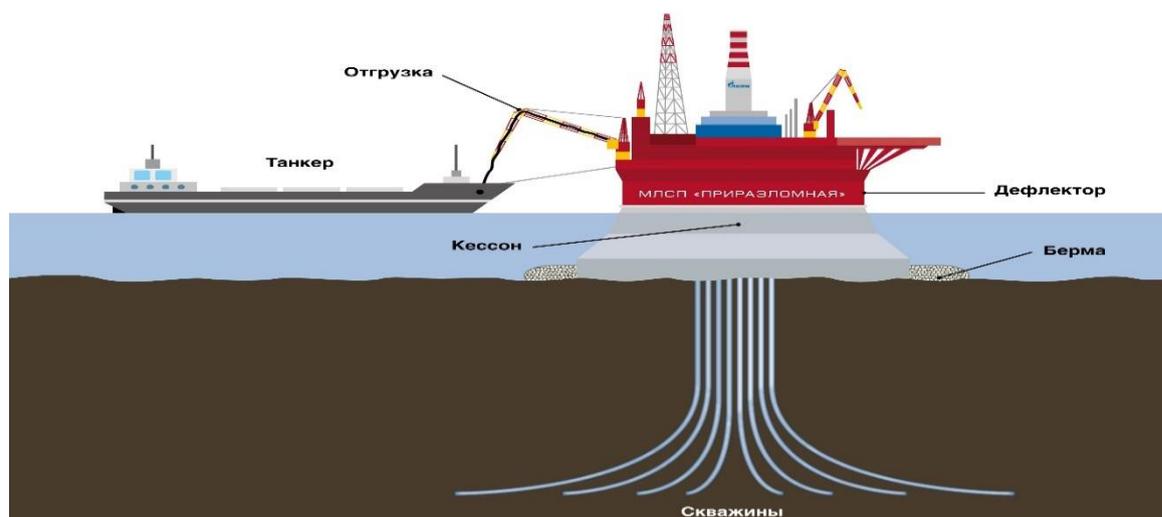


Рисунок 1 – Морская ледостойкая нефтедобывающая платформа

Характер динамики и сложности среды, в которой осуществляется транспортное освоение, оказывает влияние на выбор методов исследования. В этой ситуации дивергентный поиск позволяет обеспечивать необходимую информационную базу. В синергетической

экономике рассматриваются нелинейные взаимодействия между независимыми переменными и взаимодействия под влиянием внешней среды. Нелинейная динамическая структура, а в некоторых случаях и хаотичность могут создать в определенных условиях ситуации, находящиеся за пределами нашего предвидения и условия для мощного развития производственных структур в будущем. Серьезное внимание уделяется вопросам получения достоверной информации о перспективах развития осваиваемых областей, процессу прогнозирования целей; при этом возможно базирование в исследованиях на современном математическом аппарате, вероятно – статистических методах, анализе интервальных данных, теории нечеткости.

Для решения задач транспортного обеспечения вновь осваиваемых районов в возникающих условиях неопределенности важное значение приобретает решение задач прогнозирования функционирования сложных систем в неблагоприятных условиях. Для решения подобных задач, начиная с двадцатого века, широко используется системный анализ с его формальными и неформальными методами. На современном этапе научных исследований необходимо обращать внимание на создание технологий изучения и апробаций на основе нескольких дисциплин, приемов, принятых в синергетике. Особого внимания в изучении деятельности многих систем, в том числе и транспортных, заслуживают условия риска и рассмотрения вариантов дальнейших действий предприятий в нестандартных ситуациях. Масштабы возникающих проблем растут, так как за последние тридцать лет число природных бедствий и техногенных катастроф с большим экономическим ущербом увеличилось по сравнению с предшествующим уровнем вчетверо. Выстраивая стратегию действий, в усложняющихся условиях необходимо уделять внимание определению перспектив развития на основе подходов нелинейной динамики (создание теории, моделей, формализованного аппарата). Современная теория устойчивости определяет при функционировании любой динамической системы такое ее свойство, которое при малом внешнем воздействии отвечает малым же изменением результата, то есть устойчивость это воспроизводимость при наличии шума некоторого свойства систем. Данные вопросы серьезно рассматриваются в работах Ляпунова А.М. и Лагранжа Э. Ориентируясь на проблему транспортного освоения районов шельфовой зоны, необходимо определять - сохранение каких свойств системы наиболее важно при решении проблем сегодня, в будущем; возмущение каких параметров можно считать допустимым. Возможность развития систем в этих идеальных условиях, конечно, существует, однако, на современном этапе развития динамических систем, основные ориентиры должны рассматривать сложные режимы их функционирования в условиях качественных изменений с учетом бифуркационных процессов. Очень важно оценивать возможные риски и потери, находить правильные решения в условиях неопределенности. Предприятия внутреннего водного транспорта подвержены воздействию многих неблагоприятных факторов. Это и неопределенность структуры перевозок, нестабильность грузопотоков, серьезная конкуренция на рынке транспортных услуг, а также условия судоходства, которые обусловлены вероятностным характером гидрологических процессов на внутренних водных путях, закономерности изменения которых сложно прогнозировать. Различного вида природно-климатические факторы воздействия в последние годы серьезно ухудшают условия судоходства. Транспортные предприятия вырабатывают современную систему функционирования и в условиях риска, и в условиях неопределенности. Это использование ситуационного планирования, уровневое прогнозирование, использование неформальных методов системного анализа, методов эвристического прогнозирования, другие варианты.

При решении задач стратегического планирования перевозок во вновь осваиваемых районах необходимо уделять внимание современному синергетическому подходу, использованию методов и алгоритмов нелинейной динамики. Определение бифуркационных значений, точек бифуркации, рассматривающих структурную неустойчивость динамических систем и нахождение их локальной или глобальной устойчивости является очень важным при решении задач построения перспектив развития транспортных систем. При этом необходимо для решения этих проблем серьезное изучение планов развития региональных и федеральных производственных предприятий, синергетический взгляд на решение стоящих перед обществом проблем.

Освоение любой новой территории, внедрение инновационных разработок должны начинаться с научных исследований, проведения анализа по проверке их целесообразности, возможных последствий реализации стратегических планов. Сотрудниками Сибирского государственного университета водного транспорта и, в частности, авторами статьи проводились

исследования, связанные с вовлечением вновь осваиваемых участков рек в единую транспортную сеть страны с целью обеспечения глубинных районов необходимыми грузами. Участие предприятий внутреннего водного транспорта в решении вопросов транспортного обеспечения районов Арктической зоны необходимо исследовать, рассмотреть существующие возможности и разрабатывать стратегию вовлечения их в решение поставленных проблем. Обслуживание месторождений и обустройство новых происходит через крупные морские порты. Разделим шельфовые месторождения по району тяготения на группы, каждая из которых закреплена за крупным морским портом, а тот в свою очередь за воднотранспортным бассейном, результаты приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Разделение шельфовых месторождений по району тяготения*

Район тяготения	Порт	
Обь-Иртышский	Сабетта	Приразломное, Варандей-море, Медынское-море, Северо-Гуляевское, Салекаптское, Юрхаровское, Ленинградское, Русановское, Антипаютинское, Семаковское, Тота-Яхинское, Каменномысское-море, Северо-Каменномысское, Гугорьяхинское, Обское, Восточно-Приновоземельское
Северо-Двинский	Мурманск	Штокмановское, Поморское, Ледовое, Северо-Кильдинское, Мурманское, Лудловское
Владивостокский	Владивосток	Одопту-море, Северный купол, Пильтун-Астохское, Одопту-море, Аркутун-Дагинское, Чайво, Лунское, Кириновское, Венинское
Ленский	Тикси	Усть-Оленекский, Усть-Ленский, Анисинско-Новосибирский, Хатангский
Енисейский	Диксон	Притаймырский
Чукотский	Певек	Северо-Врангелевские-1, Северо-Врангелевские-2, Южно-Чукотский, Восточно-Сибирский-1

Внимания заслуживает изучение вопросов определения зон обслуживания различными видами транспорта районов нового освоения. Возникающие зоны транспортного тяготения морского, речного, автомобильного (перевозки по автозимникам) видов транспорта необходимо внимательно рассматривать [2]. Серьезную оценку транспортного обеспечения можно проводить, базируясь на методах теории информации и, в частности, используя такой параметр как энтропия. Во вновь осваиваемых районах определение зоны транспортного тяготения может быть представлено в различных модификациях [3]. Интерес представляет такой параметр, как интегральная транспортная доступность, который может оценивать конфигурацию транспортной сети с учетом технико-экономических особенностей каждого вида транспорта [4]. Используя этот показатель можно производить планирование территориального развития транспортных сетей вновь осваиваемых областей. Базовыми пунктами концентрации грузовых потоков для освоения углеводородных месторождений на российском континентальном шельфе будут крупные морские порты, такие как Мурманск, Сабетта, Дудинка, Диксон, Хатанга, Тикси, Певек, Петропавловск-Камчатский, Владивосток [5]. Все они входят в систему международного транспортного коридора «Северный морской путь», по которому организовано круглогодичное движение. Возможность доставки грузов по видам транспорта в каждый из этих портов представлена на рисунке 1.

Из рассмотренных портов на рисунке 2 видно, что практически в каждый из них возможно доставка грузов внутренним водным транспортом, а железнодорожный, автомобильный и трубопроводный присутствует только в двух. Доставка грузов авиационным транспортом доступна практически во всех пункты, но не является целесообразной из-за его дороговизны. В структуре грузооборота преобладают массовые грузы, для перевозки которых идеально подходит внутренний водный транспорт, как по экономическим, так и по техническим показателям.

При доставке грузов речным транспортом важное значение имеет обоснование периода эксплуатации участков водных путей. В общую формулу транспортных затрат на доставку грузов необходимо включать слагаемые, учитывающие расходы на задержки судов по условиям плавания. Изменение количества перевозок грузов носит вероятностный характер, для их учета предлагается использовать стохастические модели [6]. В частности, в модель расстановки флота по участкам работы вводится фактор времени, который позволяет обосновывать оптимальный период эксплуатации каждой линии с учетом колебания грузопотоков вследствие задержек по объективным причинам, вызывающим неполное освоение ожидаемых объемов перевозок.

Введенный в стохастическую модель фактор времени учитывает водность года, а также географическое расположение водного пути. При использовании устьевых и баровых участков водных путей необходимо предусматривать проведение дноуглубительных работ.

Исходя из возможных схем завоза грузов морские порты необходима оптимизация вариантов использования флота [7]. При этом необходимо учитывать ряд ограничений, таких как путевые условия, сроки физической навигации, ограничение по флоту [8].

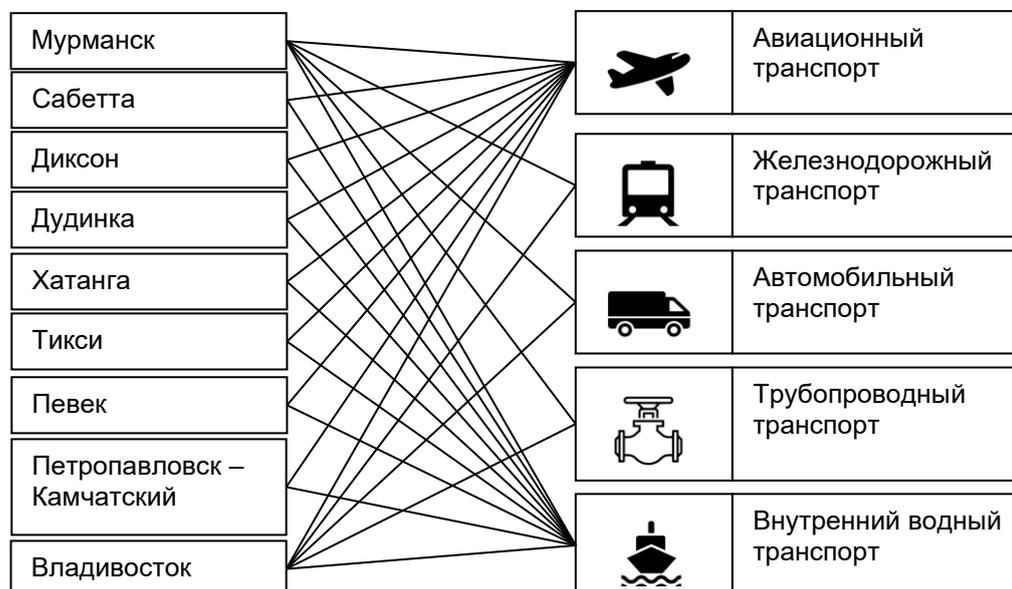


Рисунок 2 – Виды транспорта доставляющие грузы в базовые порты Северного морского пути

Для обеспечения плана перевозок грузов в эти пункты рекомендуется использовать следующую экономико-математическую модель:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta_{ij} [X_{ij} \pm (r' \pm r'') \Delta X_{ij}] \rightarrow \min \quad (1)$$

ограничение по грузообороту:

$$\sum_{i=1}^m \Delta_{ij} [X_{ij} \pm (r' \pm r'') \Delta X_{ij}] = A_j \pm \Delta A_j \quad (2)$$

ограничение по флоту:

$$\sum_{j=1}^n \Pi_{ij} [X_{ij} \pm (r' \pm r'') \Delta X_{ij}] \leq \Phi_i \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0;$$

$$i = 1, m;$$

$$j = 1, n;$$

$$\Delta X_{ij} \geq 0$$

Изменение параметра  $r'$  в зависимости от количества флота:

$$r' = 1 \text{ при } t^\Phi = t_{\text{рсч}}^{\text{пл}} \quad (4)$$

$$r' \leq 1 \text{ при } t^\Phi > t_{\text{рсч}}^{\text{пл}} \quad (5)$$

Изменение параметра  $r''$  в зависимости от условий плавания:

$$r'' = 0 \text{ при } t^\Phi = t_{\text{рсч}}^{\text{пл}} \quad (6)$$

$$0 \leq r'' \leq 1 \text{ при } t^\Phi \neq t_{\text{рсч}}^{\text{пл}} \quad (7)$$

где  $r', r''$  – коэффициенты учитывающие колебания путевых условий, периода завоза, количества флота;

$m$  – количество типов судов и составов, ед;

$n$  – число участков работы;

$j$  – признак участка работы;

$i$  – признак типа флота;

$\Delta_{ij}$  – эксплуатационные расходы  $i$ -го типа флота на  $j$ -ом участке работы;

$X_{ij}$  – количество  $i$ -го типа флота на  $j$ -ом участке работы;

$\Pi_{ij}$  – провозная способность  $i$ -го типа флота на  $j$ -ом участке работы;

$\Phi_i$  – количество единиц  $i$ -го типа флота на  $j$ -ом участке работы;

$t^\Phi$  – фактическое время работы;

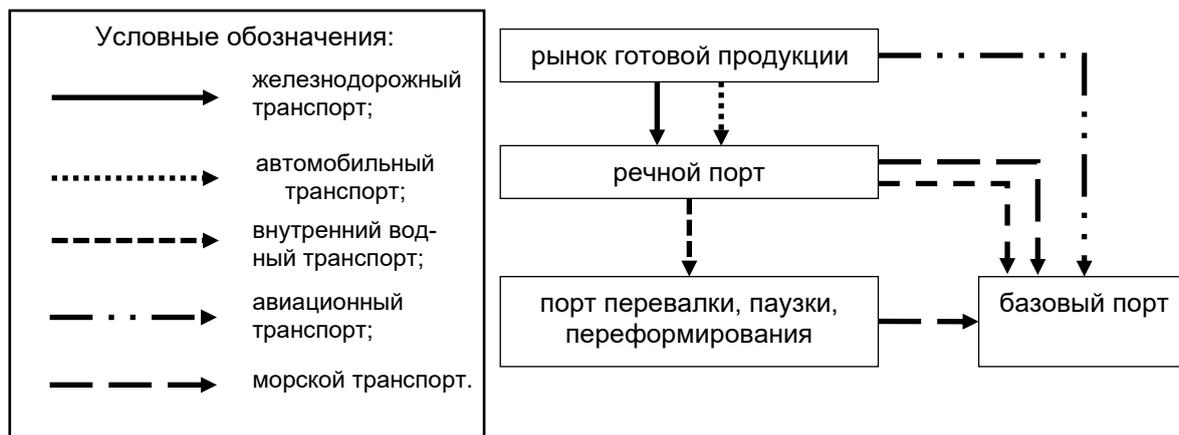
$t_{р\text{сч}}^{\text{пл}}$  – планируемое расчетное время работы;

При завозе грузов флотом внутреннего водного транспорта в пункты относимые к морскому району плавания используют различные разновидности маршрутных и немаршрутных схем. Выбор которых осуществляется в зависимости от различных факторов, но основной из них это общие издержки на доставку груза. Возможные схемы завоза представлены на рисунке 3.



*Рисунок 3 – Схемы завоза грузов в базовые пункты обслуживания месторождений*

Потребность в перевозках во много зависит от конечной стоимости перевозимого груза, поэтому при построение логистической цепочки необходимо учитывать все звенья участвующие в транспортном процессе, так как транспортная составляющая занимает около 50% от стоимости продукции [9]. Логистическая схема обслуживания базовых портов представлена на рисунке 4.



*Рисунок 4 – Логистическая схема обслуживания базовых портов*

На основе изученных и проанализированных материалов видно, что транспортная инфраструктура северных территорий российской Федерации не особо развита и ограничена в обслуживании двумя тремя видами транспорта. основополагающее место при обслуживании данных территорий занимает внутренний водный транспорт.

Завоз грузов в пункты международного транспортного коридора «Северный морской путь» является важнейшей стратегической задачей, для внутреннего водного транспорта [10]. Эксплуатационные условия в границах каждого порта разные и имеет свои особенности по использованию флота и схем работы, условно их можно разделить на две группы маршрутная и не маршрутная. Принципиальная особенность заключается в возможности использования судов речного класса при доставке грузов в данные пункты [11].

Предприятия осуществляющие перевозки по внутренним водным путям имеют множество рисков, которые могут появиться от воздействия различных факторов [12]:

- неопределенность структуры перевозок;
- конкуренция;
- резко изменяющиеся условия судоходства;
- природно-климатические условия.

Учитывая все вышеперечисленные факторы, рекомендуется предприятиям внутреннего водного транспорта использовать методы ситуационного анализа, эвристического прогнозирования и другие варианты [13].

Внутренний водный транспорт имеет важное значение при освоение континентального шельфа Российской Федерации и выполняет вспомогательную роль [14], [15]. Отсутствие инфраструктуры других видов транспорта дает речникам преимущество и в перспективе возможен рост перевозок, в связи открытием и освоением новых месторождений, которые дадут толчок к усовершенствованию уже имеющейся портовой инфраструктуры и строительству новой.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Cariou Pierre, Faury Olivier, 2015, «Relevance of the Northern Sea Route (NSR) for bulk shipping». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 78, August 2015, Pages 337-346., DOI:10.1016/j.tra.2015.05.020
- 2 Dung-Ying Lin, Yu-Ting Chang, 2018, «Ship routing and freight assignment problem for liner shipping: Application to the Northern Sea Route planning problem». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 110, 2018, Pages 47-70., DOI:10.1016/j.tre.2017.12.003
- 3 Cristiano Farias Almeida, Juliana Gomes Gularte, Yaeko Yamashita., 2014. «Guidelines to Devise a Multimodal Freight Transportation Network in Developing Regions Under Economic Growth Approach». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 162, 19 December 2014, Pages 90-100. DOI:10.1016/j.sbspro.2014.12.189
- 4 Анатолий Нырков, Анатолий Шнуренко, Сергей Соколов, Сергей Черный, Виталий Коротков, 2017. «Некоторые методы повышения эффективности системы речного транспорта». *Procedia Engineering*, 2017, том 178, страницы 543-550. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.106
- 5 Архипов А., Григорьев Е., Синицын М. Северный морской путь: ретроспектива, стратегические решения и перспективы развития // 2020. *E3S Web of Conferences* Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI : 10.1051/e3sconf/202016411020
- 6 Aleksandar-Saša Milaković, Bjørn Gunnarsson, Sergey Balmasov, Sungwon Hong, Sören Ehlers, 2018, «Current status and future operational models for transit shipping along the Northern Sea Route». *Marine Policy*, Volume 94, August 2018, Pages 53-60. DOI:10.1016/j.marpol.2018.04.027
- 7 Yiru Zhang, Qiang Meng, Szu Hui Ng, 2016, «Shipping efficiency comparison between Northern Sea Route and the conventional Asia-Europe shipping route via Suez Canal». *Journal of Transport Geography*, Volume 57, December 2016, Pages 241-249., DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.09.008
- 8 Sung-Woo Lee, Ju-Mi Song, 2014, «Economic Possibilities of Shipping though Northern Sea Route». *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Volume 30, Issue 3, December 2014, Pages 415-430., DOI:10.1016/j.ajsl.2014.12.009
- 9 Ualid Kherbash, Marian Liviu Mocan, 2015, «A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization». *Procedia Economics and Finance*, Volume 27, 2015, Pages 42-47., DOI:10.1016/S2212-5671(15)00969-7
- 10 Dimitrios Theocharis, Vasco Sanchez Rodrigues, Stephen Pettit, Jane Haider, 2019, «Feasibility of the Northern Sea Route: The role of distance, fuel prices, ice breaking fees and ship size for the product tanker market». *Transportation Research Part E: Logistics and*

**REFERENCES**

- 1 Cariou Pierre, Faury Olivier, 2015, «Relevance of the Northern Sea Route (NSR) for bulk shipping». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 78, August 2015, Pages 337-346., DOI:10.1016/j.tra.2015.05.020
- 2 Dung-Ying Lin, Yu-Ting Chang, 2018, «Ship routing and freight assignment problem for liner shipping: Application to the Northern Sea Route planning problem». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 110, 2018, Pages 47-70., DOI:10.1016/j.tre.2017.12.003
- 3 Cristiano Farias Almeida, Juliana Gomes Gularte, Yaeko Yamashita., 2014. «Guidelines to Devise a Multimodal Freight Transportation Network in Developing Regions Under Economic Growth Approach». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 162, 19 December 2014, Pages 90-100. DOI:10.1016/j.sbspro.2014.12.189
- 4 Anatoliy Nyrkov, Anatoliy Shnurenko, Sergei Sokolov, Sergei Chernyi, Vitaliy Korotkov, 2017. «Some Methods of Increasing the Efficiency of River Transport System». *Procedia Engineering*, 2017, Volume 178, Pages 543-550. DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.106
- 5 Arkhipov, A., Grigoriev, E., Sinityn, M. The Northern sea route: A retrospective, strategic solutions and prospects of development // 2020. *E3S Web of Conferences* Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI: 10.1051/e3sconf/202016411020
- 6 Aleksandar-Saša Milaković, Bjørn Gunnarsson, Sergey Balmasov, Sungwon Hong, Sören Ehlers, 2018, «Current status and future operational models for transit shipping along the Northern Sea Route». *Marine Policy*, Volume 94, August 2018, Pages 53-60. DOI:10.1016/j.marpol.2018.04.027
- 7 Yiru Zhang, Qiang Meng, Szu Hui Ng, 2016, «Shipping efficiency comparison between Northern Sea Route and the conventional Asia-Europe shipping route via Suez Canal». *Journal of Transport Geography*, Volume 57, December 2016, Pages 241-249., DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.09.008
- 8 Sung-Woo Lee, Ju-Mi Song, 2014, «Economic Possibilities of Shipping though Northern Sea Route». *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Volume 30, Issue 3, December 2014, Pages 415-430., DOI:10.1016/j.ajsl.2014.12.009
- 9 Ualid Kherbash, Marian Liviu Mocan, 2015, «A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization». *Procedia Economics and Finance*, Volume 27, 2015, Pages 42-47., DOI:10.1016/S2212-5671(15)00969-7
- 10 Dimitrios Theocharis, Vasco Sanchez Rodrigues, Stephen Pettit, Jane Haider, 2019, «Feasibility of the Northern Sea Route: The role of distance, fuel prices, ice breaking fees and ship size for the product tanker market». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 129, September 2019, Pages 111-135., DOI:10.1016/j.tre.2019.07.003
- 11 P. Phani Kumar, Manoranjan Parida, Mansha Swami, 2013. «Performance Evaluation of Multimodal Transportation Systems». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 104, 2 December 2013, Pages 795-804., DOI:10.1016/j.sbspro.2013.11.174
- 12 Harris, P., *The Continental Shelf*, January 2020, In book: *Mysterious Ocean* (pp.111-141), DOI:10.1007/978-3-030-15632-9\_8
- 13 Herrmann, H., Bucksch H., (continental) shelf, January 2014, In book: *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*, DOI:10.1007/978-3-642-41714-6\_34537

Transportation Review, Volume 129, September 2019, Pages 111-135., DOI:10.1016/j.tre.2019.07.003

11 P. Phani Kumar, Manoranjan Parida, Mansha Swami, 2013. «Performance Evaluation of Multimodal Transportation Systems». Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 104, 2 December 2013, Pages 795-804., DOI:10.1016/j.sbspro.2013.11.174

12 Harris, P., The Continental Shelf, January 2020, In book: Mysterious Ocean (pp.111-141), DOI:10.1007/978-3-030-15632-9\_8

13 Herrmann, H., Bucksch H., (continental) shelf, January 2014, In book: Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik, DOI:10.1007/978-3-642-41714-6\_34537

14 Федоров В., Журавель В. П., Гриняев С., Медведев Д., Северный морской путь: проблемы и перспективы развития транспортного пути в Арктике, январь 2020 г., Серия конференций ИОП «Земля и экология» 434 :012007, DOI:10.1088/1755-1315/434/1/012007

15 Михеева Н., Китайско-российское сотрудничество в Арктике: геополитика и экономика, август 2019 г., Серия конференций IOP Earth and Environmental Science 302:012057, DOI:10.1088/1755-1315/302/1/012057

14 Fedorov, V., V P Zhuravel V, Grinyaev, S., Medvedev, D., The Northern Sea Route: problems and prospects of development of transport route in the Arctic, January 2020, IOP Conference Series Earth and Environmental Science 434:012007, DOI:10.1088/1755-1315/434/1/012007

15 Miheeva, N., Chinese-Russian cooperation in the Arctic: geopolitics and economics, August 2019, IOP Conference Series Earth and Environmental Science 302:012057, DOI:10.1088/1755-1315/302/1/012057

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Внутренний водный транспорт, континентальный шельф, Северный морской путь, транспортный флот, морской транспорт, экономико-математические модели, шельфовое месторождение.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:** *Синицын Михаил Геннадьевич, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Татьяна Владимировна Глоденис, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Масленников Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** *630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водногортранспорта»

Сибирский университет потребительской кооперации

**О.Н. Иванова, А.А. Каравка, А.П. Калинина**

### INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF VEHICLES

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Siberian University of Consumer Cooperation (SibUPK) 26, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630087, Russia

**Olga N. Ivanova** (Ph.D. in Economics, Assoc. Prof. of SSUWT)

**Alexander A. Karavka** (Senior Lecturer of SSUWT)

**Anna P. Kalinina** (D. in Physical and Mathematical Sciences, Prof. of SibUPK)

**ABSTRACT:** A simplified mathematical model is proposed for predicting emergency situations for road transport within the city when driving with a large number of intersections. The ability to predict emergency situations is a necessary component of the system for organizing the efficient operation of vehicles.

**Keywords:** *expert systems, mathematical model, prediction of emergency situations, efficient operation of vehicles, exponential dependences, degree of human fatigue, influence of traffic intensity*

Предложена упрощенная математическая модель прогноза аварийных ситуаций для автомобильного транспорта в черте города при движении с большим количеством перекрестков. Возможность прогноза аварийных ситуаций является необходимым компонентом системы организации эффективной работы транспортных средств.

При разработке и эксплуатации различных систем полученное решение является компромиссом между требованиями надежности, безопасности, отказоустойчивости и эффективностью использования [1,2]. Но в транспортных системах, связанных с интенсивным потоком транспортных средств, наличие сбоя приводит к резкому снижению эффективности. Поэтому задача прогнозирования аварийной ситуации является неотъемлемой частью системы регулирования транспортных потоков.

В настоящее время средства имитационного моделирования, в частности, агентного моделирования, а также методы системной динамики широко используются для моделирования работы мультитранспортных систем, включающих участки с использованием систем водного

и воздушного транспорта. Неоспоримым преимуществом имитационного моделирования является возможность учета влияния различных факторов на основе оценки их вероятности. Однако это же является слабым местом данных исследований – возникает проблема определения данных вероятностей.

Уровень остроты данной проблемы зависит от стабильности и прогнозируемости условий эксплуатации транспортных систем, а они для систем морского воздушного и водного транспорта, несмотря на значительные успехи в данной области, по сравнению с системами автомобильного и железнодорожного транспорта, являются достаточно неопределенными [3-6].

Подходы и методы оптимизации эффективности различных транспортных систем различны, но есть факторы, общие для всех случаев. Это использование экспертных систем [7], которые никак не учитывают глобальную ситуацию, а используют локальные граничные условия (например, рекомендации объезда пробок), и систем поддержки принятия решений, базирующихся на жестком наборе инструкций. По сути дела, экспертная система моделирует поведение человека. Последнее обстоятельство является обоснованием возможности проведения имитационного агентного моделирования, потому что в качестве алгоритма поведения отдельного субъекта можно использовать систему принятия решений. Другим общим моментом является необходимость моделирования влияния человеческой усталости на возможность сбоя системы [8-12].

Для моделирования человеческого фактора в настоящее время используется коллегиальное мнение экспертов. Воздействие фактора человеческой утомляемости наиболее проработано для воздушного транспорта, так как авиакатастрофы имеют наиболее масштабный характер [8-13]. Вводятся диапазоны вероятностей различных событий. Другой тенденцией моделирования вероятности сбоев, вызванных человеческим фактором, являются экспоненциальные временные зависимости. В показателе экспоненты стоит время, прошедшее с начала тестируемой деятельности человека.

Данная работа посвящена разработке физико-математической модели учета влияния человеческого фактора на возникновение аварийных ситуаций в автомобильных транспортных системах. Изучить воздействие человеческого фактора в этих системах наиболее просто, поскольку нет пространственно-локальных событий, влияние которых различно на отдельные объекты системы. Природа оказывает влияние на автомобильный транспорт, но это влияние будет практически одинаковым на все объекты системы, что может выражаться, например, в снижении средней скорости движения транспорта на дороге. В качестве моделируемой системы рассмотрено движение автомобильного транспорта по прямой трассе, пересекаемой системой перекрестков.

Предполагается, что постоянная концентрация внимания, связанная с процессами ускорения и замедления автомобиля, приводит к росту усталости и повышению вероятности возникновения аварийной ситуации. Показано, что глобальные экспоненциальные зависимости усталости человека могут быть успешно применены к прогнозу вероятности аварийных ситуаций для автомобильного транспорта.

Предложена упрощенная математическая модель прогноза аварийных ситуаций для автомобильного транспорта в черте города при движении с большим количеством перекрестков. Для транспортных автомобильных систем критическим является человеческий фактор, а именно человеческая усталость. Предполагается, что вероятность аварии прямо пропорционально степени усталости человека, которая, в свою очередь, накапливается в результате необходимости повышенного внимания на участках разгона и торможения автомобиля.

Также предполагается, что во время равномерного движения водитель может отдохнуть и восстановить силы. Исследование выполнено в предположении, что скорость восстановления сил на участках отдыха такая же, как на участках накопления усталости. Степень усталости человека моделируется экспоненциальной зависимостью от времени, прошедшего с начала процесса. Для вычисления коэффициентов пропорциональности используются данные об общей временной продолжительности, когда человек может эффективно выполнять свою работу. Таким образом, вероятность возникновения аварии для одиночного автомобиля имеет вид

$$P = A \cdot \exp(a_d t - a_u t) \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности, равный  $A = 0.001$  (предполагается, что к концу критического периода, связанного с накоплением усталости, один из 1000 водителей в состоянии попасть в аварию);

$a_d, a_u$  – коэффициенты накопления и снятия усталости соответственно.

Коэффициенты равны  $a_d = a_u = 0.00003$ , что соответствуют возможности человека выполнять эффективную напряженную работу примерно в течение 3 часов.

Действие природных факторов оказывается одинаковым для всех автомобилей транспортной системы, что может быть учтено как средняя скорость движения транспорта  $v$  (например, во время дождя, тумана или гололеда она низкая, а при хороших погодных условиях высокая).

Предполагается, что перекрестки расположены так, чтобы автомобиль, движущийся с оптимальной скоростью  $V_{opt}$ , миновал перекрестки без всякой временной задержки. Рассмотрен диапазон средней скорости транспортного потока от 12 до 90 км/ч, что может трактоваться как движение в пробках и движение в вечернее время, когда трасса относительно свободна. Моделирование выполняется в предположении постоянства величины транспортного потока.

Рассмотрены значения  $Q = 1/6 \text{ с}^{-1}$  и  $Q = 1/3 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует появлению одного автомобиля в 6 и 3 секунды соответственно. Рассмотрен диапазон расстояний между перекрестками от 1000 м до 3000 м, что соответствует характерным расстоянием между перекрестками в городе Новосибирске. Полное расстояние, проходимое автомобилями, примерно соответствует среднему диаметру города Новосибирска и равно  $L = 30 \text{ км}$ . Автомобили, находящиеся на трассе, полагаются распределенными по ней равномерно, а их количество определяются из условия

$$N = Q \cdot \frac{L}{v} \quad (2)$$

В процессе движения время нахождения на трассе различных автомобилей также разное. Автомобиль, находящийся в конце трассы, находился на ней полное время  $t = L/v$ , а произвольный автомобиль

$$t = \frac{i}{N}, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Осталось вычислить среднее время, которое водитель находился в состоянии либо разгона, либо торможения транспортного средства, а также время равномерного движения. Вычисляем время равномерного движения, а второе время находим как разность времени пребывания между перекрестками и временем равномерного движения. Время равномерного движения пропорционально доли трассы между перекрестками, незанятого автомобилям, а также оно исключает расстояние на разгон и торможение ближайших к перекрестку автомобилей, равному суммарно 40 м (удвоенная ширина перекрестка).

$$D = \frac{(L - \Delta L \cdot N_a - 2 \cdot \Delta s)}{L} \quad (4)$$

где  $D$  – доля трассы, на которой автомобиль может двигаться равномерно;

$N_a$  – количество автомобилей между перекрестками;

$\Delta L = 4 \text{ м}$  – расстояние между автомобилями;

$\Delta s$  – средняя протяженность одного перекрестка.

Кроме того, если скорость не соответствует оптимальной скорости движения между светофором, возникнут дополнительные участки торможения и ускорения, которые учитываются как дополнительный множитель, полученный по эмпирической формуле. Таким образом, доля времени равномерного движения для произвольного автомобиля равна:

$$D_u = D \cdot \left( 1 - \frac{0,5 \cdot |v - v_{opt}|}{v_{opt}} \right), \quad (5)$$

где  $D_u$  – доля времени, которую автомобиль движется равномерно;

$v$  – средняя скорость движения автомобиля;

$v_{opt}$  – средняя оптимальная скорость.

Поскольку для дестабилизации трассы достаточно, чтобы авария произошла хотя бы с одним водителем, то вероятность возникновения аварии оценивается как сумма вероятностей для одиночных автомобилей.

Исследовано влияние интенсивности потока автомобильного транспорта и среднего

расстояния между перекрестками на вероятность возникновения аварии. Как известно, загруженность трассы чаще всего является причиной аварий, поэтому сначала было рассмотрено воздействие интенсивности транспортного потока  $Q$  при разной средней скорости движения транспорта. На рисунке 1 изображена зависимость вероятности возникновения аварии от скорости среднего движения по трассе для двух значений транспортного потока  $Q$ : кривые 1 —  $1/6 \text{ с}^{-1}$ , 2 —  $1/3 \text{ с}^{-1}$  соответственно.

Однако на соотношение участков равномерного и ускоренного движения большое влияние оказывает такая величина, как среднее расстояние между перекрестками. На рисунке 2 представлена зависимость вероятности возникновения аварии от скорости среднего движения по трассе для трех различных расстояний между перекрестками: кривые 1–1000 м, 2 – 2000 м и 3 – 3000 м соответственно. Величина транспортного потока составляла  $\text{с}^{-1}$  для всех трех случаев.

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 1 и 2, мы наблюдаем резкий рост вероятности аварии с уменьшением средней скорости движения транспорта. Это согласуется с наблюдаемой действительностью. Заметим, что величина скорости транспортного потока всегда одна и та же. Это означает, что количество машин на трассе возрастает обратно пропорционально средней скорости движения транспорта.

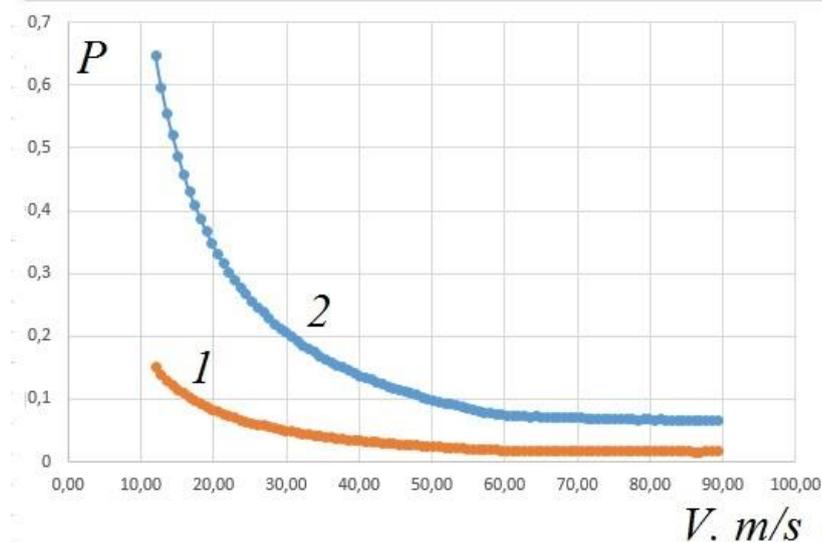


Рисунок 1 – Влияние средней скорости транспортного потока по одной полосе на вероятность аварии для различных интенсивностей транспортного потока: 1 –  $1/6 \text{ с}^{-1}$ , 2 –  $1/3 \text{ с}^{-1}$

Например, при средней скорости 12 км/час (типичная пробка), количество машин между перекрестками в 5 раз больше, чем при скорости движения 60 км/час. С ростом количества машин на трассе резко уменьшается доля трассы, на которой автомобиль может двигаться равномерно (формула 4), а также возрастает общее время пребывания автомобиля на трассе, что также ведет к росту вероятности аварии. Характер зависимости вероятности аварии на всех зависимостях рисунке 1 и рисунке 2 одинаков, но количественные характеристики графиков, конечно, отличаются.

Наблюдая зависимости 1, 2, 3, представленные на рисунке 2, мы видим, что с уменьшением расстояния между перекрестками вероятность аварии возрастает значительно. Это связано с тем, что увеличивается доля участков ускоренного движения за счет конечной протяженности перекрестков. Заметим, что мы не учитывали время стоянки транспорта на перекрестках, что также увеличивает время пребывания на трассе и должно быть добавлено к времени неравномерного движения.

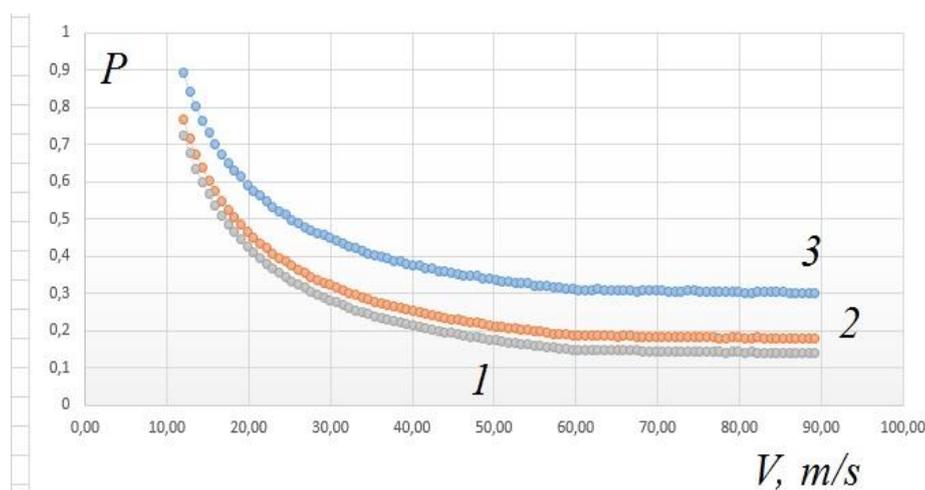


Рисунок 2 – Влияние средней скорости транспортного потока по одной полосе на вероятность аварии для различных расстояний между перекрестками при постоянной интенсивности транспортного потока : 1 — 3 км, 2 — 2 км, 3 – 1 км.

С точки зрения возможности реализации ситуации, значение вероятности 0.3 уже является критическим. С этой точки зрения мы видим, что при низкой скорости движения транспорта хотя бы одна авария в черте города неизбежна, а особенно опасными местами являются длительные участки с близко расположенными перекрестками. Вместе с тем мы видим, что при средней скорости движения на трассе с 40 км/час и выше вероятность ниже порогового значения 0.3, и аварии маловероятны.

Таким образом, использование модели прямой пропорциональности вероятности возникновения аварии фактору человеческой усталости позволило качественно описать вероятность возникновения аварий в черте города. Показан рост вероятности аварии со снижением средней скорости движения по трассе и показана опасность близко расположенных перекрестков.

Это дает основание надеяться, что использование данной зависимости в более точных моделях при агентном имитационном моделировании реальной картины движения позволит получить более точные результаты. Использование подобной модели прогноза аварий может быть использовано органами дорожной инспекции для формирования графика дежурств дорожно-патрульных бригад с целью их усиления в наиболее неблагоприятные дни с целью более быстрой ликвидации последствий аварий и восстановления транспортного потока.

Однако следует заметить, что используемая модель была максимально простой, и, хотя и позволила получить качественно правильные результаты, количественные характеристики прогноза могут быть улучшены за счет более точной модели процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Pérez-Lespier, Lizzette, "Examining the efficiency of multimodal transportation systems: a systems dynamics approach" (2013). Masters Theses. 5449. [https://scholarsmine.mst.edu/masters\\_theses/5449](https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5449)

2 Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location{allocation in intermodal logistic networks. European Journal of Operational Research, 210(2), 213{230.

3 Jaržemskiene, I. (2007). The evolution of intermodal transport research and its development issues. Transport, 22(4), 296- 306.

4 Manuj, I., & Mentzer, J. T. (2008). Global supply chain risk management. Journal of Business Logistics, 29(1), 133{155.

Meadows, D., & Wright, D. (2008). Thinking in systems. Chelsea Green Publishing.

5 А. А. Бахарев, А. В. Косоротов, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж. Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования // Транспорт Российской Федерации, № 4 (59) 2015

REFERENCES

1 Pérez-Lespier, Lizzette, "Examining the efficiency of multimodal transportation systems: a systems dynamics approach" (2013). Masters Theses. 5449. [https://scholarsmine.mst.edu/masters\\_theses/5449](https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5449)

2 Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location{allocation in intermodal logistic networks. European Journal of Operational Research, 210(2), 213{230.

3 Jaržemskiene, I. (2007). The evolution of inter-modal transport research and its development issues. Transport, 22(4), 296- 306.

4 Manuj, I., & Mentzer, J. T. (2008). Global supply chain risk management. Journal of Business Logistics, 29(1), 133{155.

Meadows, D., & Wright, D. (2008). Thinking in systems. Chelsea Green Publishing.

5 A. A. Bakharev, A.V. Kosorotov, A. B. Krestantsev, O. V. Borovik, A. G. Topazh. Improving the efficiency of water transport systems using dynamic simulation modeling // Transport of the Russian Federation, No. 4 (59) 2015

6 Tarovik O. V., Kozmin M. S. Simulation modeling of marine transport systems operating in ice conditions in compliance with the delivery schedule // Shipbuilding. 2014. No. 1. pp. 9-14.

7 Joseph Giarratano, Gary Riley Expert Systems: Principles of development and programming. / Translated from English - M. : Publishing house "Vilyams", 2006— - 1152 p.

8 Aviation medicine: manual / edited by N.M. Rudny, P.V. Vasiliev, S.A. Gozulova. M.: Medicine, 1986. 580 p.

6 Таровик О. В., Косьмин М. С. Имитационное моделирование морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях с соблюдением графика поставок // Судостроение. 2014. № 1. С. 9–14.

7 Джозеф Джарратано, Гари Райли Экспертные системы: принципы разработки и программирование. / Пер. с англ. — М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. — 1152 с.

8 Авиационная медицина: руководство / под ред. Н.М. Рудного, П.В. Васильева, С.А. Гозулова. М.: Медицина, 1986. 580 с.

9 Гузий А.Г., Лушкин А.М., Майорова Ю.А. Риск, обусловленный утомлением членов экипажа // Труды общества независимых расследователей авиационных происшествий. Выпуск 27. М., 2015. С. 114–125.

10 Fatigue Risk Management Systems. Implementation Guide for Operators. 1-st Edition. ICAO-IATA-IFALPA. 2011. 130 p.

11 Хрестоматия человеческого фактора в авиации через призму безопасности полетов. В 2 т. / под общ. ред. С.Д. Байнетова; сост. В.А. Пономаренко, Р.Н. Макаров. М., 2010. Т. 2. 551 с.

12 Бердышникова И.Н. Оценка влияния утомляемости экипажа на безопасность полетов при летной эксплуатации ВС // Тезисы докладов студенческой НТК, посвященной 90-летию гражданской авиации. 17 апреля 2013 г. М.: МГТУ ГА, 2013. С. 12–13.

9 Guziy A.G., Lushkin A.M., Mayorova Yu.A. Risk caused by fatigue of crew members // Proceedings of the Society of Independent Investigators of Aviation Accidents. Issue 27. M., 2015. pp. 114-125.

10 Fatigue Risk Management Systems. Implementation Guide for Operators. 1-st Edition. ICAO-IATA-IFALPA. 2011. 130 p.

11 Textbook of the human factor in aviation through the prism of flight safety. In 2 vols. / under the general editorship of S.D. Baynetov; comp. V.A. Ponomarenko, R.N. Makarov. M., 2010. Vol. 2. 551 p.

12 Baryshnikova I.N. Assessment of the impact of crew fatigue on flight safety during aircraft flight operation // Abstracts of reports of the student STC dedicated to the 90th anniversary of civil aviation. April 17, 2013 Moscow: MGTU GA, 2013. pp. 12-13.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*экспертные системы, математическая модель, прогноз аварийных ситуаций, эффективность работы транспортных средств, экспоненциальные зависимости, степень усталости человека, влияние интенсивности потока автомобильного транспорта*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Иванова Ольга Николаевна, канд. экон. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Каравак Александр Александрович, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Калинина Анна Павловна, д-р физ.-мат. наук, профессор СибУПК*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630087, г.Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 26, СибУПК*

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНЕ ПЛАВАНИЯ СУДНА НА ВРЕМЯ РЕГИСТРАЦИИ КАЧКИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водготранспорта»

В.И. Сичкарев, В.П. Умрихин

## HYDROMETEOROLOGICAL ANALYSIS OF THE WAVE SITUATION IN THE AREA OF NAVIGATION OF THE VESSEL AT THE TIME OF REGISTRATION OF ROLL

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Victor I. Sichkarev (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Victor I. Umrikhin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The article considers the harmonic analysis of the pitching spectrum of a ship under real hydrometeorological conditions.

**Keywords:** pitching recording, recording processing, repeatability of pitching periods, own pitching period, harmonic analysis of the pitching spectrum.

В статье рассмотрен гармонический анализ спектра качки корабля в реальных гидрометеорологических условиях.

Гармонический анализ записи бортовой качки судна, находящегося в эксплуатационном рейсе, показал достаточно большое количество локальных экстремумов (рисунок 1). Часть из них совпадает по частотам с частотой собственной бортовой качки судна и с частотами параметрического резонанса (таблицы 1 и 2). В таблице 1 эти частоты выделены жирным курсивом.

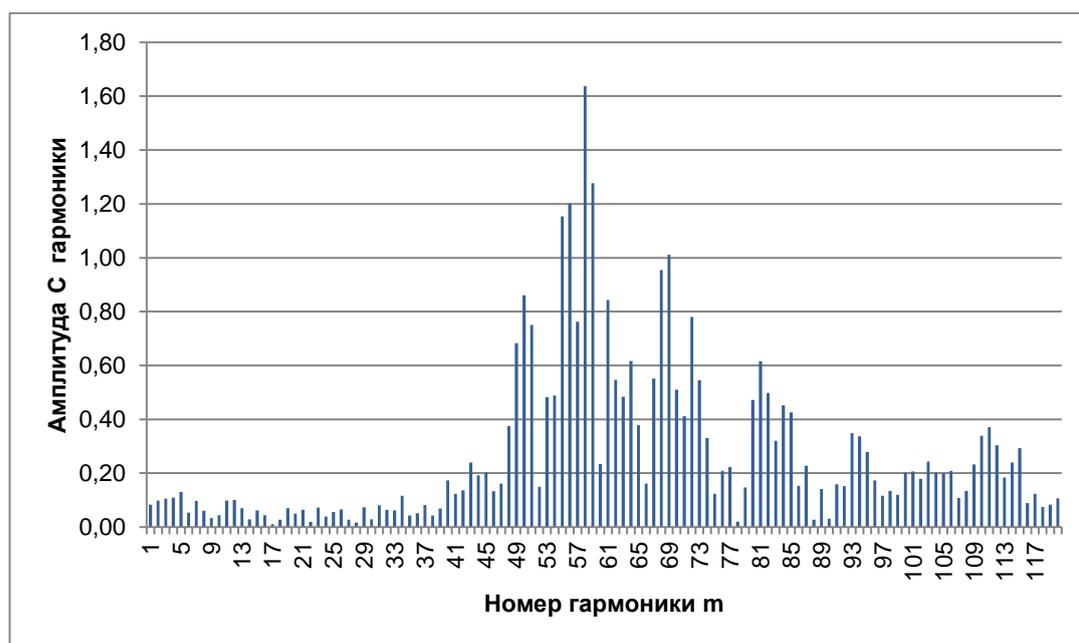


Рисунок 1 – Гармонический анализ 10-минутной записи бортовой качки судна 14.03.19

Упрощённая схематизация гидрометеорологической обстановки, выводимая на мониторы РЛС и ЭКНИС, показывала параметры волнения, частоты которых также присутствовали среди локальных максимумов гармонического анализа.

Однако, помимо локальных экстремумов с выявленными причинами, остаётся ещё несколько, для которых актуален поиск причин, объясняющих их появление. Для решения этой задачи необходимо провести достаточно полный анализ гидрометеорологической обстановки, способной создать волнение, доходящее в виде зыби до района плавания судна ко времени записи качки 14.03.19 в 19 UTC.

Ветровое волнение в районе плавания формируется в это время центральной частью антициклона Н 1037 гПа. Зыбь формируется циклонами северной Атлантики, отстоящими от района плавания от 1,5 до 3 тысяч миль. На преодоление этого расстояния с учётом скорости распространения достаточно длинных волн требуется более двух суток, поэтому анализ

условий генерации волнения необходимо начинать с 12 часов UTC 12.03.19.

*Таблица 1 – Локальные и основной экстремумы гармонического анализа бортовой качки судна 14.03.19*

Номер $m$ гармоники	Амплитуда $C$ гармоники	Частота $\omega$	Период $T$
5	0.131	0.026	240.000
7	0.097	0.037	171.400
12	0.101	0.063	100.000
<b>19</b>	<b>0.070</b>	<b>0.099</b>	<b>63.160</b>
<b>23</b>	<b>0.073</b>	<b>0.120</b>	<b>52.170</b>
<b>29</b>	<b>0.074</b>	<b>0.152</b>	<b>41.380</b>
34	0.116	0.178	35.290
<b>40</b>	<b>0.174</b>	<b>0.209</b>	<b>30.000</b>
43	0.240	0.225	27.910
50	0.860	0.262	24.000
<b>58 max</b>	<b>1.637</b>	<b>0.304</b>	<b>20.690</b>
69	1.011	0.361	17.390
72	0.780	0.377	16.670
77	0.223	0.403	15.580
81	0.615	0.424	14.470
93	0.348	0.487	12.900
103	0.244	0.539	11.650
111	0.293	0.581	10.810
<b>115</b>	<b>0.293</b>	<b>0.602</b>	<b>10.430</b>

*Таблица 2 – Частоты основного и параметрического резонанса бортовой качки*

Частота $\omega$ основного и параметрического резонанса	Ближайшие частоты экстремумов гармонического анализа	Номер гармоники $m$
0.101	0.099	19
0.121	0.120	23
0.152	0.152	29
0.202	0.209	40
0.304 основной резонанс	0.304	58
0.607	0.602	115

Однако, помимо локальных экстремумов с выявленными причинами, остаётся ещё несколько, для которых актуален поиск причин, объясняющих их появление. Для решения этой задачи необходимо провести достаточно полный анализ гидрометеорологической обстановки, способной создать волнение, доходящее в виде зыби до района плавания судна ко времени записи качки 14.03.19 в 19 UTC.

Ветровое волнение в районе плавания формируется в это время центральной частью антициклона Н 1037 гПа. Зыбь формируется циклонами северной Атлантики, отстоящими от района плавания от 1,5 до 3 тысяч миль. На преодоление этого расстояния с учётом скорости распространения достаточно длинных волн требуется более двух суток, поэтому анализ условий генерации волнения необходимо начинать с 12 часов UTC 12.03.19.

Располагая картами приземного анализа на сроки 00 и 12 UTC, оценку возможных параметров зыби проведём следующим образом.

По барическому полю определяем область, в которой направление ветра, генерирующего

волнение, будет распространяться приблизительно к району плавания судна. Коническая проекция карт приземного анализа не обладает свойствами равноугольности и равновеликости, поэтому прямая на них не является кратчайшим расстоянием между двумя точками, а направление этой прямой может отличаться от геодезической линии на несколько градусов. Однако, угловое распределение волновой энергии, например, описываемое угловым спектром Артура [1]:

$$S(\Theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\Theta) \quad (1)$$

компенсирует некоторые неточности «прицеливания» из района плавания судна в точку генерации волнения. На этом основании удаётся выбрать в барическом поле циклона ту область, из которой волнение, уже в виде зыби, докатится до района плавания судна.

За время движения спектр волнения меняется в силу рассеяния энергии волн; при этом высоты волн уменьшаются и в зыби остаются волны с большим периодом. Количественные изменения параметров волн можно оценить по номограмме Свердрупа-Манка, приведённой, например, в [1]. Входными параметрами в номограмму служат средний период ветровых волн  $\bar{\tau}$  [с] и расстояние от области шторма  $x$  [км]. Выходные параметры – отношение средних высот волн зыби  $\bar{h}_3$  к средним высотам  $\bar{h}$  исходного ветрового волнения  $\bar{h}_3/\bar{h}$ , а также аналогичное отношение средних периодов  $\bar{\tau}_3/\bar{\tau}$ . Параметры волнения могут также определяться по данным РЛС [2].

Возможно также использование спектра Пирсона–Мошковица [3] или его модификация – спектр JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) [4]. При этом надо учитывать, что наложение зыби на ветровую составляющую изменяет спектр волны [5]. На практике для расчета спектра истинного волнения достаточно часто задают для волнового спектра заранее выбранную функцию [6,7,8].

Для определения средних параметров  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$  ветровых волн можно воспользоваться известными аналитическими или графическими приёмами определения скорости ветра  $U$  по ветрообразующим параметрам барического поля  $\Delta p$ ,  $R$ ,  $\varphi$  в зоне генерации волн, [9], а затем по  $U$  и разгону волны  $x$  найти параметры ветрового волнения  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$ , например, по номограмме Крылова Ю.М. [1, 10], после чего определить трансформацию ветрового волнения в волны зыби на значительном удалении от зоны генерации ветровых волн, например, по номограмме Свердрупа-Манка [1].

Реализация описанной схемы представлена в таблице 3.

*Таблица 3 – Определение параметров зыби от удалённых циклонов в местоположении судна на 19UTC 14.03.19*

Параметр	Дата	12.03.19	13.03.19	13.03.19	13.03.19	14.03.19	14.03.19	
	Время UTC	12	00	00	12	00	00	
	СО	L 955	L 978	L 985	L 980	L 982	L 978	L 981
Номограмма	$\Delta p^\circ$	1.1	1.1	1.0	1.4	1.6	1.5	1.05
В.И.Сичкарёва [9]	$\varphi^\circ$	63	65	58	58	67	56.5	68
	$R^\circ$	5.4	$\infty$	4	$\infty$	10	8	9
	$U$ , м/с	16.0	18.0	17.5	13.5	4.0	5.5	16.5
	Курсовой угол волны КУ	111,6	97.5	141.2	145.0	95.4	144.0	92.1
Разгон волны $x^\circ$ ; м		5°;	8°;	5°;	10°;	7°;	6°;	10°;
		555600	888960	555600	1111200	777840	666720	1111600
Номограмма Ю.М.Крылова [10]	$gx/U^2$	21280	26905	17790	59788	476719	216127	24014
	$g\bar{h}/U^2$	0.115	0.120	0.115	0.120	0.120	0.120	0.120
	$g\bar{\tau}/U$	5.0	5.2	5.0	5.2	5.2	5.2	5.2
	$\bar{h}$ , м	3,0	4.0	3.6	2.2	0.2	0.4	3.3
	$\bar{\tau}$ , с	8,16	9.55	8.92	7.16	2.12	2.92	8.75
Расстояние до судна $x^\circ$ ; км		26,815°;	26.910°;	28.403°;	27.474°;	29.292°;	27.697°;	31.129°;
		2979,68	2990.24	3156.14	3052.91	3254.93	3077.69	3459.05
Номограмма Свердрупа – Манка [1]	$\bar{h}_3/\bar{h}$	0.22	0.27	0.23	0.18	0	0	0.20
	$\bar{\tau}_3/\bar{\tau}$	1.70	1.74	1.80	2.07	$\infty$	$\infty$	1.95
	$\bar{h}_3$	0.66	1.08	0.83	0.40	-	-	0.70
	$\bar{\tau}$	13.9	16.6	16.1	14.8	-	-	17.1

В глубоком море направление энергетического максимума волнения в зоне генерации совпадает с генеральным направлением ветра и далее это волнение следует по неизменному направлению, доходя в итоге до местоположения судна по кратчайшему пути. Полагая допустимым в данной задаче заменить геодезическую линию волнового пути дугой большого круга, расстояние  $S$  волнового пути от места генерации волнения ( $\phi_H, \lambda_H$ ) до местоположения судна ( $\phi_K, \lambda_K$ ) найдём по формуле:

$$\cos(S) = \sin(\phi_H) \sin(\phi_K) + \cos(\phi_H) \cos(\phi_K) \cos(\Delta\lambda), \quad (2)$$

а направление  $A$  подхода волн в конечную точку

$$\operatorname{ctg}(A) = \frac{\operatorname{tg}(\phi_H) \cdot \cos(\phi_K) - \cos(\phi_K) \cdot \cos(\Delta\lambda)}{\sin(\Delta\lambda)}, \quad (3)$$

после чего курсовой угол волнения можно определить

$$KY = A - IK. \quad (4)$$

Для оценки возможности волнению из штормовых зон удалённых циклонов участвовать в формировании волновой картины района плавания судна, необходимо оценить время движения волн из зоны генерации до местоположения судна. Фазовая скорость гармонической волны с периодом  $\tau$  определяется по зависимости (5):

$$c = \frac{g\tau}{2\pi} \text{ м/с} = 3.0363 \cdot \tau \text{ узлов}, \quad (5)$$

а необходимое время на преодоление расстояния  $x'$  равно:

$$\Delta T = \frac{x'}{c}. \quad (6)$$

Заблаговременность рассматриваемой карты ТК относительно времени ТС прохождения судном рассматриваемого района плавания:

$$\Delta t = T_K - T_C. \quad (7)$$

Если  $\Delta T \leq \Delta t \pm (0 \dots 6 \text{ часов})$ , то это волнение участвует в формировании волнового поля в районе плавания судна. Результаты сравнения представлены в таблице 4.

*Таблица 4 – Оценка возможности участия зыби удалённых циклонов в формировании волнового поля в районе плавания судна*

Дата, UTC	Заблаговременность $\Delta t$ , часы	Циклон, $x'$ (мили)	$\bar{h}_z$ , м	$\bar{\tau}_z$ , с	$c_z$ , уз.	$\Delta T$ , часы	Вывод
12.03.19 12 UTC	55	L955 1610	0.7	13.9	42.2	38.2	Волна с этим периодом не участвует
13.03.19 00 UTC	43	L985 1720	0.6	15.7	47.7	36.1	Участвует
		L978 1770	1.1	16.6	50.4	35.1	Участвует
13.03.19 12 UTC	31	L980 1663	0.4	14.8	44.9	37	Участвует
		L982 1760	-	-	-	-	Не участвует
14.03.19 00 UTC	19	L981 1873	0.7	17.1	51.9	36	Не участвует

Как следует из таблицы, волны со средними параметрами  $\bar{h}$ ,  $\bar{\tau}$  от циклона L955 за 12.03.19 12 UTC успевают пройти район плавания судна намного раньше, чем туда подойдёт судно. Можно определить, волнение каких параметров от этого циклона подойдёт в район плавания судна одновременно с судном. Задаваясь временем  $\Delta T = \Delta t = 55$  часов, из (6) найдём:

$$c = \frac{x'}{\Delta T} = \frac{1610}{55} = 29.27 \text{ узлов},$$

а из (5) найдём период зыби:

$$\tau_3 = \frac{c}{3.0363} = \frac{29.27}{3.0363} = 9.64c.$$

Обратным входом в диаграмму Свердруп-Манка по  $x=1610'=2981$  км найдём  $\bar{h}_3/\bar{h} = 0.28$ ;  $\bar{\tau}_3/\bar{\tau} = 1.66$ . Следовательно, период  $\bar{\tau}$  и частота  $\bar{\omega}$  ветрового волнения должны быть:

$$\tau = \frac{\tau_3}{1.66} = \frac{9.64}{1.66} = 5.81c;$$

$$\omega = \bar{\omega} = \frac{2\pi}{9.64} = 1.08144c^{-1}.$$

Полагая спектр ветрового волнения в области генерации волн соответствующим спектру Невцетаева [11], с данными по ветру L 955 и средними  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$  из табл. 3 получим:

$$S_{\xi}(\omega) = 9.43 \frac{m_0}{\bar{\omega}} \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^6 \cdot e^{-1.5\left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4}, \quad (8)$$

где  $m_0 = \left(\frac{\bar{h}}{2.51}\right)^2 = \left(\frac{3.0}{2.51}\right)^2 = 1.42855$ ;

$$\bar{\omega} = \frac{2\pi}{\bar{\tau}} = \frac{2\pi}{8.16} = 0.769998;$$

$$\omega_m = 0.777 \cdot \bar{\omega} = 0.59829.$$

Тогда расчётное выражение частотного спектра:

$$S_{\xi}(\omega) = 9.43 \frac{1.42855}{0.76999} \cdot \left(\frac{0.59829}{\omega}\right)^6 \cdot e^{-1.5\left(\frac{0.59829}{\omega}\right)^4}.$$

Для исследуемой частоты  $\omega = 1.08144$ ,  $S_{\xi}(\omega) = 0.43585$ . Принимая

$$m_0 = \left(\frac{\bar{h}}{2.51}\right)^2 = \left(\frac{3.0}{2.51}\right)^2 = 1.42855;$$

$$h = 2 \left(\frac{2}{S_{\xi}}\right)^{\frac{1}{2}} = 2(2 \cdot 0.43585)^{\frac{1}{2}} = 1.87m;$$

$$\frac{h_3}{h} = 0.28,$$

получим высоту волн зыби  $h_3 = 0.52$  м.

Таким образом, в районе плавания судна существуют волны зыби со следующими параметрами, таблица 5.

Эти волны формируют три группы по направлению и периодам:

- КУ = 114°,  $\tau = 5.81$  с;
- КУ = 152°–161°,  $\tau = 14.8$ –16.6 с;
- КУ = 6°,  $\tau = 17.1$  с.

Можно ожидать, что волны второй группы будут взаимодействовать между собой с образованием групповой структуры волнения [10], хотя эксперименты показывают, что при смешанном волнении частота ветровой составляющей фактически определяется высотой волны и мало зависит от зоны распространения ветра [12], [13].

Для простейшего случая формирования группы из двух систем волн с близкими частотами  $\omega_B$  и  $\omega_H$  в [10] получены:

- период и частота группы  $\tau_G = \frac{2\pi}{\omega_B - \omega_H}$ ;  $\omega_G = \frac{2\pi}{\omega_B + \omega_H}$ ;

- число волн в группе  $n = \frac{\tau_{\Gamma}}{\tau_H} = \frac{\omega_H}{\omega_{\Gamma}}$ .

*Таблица 5 – Параметры волн зыби от различных источников в районе плавания судна*

Генератор волн	Параметры волн в районе плавания			
	$h_3$	$T_3$	КУ	$\omega_3$
L 955 12.03.19 12 UTS	0.52	5.81	111.6	1.081
L 985 13.03.19 00 UTS	0.60	15.7	141.2	0.400
L 978 13.03.19 00 UTS	1.10	16.6	97.5	0.378
L 980 13.03.19 12 UTS	0.40	14.8	145.0	0.425
L 981 14.03.19 00 UTS	0.70	17.1	92.1	0.367

Рассматривая различные сочетания волн второй группы, получим периоды, частоты и число волн в группах:

$$\tau_{12} = \frac{2\pi}{0.425 - 0.400} = 251.3; \quad n_{12} = \frac{\tau_{\Gamma}}{\tau_H} = \frac{251.3}{14.8} = 17; \quad \omega_{12} = 0.025;$$

$$\tau_{13} = \frac{2\pi}{0.425 - 0.378} = 133.7; \quad n_{13} = \frac{\tau_{\Gamma}}{\tau_H} = \frac{133.7}{16.6} = 9; \quad \omega_{13} = 0.047;$$

$$\tau_{23} = \frac{2\pi}{0.400 - 0.378} = 285.6; \quad n_{23} = \frac{\tau_{\Gamma}}{\tau_H} = \frac{285.6}{16.6} = 18; \quad \omega_{23} = 0.022.$$

Таким образом, обобщая данные таблицы 5 и расчёты групповых частот, в местоположении судна в спектре частот волн могут присутствовать следующие частоты в порядке возрастания: 0.022; 0.025; 0.047; 0.367; 0.378; 0.400; 0.425; 1.081.

Частотам, отмеченным синим цветом, в таблице 1 соответствуют близкие частоты локальных максимумов, также отмеченные синим цветом. Частоте  $\omega = 1.081$ , отсутствующей в таблице 1, также соответствует локальный максимум гармоник  $m = 207$  с амплитудой  $C_{207} = 0.156$ .

В итоге из 19 выделенных локальных экстремумов удалось идентифицировать 12 локальных экстремумов бортовой качки, в том числе экстремумы основного максимума в диапазоне  $m = 45 \dots 90$ , часть которых соответствует основному и параметрическому резонансу бортовой качки, а часть – различным частотам зыби. Оставшиеся 7 экстремумов гармоник  $m = 7, 12, 34, 43, 93, 103, 111$  вне зоны основного максимума пока остаются не идентифицированными. По-видимому, причины этих экстремумов следует искать в нелинейном взаимодействии бортовой качки с другими видами качки судна или в интерференционном взаимодействии разнонаправленных волновых систем [14], [15].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Бычков В С, Стрекалов С С 1971 Морские нерегулярные волны (Москва: Наука)  
 2 Ziemer F and Günther H 1994 A system to monitor ocean wave fields (Proc. 2 nd Int. Conf. On Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone. Lisboa) pp 22–27  
 3 Лукомский Ю А, Корчанов В М 1996 Управление морскими подвижными объектами (Санкт-Петербург: Элмор)  
 4 Hasselmann K 1973 Measurements of Wind Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) (Deutsches Hydrographische Institut. Reihe A 12)  
 5 Torsethaugen K 1996 Model for a doubly peaked wave spectra (Sintef report № STF22 A96204 prepared for Norsk Hydro. Stavanger, Norway)  
 6 Hirayama T 1987 Real-time estimation of sea spectra based on motions of a running ship (2nd report) Directional wave estimation (Journal of the Kansai Society of Naval Architects, NO.204) pp 21-27.  
 7 Huss M, Olander A 1994 Theoretical Seakeeping Predictions On Board Ships – A System for Operational

**REFERENCES**

1 Bychkov V S, Strekalov S S 1971 Marine irregular waves (Moscow: Nauka)  
 2 Ziemer F and Günther H 1994 A system to monitor ocean wave fields (Proc. 2 nd Int. Conf. On Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone. Lisboa) pp 22–27  
 3 Lukomsky Yu A, Korchanov V M 1996 Management of marine mobile objects (St. Petersburg: Elmor)  
 4 Hasselmann K 1973 Measurements of Wind Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) (Deutsches Hydrographische Institut. Reihe A 12)  
 5 Torsethaugen K 1996 Model for a doubly peaked wave spectra (Sintef report no. STF22 A96204 prepared for Norsk Hydro. Stavanger, Norway)  
 6 Hirayama T 1987 Real-time estimation of sea spectra based on motions of a running ship (2nd report) Directional wave estimation (Journal of the Kansai Society of Naval Architects, NO.204) pp 21-27.  
 7 Huss M, Olander A 1994 Theoretical Seakeeping Predictions On Board Ships – A System for Operational Guidance and Real Time Surveillance (Stockholm, Naval Architecture) pp 93.  
 8 Iseki T, Ohtsu K, Fujino M 1992 A study on estimation of directional spectra based on ship motions (The Journal of Japan Institute of Navigation) Vol. 86.,pp 179-188

Guidance and Real Time Surveillance (Stockholm, Naval Arhitecture) pp 93.

8 Iseki T, Ohtsu K, Fujino M 1992 A study on estimation of directional spectra based on ship motions (The Journal of Japan Institute of Navigation) Vol. 86.,pp 179-188

9 Сичкарев В И 2000 Использование в судовождении гидromетеорологической информации Новосибирск НГАВТ с 176

10 Крылов Ю.М., Стрекалов С С, Цыплухин В Ф 1976 Ветровые волны и их воздействие на сооружения (Ленинград: Гидрометеоииздат)

11 Бородай И К, Нецветаев Ю А 1982 Мореходность судов (Ленинград: Судостроение)

12 Torsethaugen K, Haver S 2004 Simplified double peak spectral model for ocean waves (Paper № 2004-JSC-193 Stavanger, Norway)

13 Fossen T I 2011 Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. (Trondheim, Norway: John Wiley & Sons Ltd. Hardcover)

14 Fossen T I 1994 Guidance and Control of Ocean Vehicles (Trondheim, Norway: John Wiley & Sons Ltd.)

15 Tristan P 2005 Ship Motion Control (Trondheim, Norway: Springer)

9 Sichkarev V I 2000 Use of hydrometeorological information in navigation Novosibirsk NGAVT p. 176

10 Krylov Yu.M., Strekalov S S, Tsyplukhin V F 1976 Wind waves and their impact on structures (Leningrad: Gidrometeoizdat)

11 Boroday I K, Netsvetaev Yu A 1982 Seaworthiness of ships (Leningrad: Shipbuilding)

12 Torsethaugen K, Haver S 2004 Simplified double peak spectral model for ocean waves (Paper No. 2004-JSC-193 Stavanger, Norway)

13 Fossen T I 2011 Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. (Trondheim, Norway: John Wiley & Sons Ltd. Hardcover)

14 Fossen T I 1994 Guidance and Control of Ocean Vehicles (Trondheim, Norway: John Wiley & Sons Ltd.)

15 Tristan P 2005 Ship Motion Control (Trondheim, Norway: Springer)

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

*запись качки, обработка записи, повторяемость периодов качки, собственный период качки, гармонический анализ спектра качки*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

*Сичкарев Виктор Иванович д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:**

*Умрихин Виктор Павлович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

*630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

---

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ ЛАКОКРАСОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»

ФГБОУ ВО «НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.В. Пчельников, А.П. Пичугин, А.П. Илясов, А.С. Дмитриев

## ENSURING THE OPERATIONAL QUALITIES OF PROTECTIVE COATINGS OF MACHINERY AND EQUIPMENT WITH NANOMODIFIED PAINT AND VARNISH MATERIALS IN SIBERIA

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Novosibirsk State Agrarian University (NSAU) 160, Dobrolyubova St., Novosibirsk, 630039, Russia

Alexander V. Pchelnikov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSAU)

Anatoly P. Pichugin (D. of Engineering Sciences, Prof. of NSAU)

Alexander P. Ilyasov (Senior Lecturer of NSAU)

Alexander S. Dmitriev (Senior Lecturer of SSUWT)

**ABSTRACT:** The article discusses current areas of work to ensure the performance of protective coatings of machinery and equipment in the agro-industrial complex for the conditions of Siberia. The method of conducting fire resistance tests developed in the Novosibirsk State Agrarian University is presented. The results of preliminary tests in two directions are presented: fire resistance and corrosion protection.

**Keywords:** protective coatings, nanomodification, paint coatings, corrosion protection, fire resistance, adhesion, radiation protection, thermoregulation, antistatic.

В статье рассмотрены актуальные направления работы для обеспечения эксплуатационных качеств защитных покрытий машин и оборудования в АПК для условий Сибири. Представлена методика проведения испытаний на огнестойкость, разработанная в Новосибирском ГАУ. Представлены результаты предварительных испытаний по двум направлениям: огнестойкость и коррозионная защита.

Сельскохозяйственная отрасль Сибири имеет свою специфику и отличается особыми условиями эксплуатации. В настоящее время, применяемые защитные покрытия в большинстве случаев не обладают необходимыми свойствами.

Специфика эксплуатации машин и оборудования АПК в Сибири имеет ряд отличительных особенностей [1]:

1. Высокая коррозионная активность [2].

Металлофонд сельскохозяйственной отрасли России составляет 150 млн тонн. Ежегодно потери металла в результате коррозионных разрушений составляют до 20%, что практически в два раза превышает средние потери металла по стране в целом.

Срок службы металлических поверхностей объектов сельскохозяйственного назначения в 2,5-3 раза короче, чем в других сферах, это связано со спецификой эксплуатации этих объектов.

В частности, металлические поверхности сельскохозяйственной техники, за счет своих специфических условий эксплуатации и хранения также подвергаются интенсивному коррозионному разрушению. Это обосновывается совместным воздействием растительных сред, удобрений, погодных факторов (в особенности для условий Сибири) и механических нагрузок.

2. Высокая пожароопасность

Сельскохозяйственное производство связано с большим числом горючих материалов: сено, солома, созревший хлеб, лес, древесина, топливно-смазочные материалы и т.д.

К наиболее пожароопасным сельскохозяйственным объектам относятся предприятия по хранению и переработке зерна, заводы по производству растительного сырья, сельскохозяйственная техника и др. [3].

Общий материальный ущерб за последние несколько лет в России составляет 60 млн долларов.

Возгорания сельскохозяйственной техники, работающей сезонно при повышенных эксплуатационных нагрузках, одна из основных проблем в России в период проведения уборочных работ.

Одной из основных причин повышенного возгорания с/х техники является устаревший

парк. 85% тракторов и 50% комбайнов в России старше 10 лет.

Ежегодно в России, в результате пожаров уничтожается более 7800 единиц автотракторной техники.

В свою очередь, Сибирский регион относится к одному из наиболее пожароопасных регионов страны [3].

### 3. Климатические условия Сибири.

Фактором, сокращающим срок эксплуатации машин и оборудования в АПК в условиях Сибири, являются суровые погодные условия:

- большие перепады температур (от  $-50^{\circ}\text{C}$  зимой до  $+40^{\circ}\text{C}$  летом) и частые переходы температур через  $0$  градусов;

- высокая солнечная радиация;

- колебания влажности воздуха в течение года в пределах 50-70%.

В результате наблюдаются следующие негативные последствия:

1) Влажный воздух, перепады температур и переходы температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  приводят к возникновению термических напряжений в защитных покрытиях из-за различных коэффициентов линейного расширения компонентов. Соответственно, покрытия теряют свои защитные свойства, и металл начинает корродировать.

2) В зимний период, при больших отрицательных температурах тратится огромное количество энергии на сохранение тепла и обеспечение работоспособного состояния агрегатов сельскохозяйственных машин и оборудования. В связи с этим сокращается их ресурс и повышаются затраты на их содержание.

### 4. Особенности расположения Сибирского региона. Повышенный радиационный фон.

Еще одна из особенностей Сибири - расположение. Большая часть региона находится на гранитных плитах с высокой концентрацией радона (до трех раз выше, чем средняя норма облучения радоном по стране). Его постоянное воздействие на человека приводит к развитию рака и злокачественных опухолей. Воздействие радоном относится к альфа-излучению и его воздействие в десятки раз интенсивнее, чем воздействия другого типа (рисунок 1).



Рисунок 1 – Радиационная карта России

Большое значение эта проблема имеет для сельских жителей, которые проводят значительное время, работая в непосредственной близости от источников радиации в зонах с повышенным радиационным фоном. Как правило, жизнь сельских механизаторов в районах с повышенным радиационным фоном значительно короче, чем в районах с благоприятной обстановкой. Среди таких людей наблюдается высокая заболеваемость онкологическими заболеваниями.

В связи с этим, решение вопросов, связанных с защитой от радиационных излучений

людей, находящихся в зонах с повышенным радиационным фоном, требует решения.

В настоящее время, защитные покрытия, применяемые в условиях Сибири, не обладают необходимым набором эксплуатационных качеств, что выражается в больших материальных потерях.

В связи с этим, актуально находить пути обеспечения комплексом необходимых эксплуатационных качеств защитных покрытий для различных условий.

Таким образом, на основании вышеизложенного, возможно выделить наиболее важные направления для обеспечения эксплуатационных качеств защитных покрытий машин и оборудования в АПК, эксплуатируемых в Сибири.

1. Коррозионная защита. Задача повышения коррозионной защиты металлов решается за счет повышения физико-механических и защитных свойств покрытий. Долговечные покрытия, устойчивые к механическим, химическим или атмосферным воздействиям, способствуют более надежной защите металла. Необходимо учитывать набор свойств покрытия в зависимости от условий его эксплуатации.

2. Терморегуляция. Покрытия, обеспечивающие терморегуляционные свойства для агрегатов транспортно-технологических машин и оборудования в АПК.

3. Огнестойкость. Покрытия, обеспечивающие сохранность объектов с повышенными рисками к возгоранию.

4. Антистатика. Некоторые сельскохозяйственные производства характеризуются повышенным пылеобразованием, прилипанием к поверхностям пыли, грязи и технологических отходов, что в определенных условиях может вызывать пожары. В связи этим, в определенных случаях, помимо огнестойкости, необходимо дополнительно повышать антистатические качества покрытий.

5. Радиационная защита. Необходимо создавать покрытия, обеспечивающие защиту сельских работников от воздействий ионизирующих излучений в зонах с повышенным радиационным фоном.

Один из самых эффективных способов повышения эксплуатационных качеств защитных покрытий является их наномодификация. За счет этого возможно добиться изменения целого комплекса свойств защитных покрытий.

Добавление наночастиц проводится путем химического модифицирования, которое может осуществляться как на стадии синтеза исходных компонентов, так и непосредственно в процессе их переработки, а также возможно совершенствование составов на этапе их приготовления к применению.

Наиболее эффективным является последнее направление, поскольку корректировка рецептуры составов при их приготовлении позволяет без изменения технологических процессов и режимов производства материалов достичь улучшения комплекса свойств защитных покрытий [4,5].

Защитные лакокрасочные покрытия не только повышают горючесть, но и способствуют более быстрому распространению пламени по поверхности, увеличивают дымообразование и токсичность [6].

Существующие способы оценки огнестойкости, как правило, являются обобщенными и не ориентированы на испытание защитных покрытий и, в большей степени, направлены на определение показателей горючести строительных материалов. Также известные способы для испытания защитных покрытий позволяют определять лишь несколько показателей горючести материалов. В связи с этим не позволяют в полной мере оценить их огнестойкость.

Для повышения информативности проведения испытаний на Огнестойкость защитных покрытий, в Новосибирском ГАУ разработано и запатентовано «Устройство для определения пока-затлей горючести защитных покрытий» (патент РФ №2740179) (рисунок 2). С помощью этого устройства, возможно определять следующие показатели: температура дымовых газов, продолжительность самостоятельного горения/тления, длина повреждения образца, масса образца до и после испытания, температура воспламенения/самовоспламенения, расстояние до источника огня.

Данная методика показала свою эффективность, а испытание контрольных образцов позволило определить ее сходимость с другими методиками.



(a)

(b)

Рисунок 2 – Устройство для определения показателей горючести защитных покрытий: (a) – Патент №2740179; (b) – Вид устройства.

В качестве объяснения происходящим процессам был применен физико-химический метод - термомеханические исследования, позволяющие с достаточной достоверностью подтвердить рациональный состав по характеристикам термомеханической кривой, которая строится на основе измерения деформации одноосного сжатия под влиянием непрерывно действующей нагрузки в условиях нагрева образца с постоянной скоростью в интервале температур от комнатной до 300 °С [7,8].

Адгезионная прочность лакокрасочных покрытий определялась в соответствии с ISO 2409 и 4624.

Толщина лакокрасочного покрытия определялась в соответствии с ISO 2808.

Твердость по Шору лакокрасочного покрытия определялась в соответствии с ISO 7619.

Для проведения испытаний подготовлены образцы в соответствии с ISO 1514. Для получения лакокрасочных покрытий принята эмаль АК-1301, выбор которой обоснован в предыдущих исследованиях [9].

На данный момент, результаты исследований по данной теме являются предварительными. Ниже представлены уже полученные результаты по отдельным направлениям (огнестойкость, коррозионная защита).

Для повышения огнестойкости защитных покрытий применяют специальные модифицирующие добавки - антипирены. Однако, необходимо учитывать их влияние на физико-механические свойства, чтобы обеспечить надежную защиту металлических поверхностей.

Были испытаны наиболее эффективные порошковые антипирены (гидроксид алюминия – ГА, гидроксид магния - ГМ), а также определено их влияние на адгезионную прочность покрытий.

В результате проведенных испытаний наблюдается, что с ростом концентрации гидроксида алюминия в эмали повышается температура воспламенения покрытия (со 110...120°С до 230...240°С) и время его сопротивления воспламенению (с 12...18 с до 43...50 с), но при этом адгезия покрытия ухудшается (с 0 до 3 баллов).

При добавлении гидроксида магния в эмаль до 10%, наблюдалось повышение температуры воспламенения покрытия (со 110...120°С до 165...171°С), а время его сопротивления воспламенению увеличивалось (с 12...18 с до 27...30 с). Добавление более 10% гидроксида магния в состав эмали привело к последующему снижению температуры воспламенения покрытия (со 165...171°С до 130...136°С) и снижению времени сопротивления воспламенению (с 27...30 до 24...26 с), при сохранении адгезии в 1 балл.

Таким образом, за счет применения гидроксида магния, возможно добиться повышения огнестойкости покрытия (температура воспламенения до 170°С и более) и при этом сохранить

его физико-механические свойства.

Таблица 1 – Результаты испытаний гидроксида алюминия и гидроксида магния

Содержание добавки в ЛКМ, %	Время сопротивления воспламенению, с	Температура воспламенения, °С	Адгезия покрытия, балл
0	12...18	110...120	0
5%ГА	22...24	132...140	1
10%ГА	20...23	135...143	2
20%ГА	43...50	230...240	3
5%ГМ	20...23	133...141	1
10%ГМ	27...30	165...171	1
20%ГМ	24...26	130...136	1

Если гидроксид алюминия и магния являются общеизвестными добавками для повышения огнестойкости, то использование нанопорошка оксида висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) носит пока экспериментальный характер [10]. В таблице 2 представлены результаты исследований.

Таблица 2 – Результаты испытаний Оксида висмута

Содержание $\text{Bi}_2\text{O}_3$ в ЛКМ, %	Средняя толщина, мкм	Твердость по Шору	Адгезионная прочность, МПа	Температура воспламенения, °С	Время до воспламенения, с
0	50...52	63...65	2,5...2,7	110...120	12...18
0,5	52...54	62...67	2,7...2,9	-	-
1	61...65	81...88	3,0...3,2	-	-
2,5	62...66	76...82	3,1...3,4	130...142	15...20
5	67...72	86...94	3,3...3,6	137...152	19...24
7,5	68...70	67...75	3,2...3,4	225...240	57...65
10	73...75	69...73	3,1...3,3	-	-

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что при достижении концентрации оксида висмута 5% наблюдается экстремум для значений твердости (86...94) и адгезии (3,3...3,6 МПа) покрытия. В то же время, добавление оксида висмута в концентрации 7,5% позволило добиться существенного повышения огнестойкости покрытия. Огнестойкость и время воспламенения повысилась до 240°С и 65с соответственно. Также стоит отметить об увеличении толщины покрытия при его модификации оксидом висмута.

При проведении термомеханических исследований наномодифицированного покрытия с оксидом висмута, определено, что введение 5% оксида висмута (рисунок 3, кривая 4) способствует повышению термостабильности покрытия и переводу точки текучести покрытия на 35-40°С выше контрольного образца, что свидетельствует об усиливающем влиянии данной добавки на покрытие в целом. Следует дополнительно отметить существенное снижение величины деформации, которая, по сравнению с контрольным образцом, уменьшается почти в два раза.

Полученные результаты позволяют говорить о том, что применение наноразмерных частиц оксида висмута перспективно в плане получения долговечного покрытия с повышенной огнестойкостью и физико-механическими свойствами.

Известно, что предварительная обработка поверхности перед нанесением защитных покрытий составами на основе нанодобавок позволяет добиться улучшения физико-механических свойств покрытия, а соответственно способствует лучшей защите от коррозии [8]. С этой целью определено, что наибольший эффект можно достичь при применении состава кремне-золя с углеродными нанотрубками. За счет предварительной обработки таким составом образуются более однородные и менее дефектные структуры при контакте с металлом. Данный эффект объясняется снижением внутренних напряжений на границе раздела фаз.

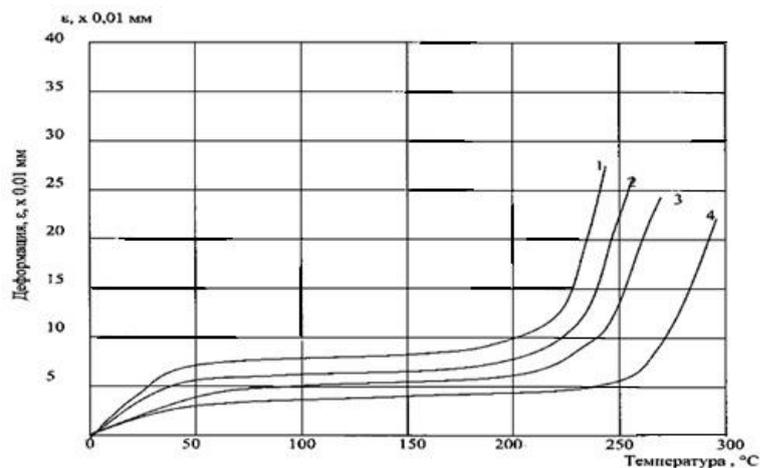


Рисунок 3 – Термомеханические кривые модифицированного покрытия добавками оксида висмута: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 1%  $Bi_2O_3$ ; 3 – то же, с добавкой 10%  $Bi_2O_3$ ; 4 – с добавкой 5%  $Bi_2O_3$

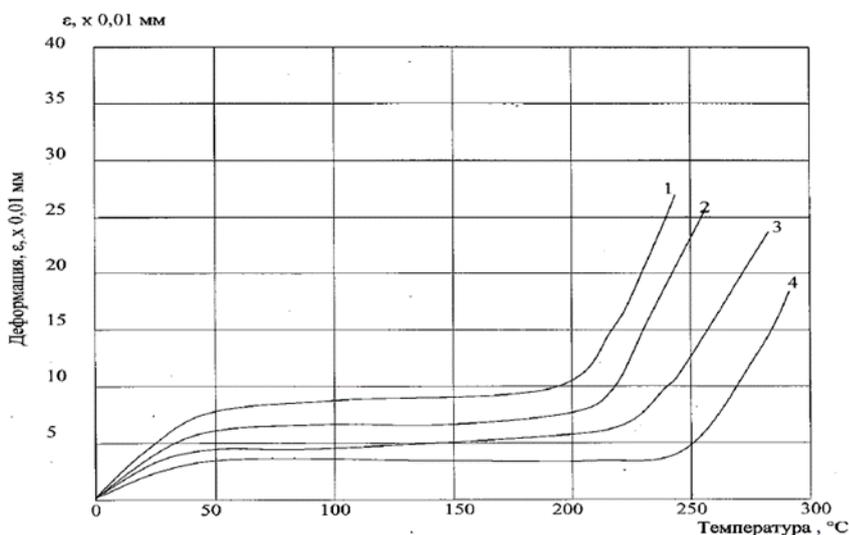


Рисунок 4 – Термомеханические кривые модифицированного покрытия добавками кремнезоля и углеродных нанотрубок от температуры при действии постоянной нагрузки: 1 – без добавок; 2 – с добавкой раствора кремнезоля 5 %; 3 – то же, с добавкой кремнезоля 10 %; 4 – с добавкой кремнезоля и УНТ.

На графике (рисунок 4) показано, что совместное влияние кремнезоля и Углеродных нанотрубок обеспечивает смещение температуры текучести покрытия на 25-30°C, что говорит об эффекте совместного действия (кривая 4).

По результатам проведенных на сегодняшний день теоретических и экспериментальных исследований можно сказать, что решение вопросов обеспечения эксплуатационных качеств защитных покрытий для различных условий возможно решить путем нахождения оптимальных составов нанодобавок в покрытиях.

Таблица 3 выполнена по результатам исследований и показывает влияние различных добавок на эксплуатационные качества защитных покрытий (модификаторы расположены в последовательности уменьшения их стоимости слева-направо). Представленные данные являются предварительными и будут дополняться по результатам полного комплекса экспериментальных исследований. Планируется определить влияние указанных добавок на эксплуатационные качества, имеющие важное значение для машин и оборудования АПК, эксплуатируемых в условиях Сибири.

Основная задача исследования на текущем этапе заключается в оптимизации составов защитных покрытий и обеспечении комплекса свойств для условий эксплуатации в каждом конкретном случае. Необходимо также учитывать совместное влияние наномодификаторов на свойства защитного покрытия.

Таблица 3 – Влияние модификаторов на эксплуатационные качества защитных покрытий

		----->ниже							
		-----<----- Стоимость -----							
Эксплуатационные качества защитных покрытий		Состав с УНТ	Диоксид титана	Оксид висмута	Оксид церия	Кремнезоль	Керамические микросферы	Гидроксид магния	Гидросиликат магния
Коррозионная защита	Механические свойства	+	+	+	+-	++	+	+-	-
	Защитные свойства	+	+	-	-	+-	+	++	-
Терморегуляция		-	-	+	-	+	+	-	+
Огнестойкость		+	+	++	+	+	+	+	+
Антистатика		++	+	-	+	-	-	-	-
Радиационная защита		+	+	+	-	+	-	-	-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Хрянин В.Н., Пчельников А.В. 2019. Исследования износоустойчивости лакокрасочных покрытий рабочих органов сельскохозяйственных машин. Ремонт. Восстановление. Модернизация. № 7. С. 44-48.

2 Zabara, K., Shpak, A., Shemyakin, A., Melkumova, T., Morozova, N., Podyablonskiy, A. 2020. Prevention of corrosion fracture of agricultural equipment during storage. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, pp. 060022019.

3 Пчельников А.В., Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Волобой Е.А. 2020. Моделирование процесса и способы оценки горения защитных покрытий металлических конструкций и оборудования. Известия вузов. Строительство. №6 (738) с.81-90.

4 Xue, H., Ye, Y., Li, X., Xia, J., Lin, Q. 2020. Nanosilica modification of UV-curable EVA resin for additive manufacturing. Polymer Engineering and Science Volume 60, Issue 7, Pp 1579-1587.

5 Шашок, Ж. С. Применение углеродных наноматериалов в полимерных композициях / Ж. С. Шашок, Н. Р. Прокопчук. – Минск : БГТУ, 2014. – 232 с. – ISBN 978-985-530-317-7.

6 Myronyuk, O.V., Raks, V.A., Baklan, D.V., Bar-rat, S, Arranda, L., Yezhov, S., Kara, H. 2020. Aspects of the reduction of the coating fire resistance by the use of nanosized additives. Applied Nanoscience (Switzerland). Volume 10, Issue 12, Pp. 4901-4907.

7 Smirnova O.E., Pichugin A.P., Sebelevi.M. 2020. Research of pressed thermal insulation materials, based on organic waste. В сборнике: IOP conference series: materials science and engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction. 012051.

8 Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е., Пчельников А.В., Шаталов А.А. 2021. Реконструкция водогрейной котельной архитектурного ансамбля курорта «Озеро Карачи». Жилищное строительство. № 1-2. С. 26-33

9 Гуськов Ю.А., Хрянин В.Н., Пчельников А.В., Железнов А.А. 2016. Исследование систем лакокрасочных покрытий, применяемых при окрашивании сельскохозяйственной техники, на сопротивление истиранию. Достижения науки и техники АПК. Т. 30. № 11. С. 118-120.

10 Riente, P., Fianchini, M., Llanes, P., Pericàs, M.A., Noël, T. 2021. Shedding light on the nature of the catalytically active species in photocatalytic reactions using Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor. Nature Communications Volume 12, Issue 1. p.625.

## REFERENCES

1 Hryanin V.N., Pchelnicov A.V. 2019. The study of the wear resistance of paint coatings of working bodies of agricultural machines. Remont. Re-covery. Modernization. No. 7. pp. 44-48.

2 Zabara K., Shpak A., Shemyakin A., Melkumova T., Morozova N., Po-diablonsky A. 2020. Prevention of corrosion destruction of agricultural machinery during storage. E3S Web Conference, Volume 164, May 5, 2020, page 060022019.

3 Pchelnicov A.V., Pichugin A.P., Hritankov V.F., Voloboy E.A. 2020. Modeling of the process and methods for evaluating the combustion of protective coatings of metal structures and equipment. Gorenje News of universi-ties. Construction.No. 6 (738) pp.81-90.

4 Xue, H., Ye, Y., Li, H., Xia, J., Lin, K. 2020. Modification of nanosilicon by curing UV resin EVA for additive manufacturing. Polymer Engineering and Science Volume 60, Issue 7, Pp. 1579-1587.

5 Shashok, J. S. Application of carbon nano-materials in polymer compositions / J. S. Shashok, N. R. Prokopchuk. – Minsk : BSTU, 2014. - 232 p. - ISBN 978-985-530-317-7.

6 Myronyuk O.V., Raks V.A., Baklan D.V., Bar-rat S., Arranda L., Yezhov S., Kara H. 2020. Aspects of reducing the fire resistance of the coating through the use of nanoscale additives. Applied Nanoscience (Switzerland). Volume 10, Issue 12, Pp. 4901-4907.

7 Smirnova O.E., Pichugin A.P., Sebelevi.M. 2020. Research of pressed thermal insulation materials based on organic waste. In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference "Architecture and Construction" No. 012051.

8 Pichugin A.P., Hritankov V.F., Smirnova O.E., Pchelnicov A.V., Shatalov A.A. 2021. Reconstruction of the water and mud baths of the architectural ensemble of the resort "Lake Karachi". Housing construction. No. 1-2. pp. 26-33

9 Guskov Yu.A., Hryanin V.N., Pchelnicov A.V., Zheleznov A.A. 2016. Investigation of paint and varnish coating systems used in the dyeing of agricultural machinery for abrasion resistance. Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. Vol. 30. No. 11. pp. 118-120.

10 Riente P., Fianchini M., Llanes P., Perikas M.A., Noel T. 2021. Sheds light on the nature of catalytically active substances in photocatalytic reactions using a Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor. Nature Communications Volume 12, issue 1. p.625.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

защитные покрытия, наномодификация, лакокрасочные покрытия, коррозионная защита, огнестойкость, адгезия, радиационная защита, терморегуляция, антистатика

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пчельников Александр Владимирович канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «НГАУ»  
Пичугин Анатолий Петрович д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «НГАУ»  
Илясов Александр Петрович старший преподаватель ФГБОУ ВО «НГАУ»  
Дмитриев Александр Сергеевич старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
630039, г.Новосибирск, ул.Добролюбова, 160, ФГБОУ ВО «НГАУ»

## ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОМЕНТА В ДИЗЕЛЕ

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ВОДНОГОТРАНСПОРТА»

А.М Барановский, О.В Щербакова, С.В Викулов

## MODELING OF THE MOMENT IN A DIESEL ENGINE

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Alexander M. Baranovsky (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Olga V. Shcherbakova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Stanislav V. Vikulov (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** In single-moving mechanisms, forces and masses are brought to the primary mechanism to study dynamics. In an engine, this is a crankshaft, the movement of which depends on the forces of inertia, the drag force of the mover and the forces acting on the piston. The obtained law of moment change allows us to obtain initial data for dynamic calculations.

**Keywords:** mechanism kinematics, cylinder volume, compression pressure, adiabatic, filtering functions

В одноподвижных механизмах для исследования динамики проводится приведение сил и масс к первичному механизму. В двигателе это коленчатый вал, движение которого зависит от сил инерции, силы сопротивления движителя и сил, действующих на поршень. Полученный закон изменения момента позволяет получить исходные данные для динамических расчетов.

В двигателе внутреннего сгорания воздух сжимается и нагревается, затем дополнительно нагревается при сгорании топлива и расширяется при большом давлении. Заменяем тепловые расчеты [1, 2] газовыми законами, что сокращает расчет и не меняет динамику двигателя. Текущая мощность равна произведению силы на поршне, на его скорость. Эта мощность переходит на вал. Движущий момент в дизеле крайне неравномерный, что связано с кинематикой механизма и быстрым сгоранием паров топлива.

Сжатие и расширение рабочего тела проходит близко к адиабатному уравнению Пуассона, в котором индекс 1 соответствует первому состоянию, индекс 2 – второму. Например, в нижней мёртвой точке воздух не сжат и занимает объём цилиндра. Допустим, что это первое состояние. Когда поршень сожмёт газ, его объём уменьшится до камеры сгорания, а давление возрастет. Допустим, что это второе состояние. Поскольку объём зависит от угла поворота кривошипа, его легко посчитать. По нашему мнению, обучение инженера проходит успешнее в работе с размерными величинами. Остаётся задать одно из давлений и решить уравнение относительно неизвестного давления.

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (1)$$

Показатель степени  $\gamma$  равен 7/5, что соответствует адиабатному процессу двухатомного газа. Номинальная степень сжатия  $\gamma$  показывает отношение наибольшего объёма цилиндра  $V_{max}$  к наименьшему объёму  $V_{min}$ . Степень сжатия различных двигателей находится в пределах от 10 до 20 и может быть принята  $\varepsilon = 15$ . Для исследования динамики будем учитывать только рабочий ход и сжатие. Выпуск и наполнение можно не учитывать из-за малости насосных потерь.

Зададим рабочий ход от верхней мёртвой точки (вмт) с давления сгорания  $P_{kindlemax}$ . Текущее давление равно

$$P(q) = P_{kindlemax} \left[ \frac{V_{min}}{V(q)} \right]^\gamma \quad (2)$$

Рассмотрим механизм, состоящий из кривошипа, шатуна и ползуна.

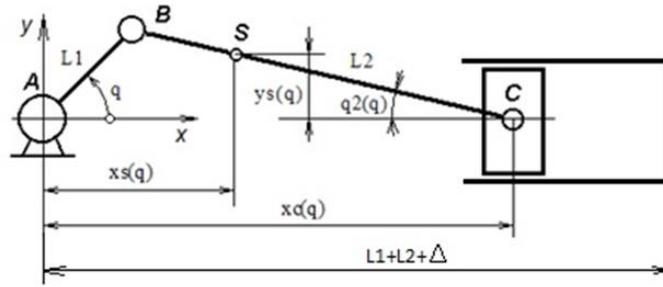


Рисунок 1 – Выбор координат плана механизма

Текущий объём цилиндра [3] с учетом высоты  $\Delta$  камеры сгорания равен

$$V(q) = \frac{\pi D^2}{4} \left( \Delta + L1 + L2 - L1 \cos(q) - \sqrt{L2^2 - L1^2 \sin^2(q)} \right) \quad (3)$$

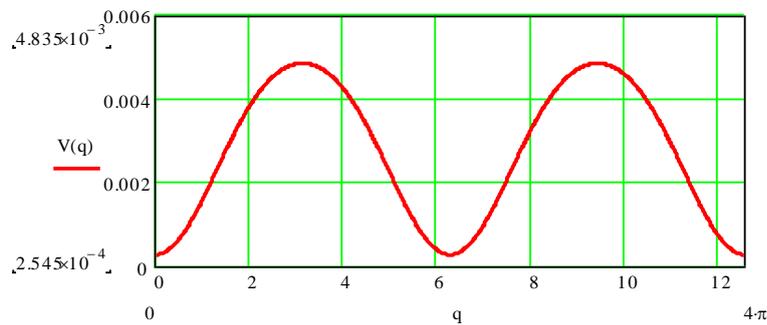


Рисунок 2 – Полный объём цилиндра

Минимальный объём

$$V_{\min} = \frac{\pi D^2}{4} \Delta \quad (4)$$

Наибольшее давление зависит от подачи топлива и может быть принято  $P_{2\max} = 10 \text{ МПа}$   
Текущее давление при расширении

$$P(q) = P_{2\max} \left( \frac{V_{\min}}{V(q)} \right)^{\gamma} \quad (5)$$

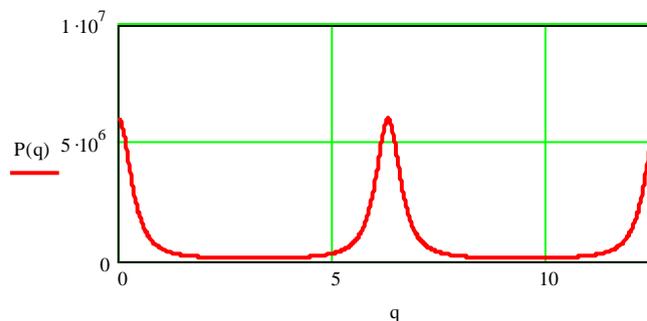


Рисунок 3 – Давление в цилиндре при сжатии за два оборота

Мощность силы при единичной скорости

$$N(q) = F(q) V_c(q) \quad (6)$$

Крутящий момент на валу равняется мощности, делённой на скорость вращения.

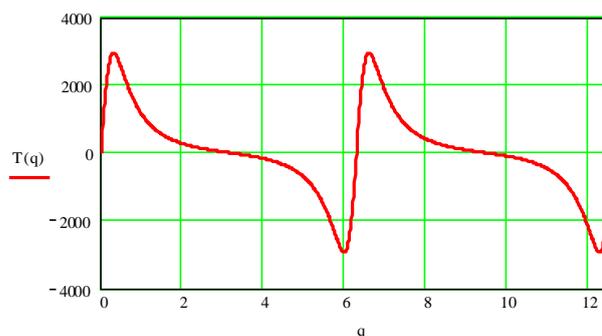


Рисунок 4 – Модель крутящего момента при сжатии

Аналогичный расчёт можно провести для такта сжатия. Зададим сжатие от впт с максимального давления сжатия. Наибольшее давление зависит от наддува и для дизеля без наддува может быть принято  $P_{1max} = 4,5 \text{ МПа}$ . При этом, учитываем, что сила на поршне снижена пропорционально давлению сжатия.

Такой же порядок соблюдается при вычислении момента в такте расширения. Отличие только в давлении, которое после сгорания топлива возрастает в нашем примере до  $P_{2max} = 10 \text{ МПа}$ .

Полученные моменты необходимо отфильтровать. Используем оператор «if». Структура этой команды содержит три выражения в скобках. Сначала ставится условие для управляющей функции, например, больше нуля. Затем, через запятую, указывается множитель момента, затем альтернативное значение множителя, например, ноль. На языке программы запись имеет вид

$$f1(q) := \text{if} (fp(q) > 0, -1, 0) \text{Inflation}$$

$$f2(q) := \text{if} (fc(q) > 0, -1, 0) \text{Compression} \quad (7)$$

В качестве управляющей функции принимаем синусоиду, смещённую по осям [4,5]. Период синусоиды должен быть равен двум оборотам в четырёхтактном двигателе и одному обороту в двухтактном.

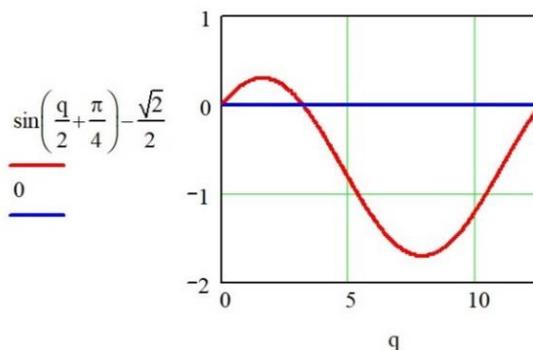


Рисунок 5 – Синусоида для расширения

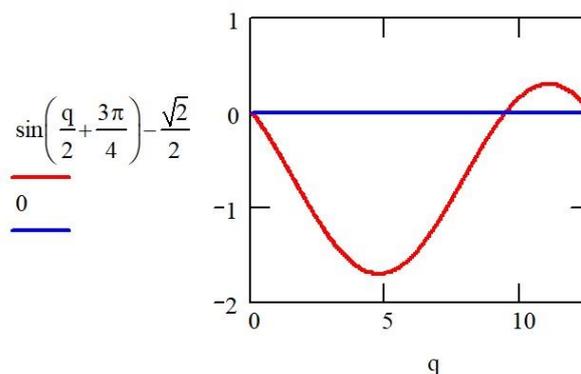


Рисунок 6 – Синусоида для сжатия

Отфильтруем лишние фазы и получим момент четырехтактного двигателя

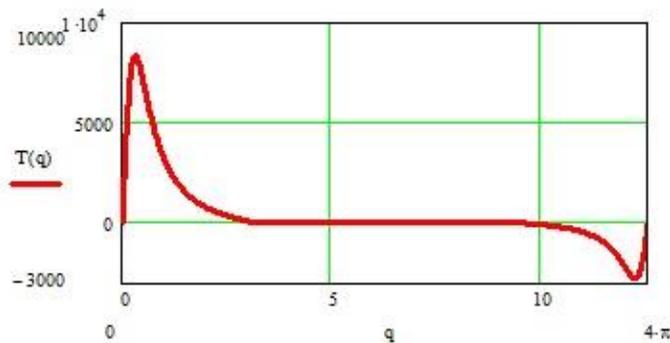


Рисунок 7 – Крутящий момент четырехтактного двигателя

Полученные аналитические зависимости крутящего момента от угла поворота коленчатого вала используются для составления уравнения движения. Метод позволяет менять длину звеньев механизма, диаметр цилиндра, степень сжатия, давления в такте сжатия и в такте рабочего хода. Показатель адиабаты можно заменить на показатель политропы и связать его с положением поршня.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей /под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М. Машиностроение, 1983 – 376 с.
- 2 Ваншейдт В. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания /В. А. Ваншейдт. – Л.: Судостроение, 1977 – 392 с.
- 3 Теория механизмов и машин. Методические указания по численному исследованию динамики механизмов/А. М. Барановский, В. В. Дегтярева – Новосибирск: «СГУВТ», 2020. – 32 с.
- 4 Колебания в судовых механизмах. Учебник СГУВТ/А.М. Барановский, Л.В. Пахомова, Ю.И. Ришко – Новосибирск: «СГУВТ», 2015. – 210 с.
- 5 E.A. Lazarev, M.A. Matculevich, V.E. Lazarev, Peculiarities of Gas Pressure Development Depending on the Intensity of a Burning Fuel in the Diesel Engine Cylinder, Procedia Engineering, Volume 150, 2016, Pages 132-137, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2016.06.735>.

## REFERENCES

- 1 Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей /под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М. Машиностроение, 1983 – 376 с.
- 2 Ваншейдт В. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания /В. А. Ваншейдт. – Л.: Судостроение, 1977 – 392 с.
- 3 Теория механизмов и машин. Методические указания по численному исследованию динамики механизмов/А. М. Барановский, В. В. Дегтярева – Новосибирск: «СГУВТ», 2020. – 32 с.
- 4 Колебания в судовых механизмах. Учебник СГУВТ/А.М. Барановский, Л.В. Пахомова, Ю.И. Ришко – Новосибирск: «СГУВТ», 2015. – 210 с.
- 5 E.A. Lazarev, M.A. Matculevich, V.E. Lazarev, Особенности развития давления газа в зависимости от интенсивности горения топлива в цилиндре дизельного двигателя, Procedia технических, Том 150, 2016, стр. 132-137 г. ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2016.06.735>.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:	кинематика механизма, объём цилиндра, давление сжатия, адиабата, фильтрующие функции
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:	Барановский Александр Михайлович д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ» Щербакова Ольга Валерьевна канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ» Викулов Станислав Викторович д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:	630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

## АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ВЕРХнюю ПОРШНЕВУЮ КОМПРЕССИОННУЮ КАНАВКУ ПОРШНЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГОТРАНСПОРТА»

А.В. Мукасеев

### ANALYSIS OF THE IMPACT OF EXTERNAL FACTORS ON THE UPPER PISTON COMPRESSION GROOVE OF THE ALUMINUM ALLOY PISTON OF MARINE DIESEL

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
Alexander V. Mukaseev (Ph. D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The design of water non-self-propelled vessels of various types assumes the presence of an engine that drives them. At the same time, the engine device requires paying special attention to the composition of the parts of which it consists, in order to prevent the occurrence of emergency situations and rapid engine wear.

**Keywords:** thermal conductivity, piston, groove, engine, aluminum, alloy, wear, strength

Конструкция водных самоходных судов различного типа предполагает наличие двигателя, приводящего их в движение. При этом устройство двигателя требует уделять отдельное внимание к составу деталей, из которых он состоит, для предотвращения появления аварийных ситуаций и быстрого износа двигателя.

Цилиндропоршневая группа (ЦПГ) выступает основополагающим узлом судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС). Уверенная работа деталей данного класса помогает увеличению действенных данных двигателя. В судовом дизеле поршень является одной из более нагруженных элементов и, чаще всего, максимально напряженной деталью ЦПГ. В процессе эксплуатации СДВС поршень подлжит различному воздействию внешних факторов. Например, таких, как высокие температуры и динамические нагрузки, образующиеся во время сгорания топлива и образования отработавших газов, а также воздействия на ЦПГ сил трения. Кроме того, поршень принимает усилие, оказывающее воздействие на его боковую поверхность со стороны втулки цилиндра [1]. Взаимодействие с горячими газами и принимаемое поршнем тепло трения ведут к его нагреву до максимальных температур. Но с увеличением температуры механические особенности металлов меняются. Чаще всего это сказывается на уменьшении прочности материала. Высокие температуры иногда выступают причиной заметной деформации и увеличенного износа поршня, а также ведут к закоксовыванию поршневых колец или заклиниванию поршня в цилиндре СДВС. Осложненные состояния работы обычно ведут к нарушению деталей ЦПГ судового дизеля. Поэтому разработка относительно дешевых мероприятий по увеличению срока службы алюминиевых поршней является актуальной научно-технической задачей.

Большое распределение в СДВС на данный момент взяли поршни из алюминиевых сплавов. Главной ценностью данных поршней являются: небольшая масса, технологичность, высокая теплопроводность и коррозионная стойкость [1]. Кроме того, температурное поле поршня из алюминиевого сплава ниже, чем у чугуна из-за повышенной теплопроводности алюминия. В итоге на днищах поршней из алюминиевых сплавов появляется меньше нагаротложений, а на юбке образуется наиболее надежная пленка смазки, которая оказывает положительное воздействие на связь с зеркалом цилиндра. А у алюминиевых сплавов есть и свой минус – это низкая износостойкость. Монометаллические поршни из алюминиевых сплавов обычно выводятся из строя из-за повышенного износа верхних поршневых компрессионных канавок [2]. На поршневую канавку оказывает влияние обширный ряд сил и нагрузок: сила давления газа; сила инерции кольца; сила трения, образующаяся при относительном перемещении кольца в поршневой канавке; температурные нагрузки. Влияние воздействия сил от поршневых колец на канавку в процессе эксплуатации судового дизеля объясняется как взаимодействием знакопеременного движения поршня и давления газов, так и вибрацией колец. Чаще всего вибрация колец выступает последствием разрушения верхней торцевой поверхности канавки [3]. Нижние поверхности канавок более изнашиваются от воздействия давления газов на такте расширения. Также необходимо принимать во внимание, что взаимодействие поршневых колец и канавок происходит при повышенной температуре (200–250 °С) с наличием в области контакта твердых продуктов коксования и абразивных частиц, оказывающихся с внешней стороны.

Чаще всего с целью увеличения прочности и уменьшения износа поршней, в области верхней поршневой канавки под компрессионное кольцо используют уплотняющие поверхности или износостойкие конструктивные элементы.

Рассмотрим, как же происходит изменение теплопроводности в материале поршня из алюминиевого сплава после воздействия на него некоторых факторов. Предусмотрим проведение такой операции для воздействия на материал поршня, как осадка материала под действием пресса. Это может вызвать изменение коэффициента теплопроводности по отношению к исходному варианту.

С другой стороны, известно [4], что максимальная температура для алюминиевых сплавов не должна превышать 305 °С. Обычно температура доньшка алюминиевых поршней находится в интервале 205–300 °С, т.е. имеется определенный резерв на случай форсировки двигателя. Кроме того, нельзя допустить заметного роста температуры поршня в районе верхнего поршневого кольца, что может снизить надежность работы последнего.

Таким образом, возникает необходимость исследования возможного изменения

теплонапряженности измененного поршня по отношению к исходному варианту. Данную задачу предполагается решить численным методом. Для этого необходимо знать коэффициент теплопроводности исходного и деформированного материала.

Характерной особенностью алюминиевых сплавов является высокая теплопроводность (до 240 Вт/(м К)). Испытания проводились на приборе ИТ-λ-400, основные эксплуатационные характеристики которого приведены в таблице 1, а общий вид представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Прибор ИТ-λ-400 для определения теплопроводности материалов

Таблица 1 – Основные характеристики измерителя теплопроводности

Наименование параметра	Значения
Диапазон измерения теплопроводности, Вт/(м·К)	0,1-10,0
Температурный диапазон измерения теплопроводности, °С	(-100)-(+400)
Предел допускаемой основной погрешности измерителя теплопроводности, %	± 10
Потребляемая мощность, кВА	1
Напряжение питания: переменный ток	220 ± 22 В
Частота	50 Гц

Принцип действия измерителя теплопроводности основан на том, что тепловой поток, проходя через образец, будет вызывать его нагревание. Кроме того, будут нагреваться сопрягаемые детали измерителя. Конструкция его позволяет считать адиабатной оболочку измерителя, а часть теплоты, аккумулированной образцом, в несколько раз ниже теплоты, поглощаемой теплоприемником. Следовательно, тепловой поток в таких условиях можно считать одномерным. Детали измерителя и образец в этих условиях будут нагреваться с близкими скоростями, пропорциональными тепловому потоку.

В этих условиях тепловое сопротивление образца будет определяться по формуле:

$$P_o = \frac{n_o \cdot S(1 + \sigma_c)}{n_T \cdot K_T} - R_k \quad (1)$$

где  $n_o$  – перепад напряжения на тепломере измерителя, мкВ;

$n_T$  – перепад на образце, мкВ;

$S$  – площадь контакта, м<sup>2</sup>;

$\sigma_c$  – поправка на теплоемкость образца;

$K_T$  – коэффициент, учитывающий тепловую проводимость, определяемый по кварцевому образцу марки КВ по ГОСТ 15130-69;

$R_k$  – коэффициент, учитывающий тепловое сопротивление контакта образца с тепломером (определяется экспериментально на медной пластинке).

Тогда коэффициент теплопроводности

$$\lambda_1 = \frac{h_o}{P_o} \quad (2)$$

где  $h_0$  – толщина образца, м.

Для эксперимента были изготовлены два образца, из следующих материалов:

- исходный сплав АК 4-1;
- деформированный сплав АК 4-1.

Результаты измерений полученных образцов приведены на рисунке 2.

Как видно из представленных графиков, значения теплопроводности находятся в пределах от 45 до 60 Вт/(м·К).

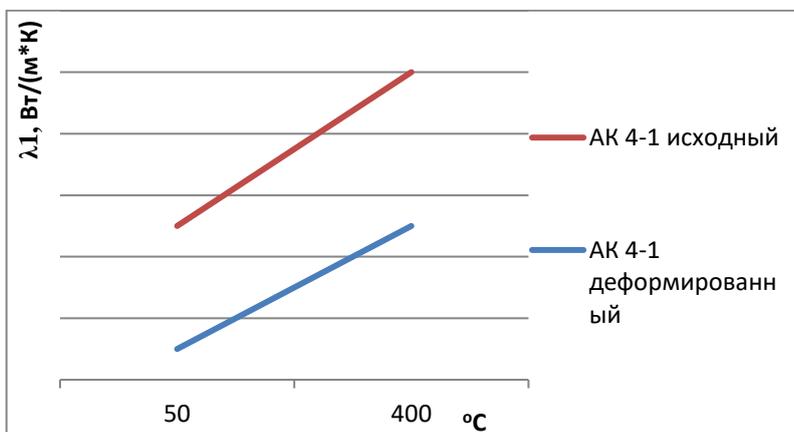


Рисунок 2 – Результаты измерения теплопроводности: 1- АК 4-1 исходный, 2- АК 4-1 деформированный

Из полученных данных следует, что коэффициент теплопроводности деформированного материала ниже, чем у исходного. Возможно, это можно объяснить тем, что при деформации появляются дефекты кристаллической решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Крагельский, И. В. Узлы трения машин: Справочник. / И. В. Крагельский, Н. М. Михин – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
- 2 Марьин Д.М., Хохлов А.Л., Уханов Д.А., Степанов В.А., Нурутдинов А.Ш., Хохлов А.А. Патент на полезную модель № 130003 Российская Федерация, МПК F02F 3/10. Поршень двигателя внутреннего сгорания / Д. М. Марьин, А. Л. Хохлов, Д. А. Уханов, В. А. Степанов, А. Ш. Нурутдинов, А. А. Хохлов. – № 2012151171. Заявл. 28.11.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19.
- 3 Марьин, Д. М. Влияние режимов микродугового оксидирования на образование оксидированного слоя / Д. М. Марьин, А. Л. Хохлов, Д. А. Уханов и др. // Вестник УГСХА. – 2013. - №3(23). – С. 128-131.
- 4 Стефановский Б.С., Скобцов Е.А., Корсик Е.К. Испытания двигателей внутреннего сгорания. –М.: Машиностроение, 1972. –368 с.

REFERENCES

- 1 Kragelsky, I. V. Friction units of machines: Handbook. / I. V. Kragelsky, N. M. Mikhin – M.: Mechanical engineering, 1984. – 280 p.
- 2 Maryin D.M., Khokhlov A.L., Sukhanov D.A., Stepanov V.A., Nurutdinov A.Sh., Khokhlov A.A. Utility model patent No. 130003 Russian Federation, IPC F02F 3/10. Internal combustion engine piston / D. M. Maryin, A. L. Khokhlov, D. A. Ukhonov, V. A. Stepanov, A. Sh. Nurutdinov, A. A. Khokhlov. – № 2012151171. Application. 28.11.2012; publ. 10.07.2013, Bul. No. 19.
- 3 Maryin, D. M. The influence of microarc oxidation regimes on the formation of an oxidized layer / D. M. Maryin, A. L. Khokhlov, D. A. Ukhonov et al. // Bulletin of the UGSHA. – 2013. - №3(23). – Pp. 128-131.
- 4 Stefanovsky B.S., Skobtsov E.A., Korsik E.K. Engine tests internal combustion. -M.: Mechanical Engineering, 1972. -368 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

теплопроводность, поршень, канавка, двигатель, алюминий, сплав, износ, прочность

СВЕДЕНИЯ ОБ

АВТОРАХ:

Мукасеев Александр Владимирович канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЕ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»

Б.В. Палагушкин, В.З. Манусов

## SELECTION OF OPTIMAL MODES OF POWER CONSUMPTION IN AN AUTONOMOUS SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

**Boris V. Palagushkin** (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

**Vadim Z Manusov** (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

**ABSTRACT:** The paper proposes a method and algorithm for optimizing the modes of the autonomous energy system of the Pamir Republic of Tajikistan, which allow minimizing the financial costs of electrical consumers who have the opportunity to choose electricity from renewable (hydro resources) and alternative (wind flow and solar insolation) energy sources, including energy storage.

**Keywords:** *renewable energy sources, energy storage, mode optimization, autonomous power system*

В работе предложены метод и алгоритм оптимизации режимов автономной энергосистемы Памира Республика Таджикистан, позволяющие минимизировать финансовые затраты электропотребителей, которые имеют возможность выбора электроснабжения от возобновляемых (гидроресурсы) и альтернативных (ветровой поток и солнечная инсоляция) источников энергии, включая накопитель энергии.

На сегодняшний день отдельные регионы Республики Таджикистан не имеют электрической связи с центральной энергосистемой. В связи с этим для этих регионов отсутствует централизованный источник энергии и его централизованное резервирование. Наряду с этим регион Памира обладает большим потенциалом использования возобновляемых и альтернативных источников энергии, например, как энергия водных ресурсов малых рек, солнца и ветра. За счет этих ресурсов каждый отдельный электропотребитель может рассматриваться не только как потребитель электроэнергии, но и как возможный источник генерации энергии. Такие потребители в данной работе называются “Генерирующими потребителями”. Это позволяет каждому генерирующему потребителю самому решать задачу оптимального сочетания возобновляемых источников энергии для сокращения своих материально-технических и финансовых затрат [1–4].

Выбор оптимальных режимов автономной энергосистемы Памира осуществляется с помощью оптимизационных методов линейного программирования, а также с возможностью использование методов искусственных нейронных сетей и теории нечетких множеств [5, 6].

В Республики Таджикистан до настоящего времени реальный потенциал ветровой энергии остается мало изученным вопросом. Так, например, недостаточно измерялась скорость ветра на высоте более 30 метров от поверхности земли. В то время как на большей высоте потенциал ветровой энергии может быть на 20-30% больше, чем на поверхности. Тем не менее, по оценкам экспертов потенциал ветроэнергетики составляет от 25 до 150 млрд. кВт·ч/год.

В соответствии со своим географическим положением Республика Таджикистан получает значительную долю солнечной энергии, причем интенсивность прямой солнечной радиации колеблется от 1,30 до 1,7 кал/см<sup>2</sup>/мин. При ясном небе суммарная солнечная радиация достигает 700-800 Вт/м<sup>2</sup> или 7,500-8,000 МДж/м<sup>2</sup>. Данные показатели существенно больше в горных регионах республики и в особенности в Горно-Бадахшанская автономная область [7].

Рассматривая режимы данной энергосистемы прежде всего необходимо добиться балансирования активной мощности с учетом слабой предсказуемости возобновляемых и альтернативных источников энергии. Уравнение баланса активной мощности для автономной энергосистемы Памира можно записать следующим образом

$$P_{ГЭС} + P_{ВЭС} + P_{СЭС} \pm P_{Н.Э.} = P_H + \Delta P, \quad (1)$$

где  $P_{ГЭС}$  – мощность гидроэлектростанций;

- $P_{ВЭС}$  – мощность ветроустановок;
- $P_{СЭС}$  – мощность солнечных станций;
- $P_{Н.э.}$  – мощность накопителей энергии;
- $P_H$  – потребляемая мощность нагрузки;
- $\Delta P$  – суммарные потери активной мощности в энергосистеме.

Или в интегральной форме

$$\int_0^{24} P_{ГЭС}(t) dt + \int_0^{24} P_{ВЭС}(t) dt + \int_0^{24} P_{СЭС}(t) \pm \int_0^{24} P_{Н.э.}(t) = \int_0^{24} P_H(t) + \int_0^{24} \Delta P(t), \quad (2)$$

Минимизации финансовых затрат отдельного генерирующего электропотребителя осуществляется путем минимизации целевой функции, в предположении. На суточном интервале усредненные значения мощности по часам совпадают со значениями электроэнергии.

В связи с тем, что целесообразно минимизировать финансовые затраты каждого отдельного электропотребителя, выражение 3 необходимо записать с учетом индивидуальной стоимости каждого альтернативного или возобновляемого источника энергии

$$\left( C_{ГЭС} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{ГЭС} + C_{ВЭС} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{ВЭС} + C_{СЭС} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{СЭС} \pm C_{Н.э.} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{Н.э.} \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

- где  $C_{ГЭС}$  – стоимость электроэнергии, выработанной на гидростанциях;
- $C_{ВЭС}$  – стоимость электроэнергии, выработанной на ветроэнергетических установках;
- $C_{СЭС}$  – стоимость электроэнергии, выработанной на солнечных фотоэлектрических станциях;
- $C_{Н.э.}$  – стоимость электроэнергии, аккумулированной на накопителя энергии.

В режимах избытка генерации электроэнергии в автономной энергосистеме уравнение имеет вид.

$$\left( k \cdot C_{ГЭС} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{ГЭС} + k \cdot C_{ВЭС} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{ВЭС} + k \cdot C_{СЭС} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{СЭС} \pm k \cdot C_{Н.э.} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{Н.э.} \right) \rightarrow \max, \quad (4)$$

- где:  $G_i$  – избыток электроэнергии в  $i$ -й час суток для каждого генерирующего потребителя;
- $k$  – коэффициент доходности от продажи электроэнергии

Приведённые выше уравнения для данной автономной энергосети должны быть решены в условиях ограничений в форме равенств и неравенств, которые приведены ниже:

$$0 \leq P_{ГЭС} \leq 43,5 \text{ МВт}; \quad 0 \leq P_{ВЭС} \leq 10 \text{ МВт};$$

$$0 \leq P_{СЭС} \leq 6 \text{ МВт}; \quad 0 < P_{Н.э.} \leq 5 \text{ МВт}.$$

Кроме того, при балансировании режима данной энергосети необходимо учитывать целесообразность передачи избыточной электроэнергии в республику Афганистан, имеющий дефицит в регионах вблизи границ с Горно-Бадахшанской автономной области [8].

На основе проведенных расчетов рекомендуется мощность ветрового энергетического парка в размере 10 МВт которая может быть сформирована из 20 ветроустановок мощностью по 500 кВт или 40 установок по 250 кВт. Суммарная мощность солнечной электростанции составляет 6 МВт при к.п.д. 24% и мощность накопителя в виде литий-ионной батареи равной 5 МВт.

На основе линейного программирования разработан алгоритм программы, который минимизирует затраты для наиболее загруженного дня в каждом из четырёх сезонов. В соответствии с разработанными алгоритмом и программой были проведены расчеты оптимального планирования режимов на суточном интервале для зимнего сезона. Этот период выбран

## ELECTRIC POWER INDUSTRY

потому, что в это время использование энергии гидроэлектростанций существенно ограничено. Для зимнего дня результаты оптимального электропотребления приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Оптимальное соотношение альтернативных источников и накопителя энергии*

Время, час	Ргэс, кВт	Рвэс, кВт	Рсэс, кВт	Рн.э., кВт	Сумма
Gh1	22090	1801	0	0	23891
2	24096	1930	0	0	26026
3	23821	1877	0	0	25698
4	24042	1850	0	0	25892
5	25192	1807	0	0	26999
6	29042	1867	0	0	30909
7	31058	1966	0	0	33024
8	26317	1944	0	0	28261
9	29837	1906	0	0	31743
10	38605	1950	0	0	40555
11	39103	1947	0	0	41050
12	39254	1488	390	0	41132
13	38949	1085	949	0	40983
14	38159	1085	964	0	40208
15	38328	1085	952	0	40365
16	39071	1085	885	0	41041
17	39951	762	691	455	41859
18	42185	510	9	465	43169
19	40884	321	0	1089	42294
20	40760	408	0	608	41776
21	38728	510	0	841	40079
22	34552	628	0	1174	36354
23	29571	628	0	368	30567
24	26028	628	0	0	26656

После оптимизации доли источников генерации электроэнергии финансовые затраты существенно сокращаются. Результаты оптимизационных расчетов по снижению финансовых затрат сведены в таблицу 2.

*Таблица 2 – Финансовые затраты электропотребителя в результате оптимизации*

Время, час	Ргэс, руб.	Рвэс, руб.	Рсэс, руб.	Рн.э., руб.	Сумма, руб.
1	37553	6722,4	0	0	44275,4
2	40963,2	7032	0	0	47995,2
3	40495,7	6904,8	0	0	47400,5
4	40871,4	6172,8	0	0	47044,2
5	42826,4	6736,8	0	0	49563,2
6	49371,4	5148	0	0	54519,4
7	52798,6	4718,4	0	0	57517
8	44738,9	4665,6	0	0	49404,5
9	50722,9	4574,4	0	0	55297,3
10	65628,5	4680	0	0	70308,5
11	66475,1	4672,8	0	0	71147,9
12	66731,8	3571,2	1170	0	71473
13	66213,3	2604	2847	0	71664,3
14	64870,3	2604	2892	0	70366,3
15	65157,6	2604	2856	0	70617,6
16	66420,7	2604	2655	0	71679,7
17	67916,7	1828,8	2073	1638	73456,5

18	71714,5	1224	27	1674	74639,5
19	69502,8	770,4	0	3920,4	74193,6
20	69292	979,2	0	2188,8	72460
21	65837,6	1224	0	3027,6	70089,2
22	58738,4	1507,2	0	4226,4	64472
23	50270,7	1507,2	0	1324,8	53102,7
24	44247,6	1507,2	0	0	45754,8
					1478442,3

В некоторые часы на суточном интервале времени в данной автономной энергосистеме после включения новых возобновляемых источников возникает профицит электроэнергии. В связи с этим ее избыток может быть продан в соседний регион или страну. Доходность этого решения представлено в таблице 3.

*Таблица 3 – Доход от продажи электроэнергии*

Время, час	Ргэс, руб.	Рвэс, руб.	Рсэс, руб.	Сумма руб.
1	0	2479,68	0	2479,68
2	0	979,2	0	979,2
3	0	86,4	0	86,4
4	0	0	0	0
5	0	1333,44	0	1333,44
6	0	5584,32	0	5584,32
7	0	8807,04	0	8807,04
8	0	6163,2	291,6	6454,8
9	0	3928,32	3488,4	7416,72
10	0	1791,36	7016,4	8807,76
11	0	97,92	9676,8	9774,72
12	0	0	9896,4	9896,4
13	0	0	8316	8316
14	0	0	7516,8	7516,8
15	0	0	5659,2	5659,2
16	0	0	2998,8	2998,8
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0
				86111,28

Для реальной автономной энергосистемы решена актуальная задача энергоэффективного использования возобновляемых и альтернативных источников энергии. Разработана математическая модель и алгоритм оптимального сочетания различных возобновляемых источников энергии для каждого отдельного генерирующего электропотребителя, что позволяет оптимизировать его финансовые затраты. При этом основную балансирующую роль, с учетом некоторой непредсказуемости ветровой и солнечной энергии, играет накопитель энергии, который в пиковые часы нагрузки поддерживает баланс за счет запасенной энергии. В то же время в ночные часы при условии сниженного тарифа он запасает энергию для

вышеуказанной цели. В целом в условиях профицита электроэнергии для гибкого балансирования режима открывается возможность продажи избыточной электроэнергии на сторону.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Optimization of long-term modes of hydropower plants of the energy system of Tajikistan // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016. DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7911428
- 2 Худжасидов Д. Х., Русина А. Г., Русин Г. Л. Особенности управления режимами энергосистемы Памира // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов 2 все-рос. науч.-практ. конф. молод. ученых, специалистов, аспирантов и студентов. Саяногорск, 2015. С. 102–105.
- 3 Petrov, G.N. Tajikistan's Hydropower Resources. Central Asia and Caucasus // Center for Social and Political Studies. Sweden. 2003. №33(21), pp. 153–161.
- 4 Belyaev, N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. Methods for Optimization of Power-System Operation Modes // Russian Electrical Engineering. 2013. № 2. p. 74–80. DOI:10.3103/s1068371214080136
- 5 Safonov, G.P. The Optimization of the Production Process for Electrical Insulation Systems / G.P. Safonov, A.M. Sorokin, A.V. Buldakov, P.V. Vorob'ev // Russian Electrical Engineering. – 2007. – № 3. – P. 167–169. DOI: 10.3103/S1068371207030145
- 6 Федотов, А.И., Вагапов Г.В. Оптимизация затрат на электроэнергию для производств с продолжительным режимом работы // Промышленная энергетика. 2010. № 10. С. 2–6.
- 7 Труфанов В.В., Ханаев В.В. Математическое моделирование нагрузок потребителей электроэнергии при оптимизации развития электроэнергетических систем // Электричество 2008, №9. С. 2-9.
- 8 Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid // IEEE P&E Magazine. – 2005. – Vol. 3, N 5. – P. 34–41.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

возобновляемые источники энергии, накопитель энергии, оптимизация режимов, автономная энергосистема

## СВЕДЕНИЯ ОБ

Палагушкин Борис Владимирович д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

## АВТОРАХ:

Манусов Вадим Зиновьевич д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «НГУ»

## ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

## REFERENCES

- 1 Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Optimization of long-term modes of hydropower plants of the energy system of Tajikistan // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016. DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7911428
- 2 Khudzhasaidov D.Kh., Rusina A.G., Rusin G.L. Peculiarities of control of Pamir energy system regimes. materials 2 all-Russian scientific-practical. conf. young. scientists, specialists, graduate students and students. Sayanogorsk, 2015, pp. 102–105.
- 3 Petrov, G.N. Tajikistan's Hydropower Resources. Central Asia and Caucasus // Center for Social and Political Studies. Sweden. 2003. No. 33(21), pp. 153–161.
- 4 Belyaev, N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. Methods for Optimization of Power-System Operation Modes // Russian Electrical Engineering. 2013. No. 2. p. 74–80. DOI:10.3103/s1068371214080136
- 5 Safonov, G.P. The Optimization of the Production Process for Electrical Insulation Systems / G.P. Safonov, A.M. Sorokin, A.V. Buldakov, P.V. Vorob'ev // Russian Electrical Engineering. - 2007. - No. 3. - P. 167–169. DOI: 10.3103/S1068371207030145
- 6 Fedotov, A.I., Vagapov G.V. Optimization of electricity costs for industries with long-term operation // Industrial Energy. 2010. No. 10. S. 2–6.
- 7 Trufanov V.V., Khanaev V.V. Mathematical modeling of loads of consumers of electricity when optimizing the development of electric power systems // Electricity 2008, No. 9. pp. 2-9.
- 8 Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid // IEEE P&E Magazine. - 2005. - Vol. 3, No. 5. – P. 34–41.

## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХ ЭКСПЕРТНЫХ ПОДХОДОВ

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГОТРАНСПОРТА»

БУ ВО «СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Б.В. Палагушкин, В.З. Манусов, Г.В. Иванов**

### ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT BASED ON TWO EXPERT APPROACHES

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia  
Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia  
Surgut State University (SurGU) 1, Lenin Ave., Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra, Surgut, 628412, Russia

**Boris V. Palagushkin** (D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

**Vadim Z Manusov** (D. of Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

**Gennadiy V. Ivanov** (Assoc. Prof. of NSTU)

**ABSTRACT:** The paper presents a comparative analysis of expert assessments based on two approaches: arithmetic mean and median values of expert assessments. At the same time, the totality of individual expert opinions, each of which is determined by the level of competence, are consistent to varying degrees, depending on each of the approaches listed above.

**Keywords:** electrical equipment, expert assessment, median assessments, equipment diagnostics

В работе приведен сравнительный анализ экспертных оценок на основе двух подходов: среднеарифметических и медианных значений экспертных оценок. При этом, совокупность отдельных экспертных мнений, каждое из которых определяется уровнем компетентности, согласуются в различной степени, в зависимости от каждого подходов, которые приведены выше.

Во многих случаях при диагностике оборудования систем электроснабжения, в том числе автономных систем передвижных объектов эксперт, как правило, оперирует лингвистическими переменными. В связи с этим возникает целесообразность разбиения текущего технического состояния электрооборудования на классы, которая определяется международной технической комиссией СИГРЭ. В предельном случае определяются условия, при которых состояние электрооборудования таково, что его необходимо срочно вывести из эксплуатации или же оставить в рабочем состоянии под усиленным контролем. В результате обработки статистических данных о дефектах электрооборудования в период предыстории Лицо Принимающее Решение (ЛПР) может принять заключение об условиях дальнейшей эксплуатации оборудования. Наряду с этим следует принимать во внимание, что обнаруженный дефект может являться предвестником более сложной неисправности. Поэтому следует оценивать все обстоятельства в их полной совокупности и рассматривать возможные альтернативные решения [1].

В работе используются статистические данные, которые характеризуют частоту появления дефектов во время эксплуатации трансформаторов с учетом мнений некоторой группы экспертов, которые являются признанными специалистами в данной области. Применение оценок на основе медианы Кемени предлагается для диагностики электрооборудования впервые.

1.1 Оценка согласованности мнений с помощью метода среднего квадратического отклонения.

Если количество экспертов в группе равно ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), а количество оцениваемых факторов ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), то оценка их согласованности определяется в следующем виде. Сначала рассчитывается математическое ожидание оценки  $j$ -го фактора

$$M(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (1)$$

где,  $x_{ij}$  – оценка  $i$ -ого эксперта по  $j$ -ому фактору;  
 $n$  – количество экспертов.

Затем величина дисперсии оценки  $j$  – го фактора

$$D(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - M(x_j))^2}{n-1} \quad (2)$$

Среднеквадратическое отклонение оценки  $j$  – го фактора как

$$\sigma(x_j) = \sqrt{D(x_j)} \quad (3)$$

Величина коэффициента согласованности для оценки согласованности всех экспертов ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) по каждому фактору ( $j = 1, 2, \dots, m$ )

$$\mu_j = 1 - \frac{\sigma(x_j)}{M(x_j)} \quad (4)$$

Если полученное значение находится в пределе  $\mu_j = 0,7-0,9$ , то это свидетельствует о высокой согласованности экспертов и отсутствии сговора между ними [2].

Оценки экспертов представлены в виде некоторых причинно-следственных отношений, отражающие функцию принадлежности или, иначе говоря, субъективную вероятность возникновения дефектов в электрооборудовании. В качестве экспертов выступали специалисты в области энергетики из числа ФГБОУ ВО «НГТУ», а также из числа руководителей ООО «ЛЭП-проект».

Далее приведены признаки  $X$  дефектов по которым выставлялись оценки:

- $X_1$  - неотключение тока КЗ на длительном интервале времени;
- $X_2$  - недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ;
- $X_3$  – нарушение охлаждающей системы;
- $X_4$  – недостаточная механическая стойкость изоляции обмоток.

А также контролируемые параметры  $Y$  дефектов:

- $Y_1$  – деформация обмоток трансформатора;
- $Y_2$ - перегрев обмоток;
- $Y_3$  – предельный износ изоляционного покрытия обмоток;
- $Y_4$ - загрязнение и увлажнение изоляции обмоток.

Исходная информация сведена в таблицу 1.

В качестве сравнения выбрано шесть и девять экспертов. В таблице 2 представлены оценки экспертов для четырех причин  $X_1, X_2, X_3, X_4$  и их согласованность по первому параметру  $Y_1$ .

Таблица 1 – Причины и повреждения обмотки трансформатора

Повреждения	Причины			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
Y <sub>1</sub>	0,6	0,5	0,3	0,7
Y <sub>2</sub>	0,9	0,5	0,8	0,3
Y <sub>3</sub>	0,7	0,4	0,6	0,6
Y <sub>4</sub>	0,4	0,3	0,8	0,7

Таблица 2 – Оценки экспертов по первому параметру

Y <sub>1</sub>	Причины			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
Эксперты				
1	1	0,8	0,3	0,7
2	0,9	0,7	0,4	0,5
3	0,6	0,5	0,3	0,7
4	1	0,6	0,5	0,8
5	0,9	0,5	0,4	0,7
6	0,7	0,8	0,5	0,5
7	0,9	0,8	0,3	0,7
8	0,7	0,6	0,5	0,5
9	0,8	0,7	0,4	0,8
Согласованность по Y <sub>1</sub>				
Шесть экспертов				
μ <sub>j</sub>	0,807	0,788	0,776	0,811
Девять экспертов				
μ <sub>j</sub>	0,830	0,839	0,783	0,812

Коэффициенты согласованности по первому параметру Y<sub>1</sub> соответствуют рекомендуемому уровню согласованности, то есть лежат в интервале 0,7–0,9 [2]. Для всех остальных параметров Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub> и Y<sub>4</sub> согласованность экспертных оценок определена аналогичным образом.

### 1.2 Оценка согласованности экспертных мнений на основе метода медиана Кемени.

Применение медианы Кемени основывается на вводе метрики в пространство мнений экспертов и аксиоматическом введении расстояния между элементами множества мнений экспертов [3].

Если вводить метрику и поместить элементы множества P в пространство, то элементы будут представляться точками этого пространства, что схематично можно видеть на рисунке 1.

Таким образом, медиана Кемени определяется как наименее удаленный элемент от всех остальных множеств P, что математически интерпретируется как минимальная сумма расстояний от фиксированного элемента

$$M^*(P_1, \dots, P_m) = \arg \min \sum_{i=1}^m d(P, P_i) \quad (5)$$

Оценка согласованности экспертных мнений на основе медианы Кемени осуществляется по формуле В.З. Манусова, в которой сначала определяется индекс несогласованности

$$\text{ИН} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |C_{ik} - C_{kk}|}{m} \quad (6)$$

Затем отношение согласованности

$$\text{ОС} = 1 - \text{ИН} \quad (7)$$

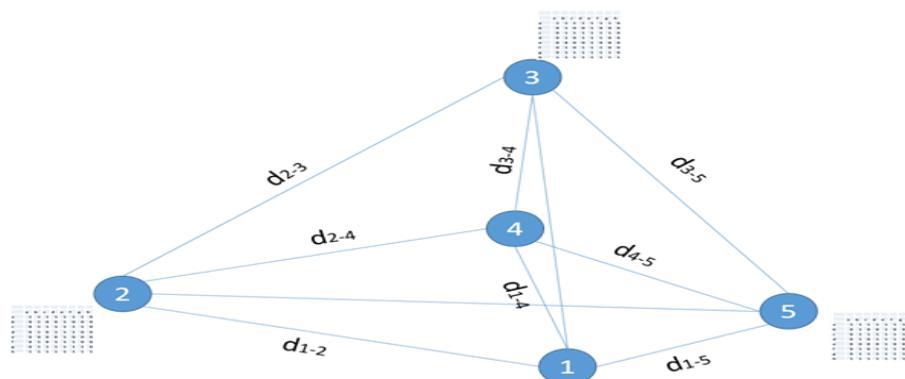
где, i – текущий номер эксперта;

k – текущий номер признака;

n – количество экспертов;

m – количество признаков.

Согласованными считаются оценки в диапазоне  $0,9 \leq \text{ОС} < 1$ , при этом по медиане Кемени определяется согласованность по всей экспертизе.



*Рисунок 1 – Область отклонений экспертных мнений*

Результаты расчетов медианы Кемени для первого параметра  $Y_1$  представлены в таблицах 3–4.

*Таблица 3 – Медиана Кемени для шести экспертов*

Эксперты	1	2	3	4	5	6
Сумма расстояний	2,8	2,6	3,4	3,1	3	3,4

*Таблица 4 – Медиана Кемени для девяти экспертов*

Эксперты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сумма расстояний	2,1	0,6	4,2	3	0,3	0,6	1,2	2,4	1,2

Для шести экспертов медианой оказалось мнение эксперта под номером два, а для девяти экспертов мнение эксперта под номером пять. Представим отношение согласованности в таблице 5.

*Таблица 5 – Отношение согласованности по первому параметру  $Y_1$*

	Признаки			
Количество	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Шесть экспертов	0,945	0,955	0,970	0,955
Девять экспертов	0,965	0,974	0,980	0,958

Коэффициенты согласованности по первому параметру  $Y_1$  находятся в интервале  $0,9 \leq OC < 1$ , что соответствует рекомендуемой величине согласованности.

Кроме того, для девяти экспертов приведен сравнительный анализ экспертных оценок и их согласованность при существенных отклонениях мнений одного из эксперта (таблицы 6, 7).

*Таблица 6 – Медиана Кемени при отклонениях мнений одного эксперта*

Эксперты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сумма расстояний	2,4	0,5	6,6	3,3	0,6	0,3	1,5	2,1	1,5

При отклонениях мнений одного из эксперта медианой оказалось мнение эксперта под номером шесть.

*Таблица 7 – Отношение согласованности при отклонениях мнений одного из эксперта*

	Причины			
$Y_1$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Метод среднего квадратического отклонения				
$\mu_j$	0,765	0,723	0,634	0,676
Метода медиана Кемени				
OC	0,962	0,965	0,971	0,962

Выполненные исследования по диагностике текущего технического состояния электрооборудования на основе экспертных оценок позволяют диагностировать техническое состояние не только для электрооборудования, где может быть использован хроматографический анализ, растворенных газов в масле (ХАРГ), но и для других диэлектрических сред. Кроме того, существенную роль играет сравнение согласованности экспертных оценок.

Исследования показали, что медианные оценки меньше подвержены искажению от отдельных выбросов оценочных мнений, так, например, на основе метода по средним арифметическим, ОС при отклонении мнений одного из эксперта (диссидента) вышло за пределы  $\mu_j=0,6$ , что не соответствует общеустановленному интервалу  $\mu_j=0,7-0,9$ . Наряду с этим, такое же отклонение оценки по медиане Кемени привело к смене эксперта, отражающего в наилучшей степени мнение всей группы, с эксперта под номером пять на эксперта под номером шесть. При этом согласованность мнений в целом уменьшилась, но не выходит за общепринятый интервал.

Показано что суждение о текущем техническом состоянии электрооборудования в системах электроснабжения, включая автономные передвижные объекты, может быть эффективно принято на основе медианных оценок группы компетентных экспертов. В связи с тем, что эксперт выражает свою оценку в некоторой словесной форме, она с помощью теории нечетких множеств должна быть представлена в машинной интерпретации и может быть отнесена к одному из пяти классов, которые оценивают техническое состояние объектов в соответствие с нормативами международной электротехнической комиссии. На основе вышесказанного можно заключить, что вышеперечисленные признаки являются наиболее критичными для состояния и эксплуатации маслонаполненного трансформаторного оборудования и всей подстанции, на которой оно установлено. Рассмотренные методы позволяют предиктивно предсказывать решение о состоянии и судьбе электрооборудования, а именно: находится ли оно в работоспособном состоянии или требует вывода в ремонт. В крайнем случае, может быть установлено, что оно достигло предельного состояния и требует вывода из эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Синягин, Н. Н. Система плано-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики / Н. Н. Синягин, Н. А. Афанасьев, С. А. Новиков. – Москва: Энергоиздат, 1984. – 448 с.
- 2 Ahyoev, J. S. Diagnosing Of The Current Technical Condition Of Electric Equipment On The Basis Of Expert Models With Fuzzy Logic / S. A. Dmitriev, V. Z. Manusov, J. S. Ahyoev // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU-CON): proceedings, Riga & Cesis, Latvia, 13-14 October, 2016. – Riga & Cesis, Latvia, 2016. – P. 243–246.
- 3 Wang, M. «Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service», / M. Wang, A.J. Vandermar. K.D. Srivastava // Proceedings of 2002 IEEE Electrical Insulation Magazine, Canada, November/December, v.18, n.6, 2002, – P. 12-25.
- 4 Lapworth, J. «Transformers reliability surveys», Journal Electra, Cigré, n.227, August 2006, – P.10-14.
- 5 Marques, A.P. «Eficiênciaenergética e vidaútil de transformadoresde distribuiçãoimersosemóleo mineral isolante» (Energy efficiency and service life of distribution transformers immersed in insulating mineral oil), Master's Dissertation - School of Electrical and Computer Engineering, Federal University of Goiás, Goiânia, 2004.
- 6 Манусов В. З. Применение методов искусственного интеллекта в задачах технической диагностики электрооборудования электрических систем: монография / Манусов В. З., Левин В. М., Хальясмаа А. И., Ахьёев Д. С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020.
- 7 Ab Ghani, S.; Md Thayoob, Y.H.; Ghazali, Y.Z.Y.; Khair, M.S.A.; Chairul, I.S.; , «Evaluation of transformer core and winding conditions from SFRA measurement results using statistical techniques for distribution transformers» Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International , vol., no.,pp. 448-453, 6-7 June2012.
- 8 Секретарев, Ю.А. Выбор и принятие управленческих решений/ Ю.А.Секретарев. –Новосибирск: Изд-во Новосибир.гос.техн.унив., 2002. – 36с.

## REFERENCES

- 1 Sinyagin, N. N. The system of preventive maintenance of equipment and networks of industrial energy / N. N. Sinyagin, N. A. Afanasiev, S. A. Novikov. - Moscow: Energoizdat, 1984. - 448 p.
- 2 Ahyoev, JS Diagnosing Of The Current Technical Condition Of Electric Equipment On The Basis Of Expert Models With Fuzzy Logic / SA Dmitriev, VZ Manusov, JS Ahyoev // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU-CON): proceedings, Riga & Cesis, Latvia, 13-14 October, 2016. – Riga & Cesis, Latvia, 2016. – P. 243–246.
- 3 Wang, M. "Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service", / M. Wang, A.J. Vandermar. K.D. Srivastava // Proceedings of 2002 IEEE Electrical Insulation Magazine, Canada, November/December, v.18, n.6, 2002, - P. 12-25.
- 4 Lapworth, J. "Transformers reliability surveys", Journal Electra, Cigré, n.227, August 2006, - P.10-14.
- 5 Marques, A.P. "Eficiênciaenergética e vidaútil de transformadoresde distribuiçãoimersosemóleo min-eral isolante" (Energy efficiency and service life of distribution transformers immersed in insulating min-eral oil), Master's Dissertation - School of Electrical and Computer Engineering, Federal University of Goiás, Goiânia, 2004.
- 6 Manusov V. Z. Application of artificial intelligence methods in the problems of technical diagnostics of electrical equipment of electrical systems: monograph / Manusov V. Z., Levin V. M., Khalyasmaa A. I., Akhyoev D. S. - Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2020.
- 7 Ab Ghani, S.; Md Thayoob, Y.H.; Ghazali, Y.Z.Y.; Khair, M.S.A.; Chairul, I.S.; , "Evaluation of transformer core and winding conditions from SFRA measurement results using statistical techniques for distribution transformers" Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International , vol., no., pp. 448-453, 6-7 June2012.
- 8 Secretaries, Yu.A. Choice and adoption of management decisions / Yu.A.Secretarev. -Novosibirsk: Publishing House of Novosibirsk State Technical University, 2002. – 36 p

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

электрооборудование, экспертная оценка, медианные оценки, диагностика оборудования

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Палагушкин Борис Владимирович д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
Манусов Вадим Зиновьевич д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «НГТУ»  
Иванов Геннадий Викторович доцент БУ ВО «СурГУ»

## ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»  
628412, г. Сургут, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, пр. Ленина, 1, БУ ВО «СурГУ»

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО УПРАВЛЕНИЮ НА РЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ

ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»

С.Н. Масленников, М.Г. Сеницын

**INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR TRAINING SPECIALISTS FOR MANAGEMENT IN RIVER TRANSPORT**

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

**Mikhail G. Sinitsyn (Senior Lecturer of SSUWT)**

**Sergey N. Maslennikov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)**

---

**ABSTRACT:** The modern environment is characterized by a sharp increase in information flows that need to be processed in order to keep pace with the development of science and education. Information flows are growing so fast that it is becoming increasingly difficult to process them with traditional methods.

---

**Keywords:** simulator training, dispatcher, information technologies, inland water transport, transport process management model, innovations

---

Современная среда характеризуется резким ростом информационных потоков, которые необходимо обрабатывать, чтобы идти в ногу с развитием науки и образования. Информационные потоки растут так быстро, что их становится все труднее обрабатывать традиционными методами.

Все области функционирования общественной деятельности и поведения человека сегодня немыслимы без информационных технологий [1]. Это требует изменения и конверсии громадных массивов информации и в информационном сопровождении. Нашли применение информационные технологии и в судовождении. Они направлены на повышение эффективности эксплуатации судов и безопасности судовождения, позволяют принимать оптимальные решения по управлению судами, объектами инфраструктуры и транспортными процессами, особенно в сложных и неопределенных условиях судоходства.

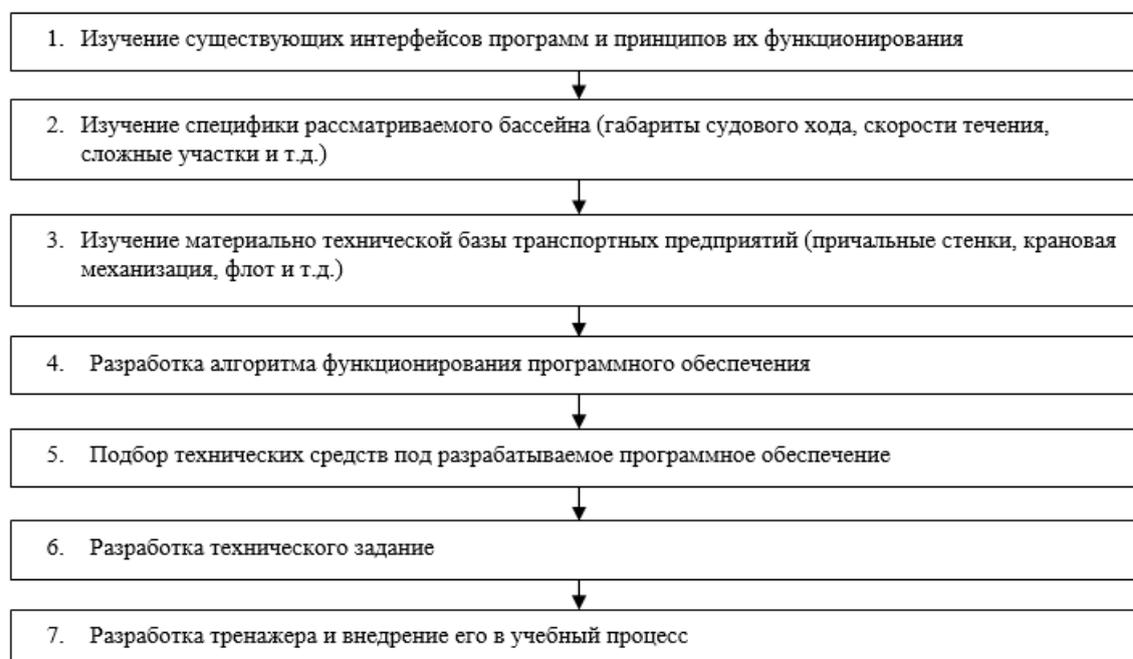
На морском флоте получили развитие и доступность современные информационные судовые и береговые системы, предназначенные для качественного отображения текущей ситуации, и обеспечивают качество управленческих решений. К таким системам относятся: системы автоматической идентификации, электронно-картографические навигационные информационные системы, интегрированные навигационные системы, комплексы радионавигационных приборов, системы управления движением судов, расположенные на берегу, глобальная морская система связи при бедствии и др.

Однако на внутреннем водном транспорте из-за особенностей судоходства и низкой рентабельности перевозок внедрение информационных технологий в управлении транспортным процессом лишь недавно получило активное развитие [2]. Определенный прорыв произошел вследствие развития технических средств связи, необходимости обновления навигационного оборудования по требованиям контролирующих органов, доведение навигационного оборудования до требований необходимых для плавания в морских условиях. В ряде судоходных компаний восточных бассейнов диспетчерское управление работой флота получило развитие спутникового контроля на движения флота и визуализация дислокации флота на электронной карте. Значительное влияние на этот процесс оказало необходимость оперативного контроля за расходом топлива для управления снабжением и эффективным расходом значительных финансовых ресурсов.

Закономерный процесс, когда информационные технологии управления транспортным процессом, применяемые на практике, должны использоваться как средство достижения учебных целей профессионального обучения [3]. Поскольку молодые специалисты после окончания учебного заведения в кратчайший срок должны приступить к управлению транспортным процессом и семь дней в неделю и двадцать четыре часа в сутки будут находиться за диспетчерскими столами, экранами компьютеров, пользуясь справочниками, телефонами, радиосвязью необходимо предложить адекватное средство обучения [4]. Таким средством должен быть тренажер. На самом деле именно тренажерная подготовка, представляющая собой как комплекс способов, методов и методик профессиональной подготовки, направленного на создание знаний, умений и навыков обучающихся с помощью оборудования и программных средств [5].

Тренажер моделирования транспортных процессов должен быть максимально адекватен

изучаемым физическим процессам и технологиям, по интерфейсу отвечать требованиям соответствия управляемому объекту, по методическим возможностям быть эффективным средством обучения и по возможности, простым и надежным в эксплуатации [6]. При всех идеальных качествах тренажера он все же носит статус вспомогательный и без педагога – инструктора может восприниматься, как набор аппаратно-программных средств для обучения персонала. При создании тренажерного комплекса необходимо опираться на существующие реальные программы, которые уже используются у судоходных компаний. Алгоритм создания тренажера для специалистов по управлению на речном транспорте приведен на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Алгоритм создания тренажера для специалистов по управлению на речном транспорте*

Модуль должен обеспечивает возможность изучения и отработки следующих функций и профессиональных компетенций диспетчера:

- изучение технологических процессов работы судов и составов;
- движение, формирование состава, технологические операции по пунктам и линейным участкам;
- исследование факторов транспортного процесса перевозки грузов;
- скорость при различных условиях, загрузка, параметры состава, время грузовых и технологических операций;
- приобретение навыков управления работой флота и транспортным процессом путем решения диспетчерских задач;
- регулирование технологических процессов и операций и документирование информации.
- Модуль должен обеспечивать возможность:
  - • хранения, изменения, документирования (в том числе ведение журналов) и отображение всех параметров технологических процессов на всех рабочих местах. Ведение протокола и статистики, сохранение в БД, обработка результатов тренинга производится средствами клиент-серверной платформы;
  - Запись переговоров, ведущихся между виртуальными АРМ обучающихся;
  - проигрывание ранее выполненных сценариев с отображением их на карте и визуализации с одновременным воспроизведением всех переговоров для оценки работы диспетчеров/обучаемых (дебрифинг).

Учебный тренажер, реализованный в виде рабочих мест компьютерами, не только приближается к реально существующим диспетчерским управления работой флота, оборудованию служб перевозок и движения флота в речных судоходных компаниях, но и позволяет визуализировать транспортный процесс.

Визуализация помогает учащимся учиться, исследователям создавать новые знания,

менеджерам и администраторам лучше структурировать и управлять организациями, руководителям объективно оценивать реальность. Все события отражаются в визуальных образах и вербальных текстах, с помощью которых люди обычно описывают их. Именно смысловое значение событий, созданных силой человеческого воображения, включает в себя индивида, других людей, пространственную среду и временную последовательность событий. Это обстоятельство является основой практических действий по исследованию внешнего мира, в ходе которых исходный образ видоизменяется, тем более удовлетворяя практические потребности. В своем интеллектуальном развитии индивид переходит от грубого смыслового поиска - эмоционально насыщенного и экспрессивного - к действиям по созданию образов. Образ содержит модель мира в ее смысловой форме и предполагает смысловую целостность. Смысловая целостность — это идеальная среда, в которой все предметы, качества и свойства материального мира рассматриваются с определенной точки зрения и интерпретируются на основе практического опыта. Именно тренажерная подготовка является средством максимального приближения практического учебного опыта к компетенциям, необходимым на реальном рабочем месте.

Основной интерфейс автоматизированного рабочего места (далее - АРМ) диспетчера представляет собой аналог реально существующей автоматизированной системы управления транспортными процессами на ВВП (включая карты-схемы, графики, отображения водных путей, объектов инфраструктуры, судов и т.п.). В целях улучшения качества обучения студентов виртуальное АРМ диспетчера максимально приближено к реально действующим диспетчерским системам. Примеры интерфейса существующих АРМ приведены на рисунке 2.

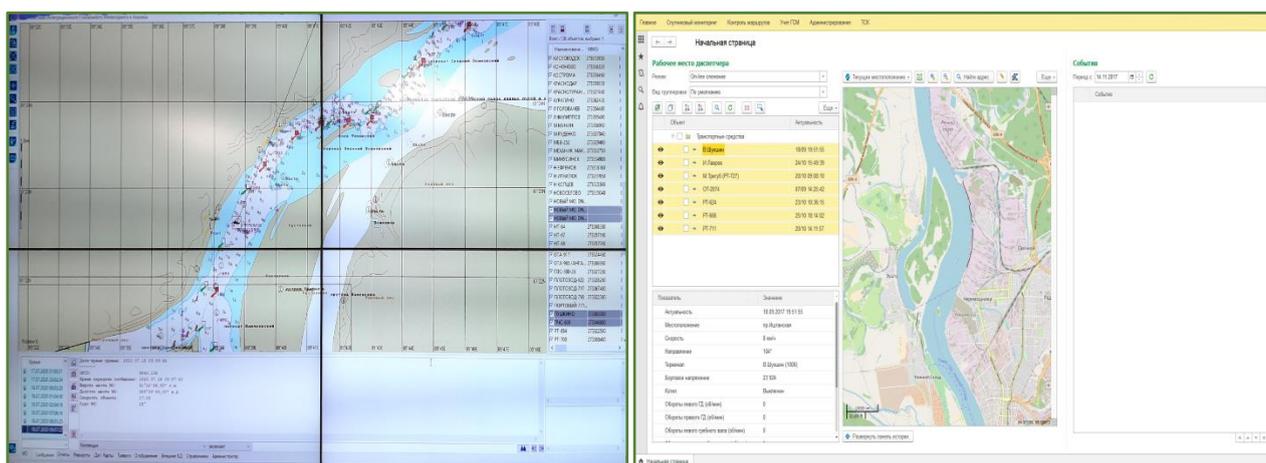


Рисунок 2 – Пример интерфейса АРМ диспетчера (слева – SIGMA, справа - 1С Предприятие)

Основным средством визуализации и источником информации об обстановке на линейном участке выступает его интерактивная электронная карта-схема.

Она отображает информацию:

- о состоянии средств береговой и плавучей навигационной обстановки участка ВВП;
- о текущей дислокации флота на водном пути с непосредственным отображением места положения каждой единицы флота;
- о местах расположения портов, шлюзов, мостов и ГЭС;
- о дислокации транспортного, рейдового, служебно-вспомогательного и технического флота.

– Электронная карта-схема обладает следующим функционалом:

- перемещение по карте (скроллинг);
- изменение масштаба обзора (приближение/удаление);
- интерактивное взаимодействие с объектами на карте: вызов контекстного меню, отображение текущей информации об объектах и т.п.

Данные операции выполняются при помощи контекстного меню «Инструменты карты». Каждому обучаемому доступна для просмотра вся карта водотранспортного бассейна, но функции по управлению транспортным процессом ученик может осуществлять только в заданных границах своего линейного участка.

Для отображения текущей информации по объекту на карте необходимо выбрать

инструмент «Выбор объекта» в меню «Инструменты карты» и нажмите на интересующий вас объект. При этом появится всплывающее окно информации (рисунок 3).



Рисунок 3 – Отображение информации на карте-схеме

Рабочий экран диспетчера отображается на двух мониторах персонального компьютера, при этом разделяться на следующие отображаемые области и меню:

Основной монитор, включает:

- интерактивную карту-схему;
- панель инструментов;
- список присутствующих на участке судов;
- окно отображения свойств объекта (порта/пристани, судна).

Вспомогательный монитор:

- расписание на участке;
- график движения на линейном участке;
- файлы справочной информации и документации.

Пример интерфейс АРМ диспетчера представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Интерфейс АРМ диспетчера

Тренажер представляет собой имитацию реально существующего воднотранспортного бассейна внутренних водных путей [7]. Картографическая территория бассейна берется с реального в масштабе 1:1. При создании тренажера используются актуальные карты бассейна и внутренних водных путей, истинные координаты и названия портов, пристаней, населенных пунктов, шлюзов и прочих гидротехнических сооружений.

Все водные пути пространства тренажера разделены на линейные участки, доступных

для диспетчерского контроля. Каждый из участков обладает одним или несколькими (портом/пристанью). Виртуальный мир наполнен объектами, влияющими на ход коллективной игры. В качестве объектов могут выступать как единицы флота, так и наземные или водные сооружения

Управление флотом на определенном линейном участке и деятельность отдельного порта/пристани (или портов/пристаней) обеспечивается с одного рабочего места диспетчера. Прочие «не занятые» учениками-диспетчерами линейные участки, а также «не занятые» участки в случае обучения группы менее 15 человек, проходятся судами транзитно согласно штатному расписанию.

В рамках реализации береговой инфраструктуры коллективной игры должны быть смоделированы следующие свойства портов/пристаней:

- фактические координаты и наименования порта/причала;
- технологические операции в портах (наименование, время проведения);
- информация об оснащенности порта перегрузочной техникой;
- о готовности причалов и рейдов к приему судов;
- о заявках на обслуживание судов в портах;
- о нормативном, фактическом, прогнозном времени стоянки в портах;
- об услугах комплексного обслуживания;
- о свойствах причалов (размеры и глубины у причала; схемы швартовки; типы грузов и возможность приема опасных грузов; левый/правый берег, местоположение (км пути, координаты)).

Объекты должны отображаться на интерактивной карте-схеме в виде интерактивных областей с названием порта/причала/населенного пункта.

Для выполнения основной задачи диспетчера – обучаемому должна быть предоставлена контрольная информация о расписании движения транспорта на вверенном ему участке:

- о регистрации рейсов и фиксации прохождения контрольных пунктов на внутреннем водном пути;
  - об учете судо- и грузопотоков;
  - о судопотоках и грузопотоках на заданных интервалах времени через заданные точки и на заданных участках пути;
  - о нормативном, фактическом, прогнозном времени стоянки в портах;
  - о рейсах на водном пути.
- Основными задачами для обучаемых являются:
- управление всеми процессами движения судов, постановки к причалам, прохождения шлюзов, мостов и переправ в соответствии с заданным расписанием;
  - принятие управленческих решений в нестандартных и аварийных ситуациях.
- Тренажер должен иметь возможность сбора, хранения, обработки и вывода статистики по результатам проведения коллективной игры.
- Хранение и организация доступа к результатам контроля знаний должны быть персонализированными и включать следующие данные:
  - наименование сценария обучения;
  - дата и время тестирования;
  - протокол действий пользователя с учетом допущенных ошибок;
  - общее время на выполнение заданий сценария обучения;
  - итоговую оценку.

Современное общество характеризуется резким увеличением информационных потоков, которые людям необходимо обрабатывать для поддержания прогресса в развитии науки и образования [8]. Объем информации растет так быстро, что люди уже не в состоянии осмыслить объемы числовых или фактических данных и обрабатывать их традиционными методами [9].

Хотя использование визуализации в управлении транспортными процессами растет, в основном визуализируются объекты транспортной инфраструктуры [10]. Основное внимание уделяется визуализации того, как работает созданная модель системы, а не визуализации выходных результатов моделирования.

Учебный тренажер может быть использован для отработки нового подхода, который заключается в визуализации выходных данных сценариев имитационного моделирования.

На основе результатов работы модели одновременно с отображением карты возможно предоставление пользователю следующей информации [11]:

1. Иллюстрация входных и выходных данных моделирования;
2. Одновременное отображение различных сценариев;
3. Отображение имитационной информации на основе связей и маршрутов.

Визуализация графиков, диаграмм облегчает процесс проектирования производственных и экономических показателей.

Основываясь на положительных отзывах, полученных во время презентации инструментария пользователям, мы считаем, что инструментарий тренажерной подготовки способствует улучшению понимания и понимания существа элементов транспортного процесса, заинтересованные стороны и лица, ответственные за принятие решений расширяют их возможности достижения оптимальных результатов [12].

Положение, которое сформировалось сегодня на внутреннем водном транспорте России с тренажерной подготовкой специалистов по управлению движением флота, требует преобразований. Основой этих изменений должны быть информационные технологии и имитационное моделирование транспортного процесса. Такие технологии есть, они уже прошли апробацию и доказали свою эффективность [13].

Инновационные технологии повсеместно применяются на предприятиях речного транспорта и позволяют повысить эффективность использования флота, которая проявляется в повышении производительности подвижного состава, снижение затрат и повышении безопасности транспортного процесса [14]. Для подготовки высококлассных специалистов необходимы подобные имитационные модели на базе транспортных вузов. При прохождении производственной практики на транспортных предприятиях у студентов могут возникать трудности при использовании современных программных продуктов, для устранения этих пробелов работодателям приходится проводить дополнительное обучение, что довольно финансово и трудозатратно. При использовании тренажеров по подготовке студентов эта проблема устраняется, и работодатель получает высококлассных специалистов компетентных практически во всех вопросах [15]. Во время проведения лабораторных работ имитируются различные экстремальные ситуации, которые происходят случайно или по причине ошибочных действий обучающихся. Для устранения подобных ситуаций студент должен принять управленческое решение, которое повлияет на дальнейший сценарий. По окончании работы проводится разбор ошибок, которые были допущены и прорабатываются альтернативные варианты. Тренажерная подготовка студентов позволяет обучающемуся получить навыки необходимые на практике, так как функционирование транспортного процесса происходит в условиях риска и неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Синеглазов В., Шмелев Дж., Оптимизация обучения на тренажере, октябрь 2014 г., Электроника и системы управления 1(39), DOI:10.18372/1990-5548.39.7335
- 2 Britt, L., Addressing Simulation Training, July 2016 Journal of Surgical Education 73(5), DOI:10.1016/j.jsurg.2016.05.007
- 3 Абельская И., Слободин Ю., Каминская Т., Колешко С., Никонова О. Организация послевузовской симуляционной подготовки, март 2020 г., DOI:10.29235/1818-9857-2020-3-44-47
- 4 Стойлова С., Мунье Н. А. Новый нечеткий многокритериальный метод принятия решений SIMUS. Приложение в планировании железнодорожных пассажирских перевозок, Symmetry 13(3):483, март 2021 г., DOI:10.3390/sym13030483
- 5 Архипов А., Григорьев Е., Синицын М. Северный морской путь: ретроспектива, стратегические решения и перспективы развития // 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI : 10.1051/e3sconf/202016411020
- 6 Qun, M., Jiabing H., Zhengqing X., Xuanhuai, Y., Docker-based Simulation Training System on Dispatching and Control Cloud, May 2019, Conference: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), DOI:10.1109/ISGT-Asia.2019.8881708
- 7 Jaiac N., Marović L., Hanák T. Decision Support for Management of Urban Transport Projects. Gradevinar, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 131–141. doi:10.14256/JCE.1160.2014

REFERENCES

- 1 Sineglazov, V., Shmelev, J., Simulator training optimization, October 2014, Electronics and Control Systems 1(39), DOI:10.18372/1990-5548.39.7335
- 2 Britt, L., Addressing Simulation Training, July 2016 Journal of Surgical Education 73(5), DOI:10.1016/j.jsurg.2016.05.007
- 3 Abelskaya, I., Slobodin, Y., Kaminskaya, T., Koleshko S., Nikonova O., Organization of postgraduate simulation training, March 2020, DOI:10.29235/1818-9857-2020-3-44-47
- 4 Stoilova, S, Munier, N A Novel Fuzzy SIMUS Multicriteria Decision-Making Method. An Application in Railway Passenger Transport Planning, March 2021 Symmetry 13(3):483, DOI:10.3390/sym13030483
- 5 Arkhipov, A., Grigoriev, E., Sinitsyn, M. The Northern sea route: A retrospective, strategic solutions and prospects of development // 2020. E3S Web of Conferences Volume 164, 5 May 2020, Номер статьи 11020 DOI: 10.1051/e3sconf/202016411020
- 6 Qun, M., Jiabing H., Zhengqing X., Xuanhuai, Y., Docker-based Simulation Training System on Dispatching and Control Cloud, May 2019, Conference: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), DOI:10.1109/ISGT-Asia.2019.8881708
- 7 Jaiac N., Marović L., Hanák T. Decision Support for Management of Urban Transport Projects. Gradevinar, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 131–141. doi:10.14256/JCE.1160.2014
- 8 Máslo, K. (2006). Dynamický model ES pro dispečerský тренаžer. Proc. 7th International conference Control of power & heating systems, Zlín (Czech Republic). doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.682
- 9 Máslo, K., Eickman, J. (2014). Simplification of Breaker Oriented Network Model into Extended Bus Oriented Model, Proc. IEEE International Energy Conference EnergyCon, Dubrovnik (Croatia) doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850490
- 10 Walkington, C. A. (2013). Using adaptive learning technologies to personalize instruction to student interests: The impact of relevant

8 Máslo, K. (2006). Dynamický model ES pro dispečerský trenažér. Proc. 7th International conference Control of power & heating systems, Zlín (Czech Republic). doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.682

9 Máslo, K., Eickman, J. (2014). Simplification of Breaker Oriented Net-work Model into Extended Bus Oriented Model, Proc. IEEE International Energy Conference EnergyCon, Dubrovnik (Croatia) doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850490

10 Walkington, C. A. (2013). Using adaptive learning technologies to personalize instruction to student interests: The impact of relevant contexts on performance and learning outcomes. Journal of Educational Psychology, 105(4), 932–945. doi: 10.1037/a0031882

11 Michailidou, E., Hampla, A., Simulation training in ICU, October 2020 IOSR Journal of Dental and Medical Sciences 19(10):19-22, DOI:10.9790/0853-1910041922

12 Manning D, Simulator Training, April 2017, In book: Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, DOI:10.1002/9781118476406.emoe049

13 Walkington, C., & Sherman, M. (2012, June). Using adaptive learning technologies to personalize instruction: The impact of interest-based scenarios on performance in algebra. Paper presented at 10th International Conference of the Learning Sciences, Sydney, Australia. Sydney, Australia: University of Sydney. doi: 10.13140/2.1.4276.6084

14 Evans, E., P., Hughes, P., Simulation training, January 2012, DOI:10.1017/CBO9780511842153.040

15 Бурков В.Н., Ирина В.Буркова И.В., Уандыков К.Б., Задача оперативного управления проектами, doi:10.14529/ctcr150415

contexts on performance and learning outcomes. Journal of Educational Psychology, 105(4), 932–945. doi: 10.1037/a0031882

11 Michailidou, E., Hampla, A., Simulation training in ICU, October 2020 IOSR Journal of Dental and Medical Sciences 19(10):19-22, DOI:10.9790/0853-1910041922

12 Manning D, Simulator Training, April 2017, In book: Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, DOI:10.1002/9781118476406.emoe049

13 Walkington, C., & Sherman, M. (2012, June). Using adaptive learning technologies to personalize instruction: The impact of interest-based scenarios on performance in algebra. Paper presented at 10th International Conference of the Learning Sciences, Sydney, Australia. Sydney, Australia: University of Sydney. doi: 10.13140/2.1.4276.6084

14 Evans, E., P., Hughes, P., Simulation training, January 2012, DOI:10.1017/CBO9780511842153.040

15 Burkov, V.N., Irina V.Burkova, I.V., Uandykov, K.B., The Task of Operational Management of the Projects, doi:10.14529/ctcr150415

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *тренажерная подготовка, диспетчер, информационные технологии, внутренний водный транспорт, модель управления транспортными процессам, инновации.*  
**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:** *Синицын Михаил Геннадьевич, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»*  
*Масленников Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»*  
**ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:** *630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

---

## CONTENTS

---

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<b>Синицын М.Г., Глоденис Т.В., Масленников С.Н.</b> ПЕРСПЕКТИВЫ ВНУТРЕННЕГО ВОДНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ОСВОЕНИИ КОНТИНЕ- ТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕ- РАЦИИ.....	5
<b>Иванова О.Н., Каравка А.А., Калинина А.П.</b> УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬ- ЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ .....	11

### TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS

<b>M.G. Sinitsyn, T.V. Glodenis, S.N. Maslennikov</b> PROSPECTS FOR INLAND WATER TRANSPORT DURING THE DEVELOPMENT OF THE CONTINENTAL SHELF OF THE RUS- SIAN FEDERATION.....	5
<b>O.N. Ivanova, A.A. Karavka, A.P. Kalinina</b> INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF VEHICLES .....	11

### СУДОВОЖДЕНИЕ

<b>Сичкарев В.И., Умрихин В.П.</b> ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНЕ ПЛА- ВАНИЯ СУДНА НА ВРЕМЯ РЕГИСТРАЦИИ КАЧКИ.....	17
--	----

### MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF MEANS OF TRANSPORT

<b>V.I. Sichkarev, V.P. Umrikhin</b> HYDROMETEOROLOGICAL ANALYSIS OF THE WAVE SITUATION IN THE AREA OF NAVI- GATION OF THE VESSEL AT THE TIME OF REGISTRATION OF ROLL.....	17
--	----

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<b>Пчельников А.В., Пичугин А.П., Илясов А.П., Дмитриев А.С.</b> ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КА- ЧЕСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАН- НЫМИ ЛАКОКРАСОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ.....	24
<b>Барановский А.М., ЩербакOVA О.В., Викулов С.В.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ МОМЕНТА В ДИЗЕЛЕ .....	31
<b>Мукасеев А.В.</b> АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТО- РОВ НА ВЕРХнюю ПОРШНЕВУЮ КОМ- ПРЕССИОННУЮ КАНАВКУ ПОРШНЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СУДОВОГО ДИ- ЗЕЛЯ.....	34

### HEAT POWER INDUSTRY

<b>A.V. Pchelnikov, A.P. Pichugin, A.P. Ilyasov, A.S. Dmitriev</b> ENSURING THE OPERATIONAL QUALITIES OF PROTECTIVE COATINGS OF MACHINERY AND EQUIPMENT WITH NANOMOD-IFIED PAINT AND VARNISH MATERIALS IN SIBERIA .....	24
<b>A.M. Baranovsky, O.V. Shcherbakova, S.V. Vikulov</b> MODELING OF THE MOMENT IN A DIESEL EN- GINE .....	31
<b>A.V. Mukaseev</b> ANALYSIS OF THE IMPACT OF EXTERNAL FACTORS ON THE UPPER PISTON COMPRESSION GROOVE OF THE ALUMINUM ALLOY PISTON OF MARINE DIE- SEL.....	34

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

<b>Палагушки Б.В., Манусов В.З.</b> ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕК- ТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В АВТОНОМНОЙ СИ- СТЕМЕ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИ- КАМИ ЭНЕРГИИ.....	38
<b>Палагушки Б.В., Манусов В.З., Иванов Г.В.</b> АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫ- СОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВА- НИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХ ЭКСПЕРТНЫХ ПОД- ХОДОВ.....	42

### ELECTRIC POWER INDUSTRY

<b>B.V. Palagushkin, V.Z. Manusov</b> SELECTION OF OPTIMAL MODES OF POWER CONSUMPTION IN AN AUTONOMOUS SYS- TEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES .....	38
<b>B.V. Palagushkin, V.Z. Manusov, G.V. Ivanov</b> ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT BASED ON TWO EXPERT APPROACHES.....	42

### ТРАНСПОРТНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

<b>Масленников С.Н., Синицын М.Г.</b> ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГО- ТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО УПРАВЛЕНИЮ НА РЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ .....	47
--	----

### TRANSPORT EDUCATION

<b>M.G. Sinitsyn, T.V. Glodenis, S.N. Maslennikov</b> INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR TRAINING SPECIALISTS FOR MANAGEMENT IN RIVER TRANSPORT .....	47
---	----

## ПОРЯДОК ПРИЕМА МАТЕРИАЛОВ

Уважаемые коллеги!

Редакция журнала «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока», приглашает Вас опубликовать результаты Ваших научных исследований в очередном номере журнала. Материалы (заявку и статью) просим высылать ответственному секретарю журнала Коновалову В.В. по электронной почте: [konovalov@nsawt.ru](mailto:konovalov@nsawt.ru). Оригиналы по почте на адрес Университета с пометкой для Коновалова В.В.

### Заявка на публикацию научной статьи

	на русском языке	на английском языке
НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (без каких-либо сокращений и символов)		
Аннотация (до 300 знаков)		
Ключевые слова (от 3 до 10 слов)		
Организация (полное юридическое название и полный почтовый адрес работы каждого из авторов)		
Автор(ы) (ФИО полностью, ученая степень, занимаемая должность, числовой идентификационный номер автора: Author ID в системе РИНЦ)		
Количество ссылок на литературу		
Координаты для обратной связи (ФИО полностью, адрес электронной почты, мобильный телефон*)		

\*-номер мобильного телефона необходим для оперативного решения возможных вопросов по поводу публикации и разглашению не подлежит

С условиями публикации ознакомлен(ы), представленный материал ранее не был опубликован, о рецензировании статьи компетентным по тематике статьи лицом не возражаем.

Дата

Подпись(и)

Требования к представлению материалов:

- 1 Статья (оригинал) и ее электронная версия в формате MS WORD (объем 3-5 страниц А4, шрифт Arial размер 14, одинарный интервал, поля 2 см).
- 2 Заявка (оригинал) и ее электронная версия в формате MS WORD на публикацию научной статьи.
- 3 Графический материал не подлежит правке при наборе (при выполнении рисунков поясняющий текст должен быть разборчив); размеры рисунка не более 15×15 см; глубина цвета – оттенки серого.
- 4 Ширина таблиц не более 15 см.
- 5 Все математические формулы и выражения должны быть набраны в специальном редакторе формул (Mathtype и др.), шрифт Arial.
- 6 Обязательные ссылки на список литературы выполняются сквозной нумерацией арабскими цифрами, в квадратных скобках в порядке указания. На каждый указанный в списке источник должны быть ссылки в тексте статьи.

**Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с автором(и)**

С условиями публикации материалов можно ознакомиться у ответственного секретаря журнала Коновалова Валерия Владимировича по электронной почте: [konovalov@nsawt.ru](mailto:konovalov@nsawt.ru). Почтовый адрес: 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» а также на интернет-странице по адресу: <http://www.ssuwt.ru> в разделе «Наука-Научные издания». Для аспирантов очного отделения публикация материалов в журнале – бесплатно, в порядке очередности и актуальности.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ  
Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока  
№1 за 2021 год

Главный редактор – Палагушкин Б.В.

Ответственный за выпуск – Коновалов В.В.  
Перевод на английский язык – Руденко К.Д.

Подписано в печать 16.04.2021 г. с оригинал-макета  
Бумага офсетная №1, формат 60x84 1/8, печать трафаретная – Riso.  
Усл. печ. л. 6,5; тираж 500 экз. Заказ №109  
Цена свободная.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»  
(ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, тел. (383)222-64-68,  
факс (383)222-49-76

Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-22440 выдано 20.12.2005 г.

ISSN 2071-3827

Подписной почтовый индекс 62390